

УДК 614.87

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБОСНОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПАСНОСТИ АВАРИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНО  
ОПАСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Доктор техн. наук *В.И. Гуменюк***

**Санкт-Петербургский политехнический университет**

**Доктор техн. наук *А.М. Кармишин***

**ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»**

**Кандидат техн. наук *М.Л. Макаров***

**ФГБУ «27 Центральный научно-исследовательский институт Министерства  
обороны Российской Федерации»**

*Рассматриваются три взаимосвязанных уровня обобщения (описания) опасности техногенных аварий (катастроф) потенциально опасных промышленных объектов. На каждом уровне обобщения даются современные представления, позволяющие выполнять теоретические расчеты. Даются методы описания вероятности поражения населения не ниже заданной степени тяжести при изолированном и комбинированном действии поражающих факторов. В дальнейшем вводятся в рассмотрение наиболее полные и интегральные показатели опасности техногенной аварии и на основе дается наиболее полная характеристика последствий аварии: закон распределения случайной величины ущерба, из которого следуют критерии опасности аварии: математическое ожидание ущерба и гарантированный ущерб.*

**Ключевые слова:** опасность, поражающий фактор, изолированное и комбинированное действие, факторные, факторно–временные, обобщенные факторно–временные законы поражения, количественные показатели опасности, количественные показатели последствий.

**THEORETICAL ASPECTS OF JUSTIFICATION OF QUANTITATIVE INDICATORS  
OF POTENTIALLY HAZARDOUS ACCIDENTS HAZARDS  
INDUSTRIAL OBJECTS**

**Dr. (Tech.) *V.I. Gumenyuk***

**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**

**Dr. (Tech.) *A.M. Karmishin***

**Central Research Institute of Chemistry and Mechanics**

**Ph.D. (Tech.) *M.L. Makarov***

**«27th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation»**

*Three interrelated levels of generalization (description) of the risk of man-made accidents (catastrophes) of potentially hazardous industrial facilities are considered. At each level of generalization, modern ideas are presented that allow theoretical calculations to be made. Methods are described for describing the probability of damage to a population not lower than a given severity with isolated and combined effects of damaging factors. In the future, the most*

*complete and integral indicators of the risk of a technogenic accident are introduced into consideration and on the basis of the most complete description of the consequences of the accident is given: the distribution law of the random damage magnitude from which the accident hazard criteria follow: mathematical expectation of damage and guaranteed damage.*

**Keywords:** danger, damaging factor, isolated and combined action, factor, factor-time, generalized factor-time laws of damage, quantitative indicators of danger, quantitative indicators of consequences.

Анализ применяемых в настоящее время показателей опасности техногенных аварий на различных уровнях обобщения показывает, что только на первом уровне (уровень промышленного объекта) существуют различные подходы для оценивания опасности промышленных объектов [1, 2].

Один из них связан с так называемой концепцией риска, в рамках которой применяются такие показатели как индивидуальный, потенциальный территориальный, коллективный и т.д. риски, которые сами по себе уже являются сложными показателями, не учитывающими многие аспекты реализации опасности промышленных аспектов [3].

Другой подход, основан на том, что в общем случае, опасность (поражающее действие аварий) потенциально опасных промышленных объектов, а особенно химически, биологически и радиационно-опасных, реализуется не только в пространстве, но и во времени, причем в заданной точке пространства время наступления и длительность сохранения эффектов поражения коррелируют с величиной действующего в этой точке поражающего фактора. В связи с этим показатели опасности промышленных объектов должны непосредственно характеризовать эти два свойства потенциально опасного промышленного объекта. Используя идеи квалиметрии, к настоящему времени обоснованы пространственно-временные показатели опасности техногенных аварий, и разработаны методы их теоретического оценивания [1, 4 – 6].

Опасностью техногенных аварий называются потенциально возможные или реализованные потери населения и персонала промышленного объекта при техногенной аварии на нем.

Для систематизации рассматриваемого вопроса необходимо отметить, что опасность техногенных аварий (катастроф) должна изучаться и описываться на трех уровнях обобщения:

- уровень поражающего фактора (факторов), образующихся при том или ином механизме развития техногенной аварии;
- уровень количественных показателей опасности конкретного сценария развития техногенной аварии;
- уровень последствий техногенной аварии (катастрофы) потенциально опасного промышленного объекта.

Коротко рассмотрим самый низший уровень обобщения опасности техногенной аварии – уровень поражающего фактора (факторов).

При анализе возможных механизмов развития техногенной аварии должны быть обоснованы образующиеся поражающие факторы и количественные характеристики аварии: мощность взрыва для взрывоопасных объектов, количество выбрасываемого токсичного химического вещества (активность и радионуклидный состав выбрасываемых радиоактивных веществ), скорость выброса, высота выброса и т.д. [2]. Для каждого фактора, продуцируемого при том или ином механизме развития аварии, должны быть определены количественные характеристики, непосредственно определяющие его поражающее действие на различные элементарные объекты: персонал промышленного объекта и население (дети, взрослые и пожилые), однотипные здания, строения, объекты инфраструктуры, оборудование промышленного объекта и т.п. Так, основной количест-

венной характеристикой, определяющей поражающее действие токсичных химических веществ на человека является токсическая доза  $D$ , ионизирующих излучений – поглощенная доза излучения  $D$ , тепловой импульс  $u$  и теплового излучения, избыточное давление во фронте воздушной ударной волны  $\Delta P_\phi$  и длительность фазы сжатия  $\tau^+$  и т.д.

Для каждого элементарного объекта должны быть установлены параметры факторных законов поражения, описывающих вероятность наступления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести поражения (для населения и персонала), разрушения (здания, строения, сооружения, объекты инфраструктуры), повреждения (оборудование промышленного объекта) при изолированном и комбинированном действии поражающих факторов техногенной аварии.

Под изолированным понимается действие только одного поражающего фактора, а под комбинированным – одновременное или последовательное действие нескольких поражающих факторов [7].

Из экспериментальных данных известно, что процессы поражения (разрушения, повреждения) различных элементарных объектов являются стохастическими.

В настоящее время имеются различные подходы для описания вероятности наступления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести с учетом времени ее наступления и длительности сохранения (для обратимых эффектов поражения) или только с учетом времени ее наступления (для необратимых эффектов поражения). Однако строго задача описания вероятности поражения не ниже заданной степени тяжести к моменту времени  $t$  после действия поражающего фактора на продолжительность не менее  $\tau$ , была решена относительно недавно, в 2007 г. и впервые опубликована в [8]. Как известно, величина поражающего фактора, например, токсодоза  $D$ , вызывающая заданную степень тяжести поражения, время ее наступления  $t$  и длительность сохранения  $\tau$ , являются непрерывными коррелированными случайными величинами с соответствующей трехмерной плотностью распределения  $f(\tilde{D}, \tilde{t}, \tilde{\tau})$ . Рассматривая пространство из восьми несовместных событий, образующих полную группу, в [8], было показано, что вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести к моменту времени  $t$  на продолжительность  $\tau$  не менее заданной или, другими словами, так называемый обобщенный факторно-временной закон поражения, может быть определена следующим

$$P = \int_0^D \int_0^t \int_\tau^\infty f(\tilde{D}, \tilde{t}, \tilde{\tau}) d\tilde{D} d\tilde{t} d\tilde{\tau}, \quad (1)$$

где  $f(\tilde{D}, \tilde{t}, \tilde{\tau})$  – трехмерная логарифмически нормальная плотность распределения случайных величин токсодозы (экспозиционной дозы  $CT$ ), вызывающей заданный эффект поражения  $\tilde{D}$ , времени его наступления  $\tilde{t}$  и продолжительности сохранения  $\tilde{\tau}$ , имеющая 9 параметров, которые в терминах токсикологии называются токсикологическими характеристиками вещества.

Если время наступления эффектов поражения не рассматривается, то, положив в уравнении (1)  $t=\infty$ , получим один из видов факторно-временного закона поражения, описывающего вероятность наступления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести на продолжительность  $\tau$ , не менее заданной [7].

$$P = \int_0^D \int_\tau^\infty f(\tilde{D}, \tilde{\tau}) d\tilde{D} d\tilde{\tau}. \quad (2)$$

Такая ситуация характерна для поражающего действия осколков разрушенных конструкций технологического оборудования, пуль, готовых поражающих элементов (при террористических актах с использованием самодельных взрывных устройств), при действии воздушной ударной волны, образующейся при взрывах различной природы, теплового и светового излучения и т.п. Вместо токсодозы  $D$  в уравнении (2) в данном случае необходимо использовать соответствующую количественную характеристику поражающего фактора, например, скорость  $V$  встречи поражающего элемента с телом человека, тепловой импульс  $u$  при пожаре, избыточное давление во фронте воздушной ударной волны при взрывах  $\Delta P_{\phi}$  и т.д.

Если же в обобщенном факторно-временном законе поражения не рассматривается длительность сохранения эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести, что характерно для необратимых эффектов поражения, то, положив  $\tau=0$ , будем иметь другой вид факторно-временного закона поражения, впервые опубликованного в [8 – 10]

$$P = \int_0^D \int_0^t f(\tilde{D}, \tilde{t}) d\tilde{D} d\tilde{t}, \quad (3)$$

Если в обобщенном факторно-временном законе поражения не рассматриваются временные характеристики реализации поражающего действия того или иного поражающего фактора, то положив в нем  $t=\infty$  и  $\tau=0$ , получим факторный закон поражения [7]

$$P = \int_0^D f(\tilde{D}) d\tilde{D}. \quad (4)$$

Таким образом, ОФВЗП (1) является общим интегральным представлением закона поражения элементарного объекта при изолированном действии на него поражающего фактора, из которого следуют частные случаи общих интегральных представлений закона поражения (2) - (4).

В настоящее время факторный закон поражения (4) часто описывается ступенчатыми функциями, так называемый критериальный подход [11, 12], линейными [13, 14], логистическими [13], распределением Вейбулла [11, 13], нормальным законом и логарифмически нормальным законом [7 – 10].

Для определения конкретного вида функций плотности распределения вероятностей случайных величин уравнений (1) - (4) необходимо отметить следующее. В теории вероятностей известен многомерный нормальный закон, который, в теоретическом плане не может использоваться для описания факторных законов поражения при изолированном и комбинированном действии поражающих факторов техногенных аварий. Это связано с тем, что функция плотности случайной величины поражающего фактора, вызывающего заданную степень тяжести поражения (так же как и время ее наступления и длительность сохранения) должна иметь область определения  $[0; +\infty]$ , а нормальный закон распределения случайной величины, имеет область определения  $[-\infty; +\infty]$ . Распределение Вейбулла, широко применяемое на практике для описания факторных законов поражения при изолированном действии поражающих факторов, в теоретическом плане так же не может быть использовано, так как многомерные распределения Вейбулла или какие либо другие, из которых бы следовала безусловная плотность распределения одной случайной величины, неизвестны. Именно поэтому факторный закон поражения (4) в виде распределения Вейбулла не следует из ОФВЗП (1), и может рассматриваться лишь как некоторое эмпирическое приближение.

В [8, 15] показано, что из ОФВЗП (1) будут следовать его частные случаи, приводящие к известным, установленным ранее результатам, если в качестве многомерных плотностей распределения использовать многомерную логарифмически нормальную плотность распределения, которая была разработана в [7].

Так как изолированное действие поражающего фактора является частным случаем комбинированного действия, то сделанные выводы полностью распространяются и на комбинированное действие поражающих факторов.

В [7], рассматривая пространство четырех несовместных событий, образующих полную группу, впервые было показано, что при комбинированном действии двух поражающих факторов (на примере токсичных химических веществ при авариях химически опасных объектов) вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести определяется следующим образом

$$P = 1 - \int_{D_1}^{\infty} \int_{D_2}^{\infty} f(\tilde{D}_1, \tilde{D}_2) d\tilde{D}_1 d\tilde{D}_2, \quad (5)$$

где  $P$  – вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести;

$\tilde{D}_1$  и  $\tilde{D}_2$  – случайные величины токсодоз первого и второго веществ (количественные характеристики двух поражающих факторов), вызывающих при их комбинированном действии поражение заданной степени тяжести;

$f(\tilde{D}_1, \tilde{D}_2)$  – двумерная логарифмически нормальная плотность распределения коррелированных непрерывных случайных величин токсодоз первого и второго токсичных химических веществ), вызывающих при комбинированном действии веществ поражения заданной степени тяжести;

$D_1$  и  $D_2$  – действующие токсодозы веществ первого и второго веществ.

При комбинированном действии  $n$  веществ ( $n$  поражающих факторов), можно записать следующее общее интегральное представление вероятности поражений не ниже заданной степени тяжести:

$$P = 1 - \int_{D_1}^{\infty} \dots \int_{D_n}^{\infty} f(\tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n) d\tilde{D}_1 \dots d\tilde{D}_n, \quad (6)$$

где  $f(\tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n)$  –  $n$ -мерная логарифмически нормальная плотность распределения коррелированных непрерывных случайных величин токсодоз 1-го, 2-го...  $n$ -го токсичного химического вещества, вызывающих заданную степень тяжести поражения;

$D_1, \dots, D_n$  – действующие токсодозы 1-го, 2-го...  $n$ -го токсичного химического вещества.

С учетом времени наступления эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести факторно-временной закон поражения при комбинированном действии двух токсичных химических веществ (двух поражающих факторов аварии) записывается следующим образом [16]

$$P = P_m - \int_{D_1}^{\infty} \int_{D_2}^{\infty} \int_0^t \int_0^t f(\tilde{D}_1, \tilde{D}_2, \tilde{t}_1, \tilde{t}_2) d\tilde{D}_1 d\tilde{D}_2 d\tilde{t}_1 d\tilde{t}_2, \quad (7)$$

где  $P_m$  – максимально возможная вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести к моменту времени  $t$

$$P_m = \int_0^t \int_0^t f(\tilde{t}_1, \tilde{t}_2) d\tilde{t}_1 d\tilde{t}_2, \quad (8)$$

$f(\tilde{D}_1, \tilde{D}_2, \tilde{t}_1, \tilde{t}_2)$  – четырехмерная логарифмически нормальная плотность распределения случайных величин токсодоз первого и второго вещества, вызывающих при их комбинированном действии веществ поражения заданной степени тяжести и времени наступления  $t_1$  и  $t_2$  от каждого из действующих веществ.

Обобщенный факторно–временной закон поражения при комбинированном действии двух веществ записывается следующим образом [16]

$$P = P_m - \int_{D_1}^{\infty} \int_{D_2}^{\infty} \int_0^t \int_0^t \int_{\tau_1}^{\infty} \int_{\tau_2}^{\infty} f(\tilde{D}_1, \tilde{D}_2, \tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2) d\tilde{D}_1 d\tilde{D}_2 d\tilde{t}_1 d\tilde{t}_2 d\tilde{\tau}_1 d\tilde{\tau}_2, \quad (9)$$

где  $P_m$  – максимально возможная вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести к моменту времени  $t$

$$P_m = \int_0^t \int_0^t \int_{\tau}^{\infty} \int_{\tau}^{\infty} f(\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2) d\tilde{t}_1 d\tilde{t}_2 d\tilde{\tau}_1 d\tilde{\tau}_2, \quad (10)$$

Обобщая изложенное выше, можно записать интегральные представления факторно-временного и обобщенного факторно-временного законов поражения  $n$  поражающих факторов [16]:

$$P = P_m - \int_{D_1}^{\infty} \dots \int_{D_n}^{\infty} \int_0^t \dots \int_0^t f(\tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n, \tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_n) d\tilde{D}_1 \dots d\tilde{D}_n d\tilde{t}_1 \dots d\tilde{t}_n, \quad (11)$$

где  $P_m$  – максимально возможная вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести к моменту времени  $t$

$$P_m = \int_0^t \dots \int_0^t f(\tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_n) d\tilde{t}_1 \dots d\tilde{t}_n, \quad (12)$$

и

$$P = P_m - \int_{D_1}^{\infty} \dots \int_{D_n}^{\infty} \int_0^t \dots \int_0^t \int_{\tau}^{\infty} \dots \int_{\tau}^{\infty} f(\tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n, \tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_n, \tilde{\tau}_1, \dots, \tilde{\tau}_n) d\tilde{D}_1 \dots d\tilde{D}_n d\tilde{t}_1 \dots d\tilde{t}_n d\tilde{\tau}_1 \dots d\tilde{\tau}_n, \quad (13)$$

где  $P_m$  – максимально возможная вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести к моменту времени  $t$

$$P_m = \int_0^t \dots \int_0^t \int_{\tau}^{\infty} \dots \int_{\tau}^{\infty} f(\tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_n, \tilde{\tau}_1, \dots, \tilde{\tau}_n) d\tilde{t}_1 \dots d\tilde{t}_n d\tilde{\tau}_1 \dots d\tilde{\tau}_n. \quad (14)$$

Если при комбинированном действии поражающих факторов поражающее действие реализуется мгновенно, то в обобщенном факторно-временном законе поражения необходимо положить  $t=\infty$ , тогда получим следующее представление факторно-временного закона поражения при комбинированном действии  $n$  поражающих факторов

$$P = P_m - \int_{D_1}^{\infty} \dots \int_{D_n}^{\infty} \int_{\tau}^{\infty} \dots \int_{\tau}^{\infty} f(\tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n, \tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_n, \tilde{\tau}_1, \dots, \tilde{\tau}_n) d\tilde{D}_1 \dots d\tilde{D}_n d\tilde{\tau}_1 \dots d\tilde{\tau}_n, \quad (15)$$

где  $P_m$  – максимально возможная вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести к моменту времени  $t$

$$P_m = \int_{\tau}^{\infty} \dots \int_{\tau}^{\infty} f(\tilde{\tau}_1, \dots, \tilde{\tau}_n) d\tilde{\tau}_1 \dots d\tilde{\tau}_n. \quad (16)$$

Для необратимых эффектов поражения ( $\tau=0$ ), поэтому будем иметь другой вид факторно-временного закона поражения

$$P = P_m - \int_{D_1}^{\infty} \dots \int_{D_n}^{\infty} \int_0^t \dots \int_0^t f(\tilde{D}_1, \dots, \tilde{D}_n, \tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_n) d\tilde{D}_1 \dots d\tilde{D}_n d\tilde{t}_1 \dots d\tilde{t}_n, \quad (17)$$

где  $P_m$  – максимально возможная вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести к моменту времени  $t$

$$P_m = \int_0^t \dots \int_0^t f(\tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_n) d\tilde{t}_1 \dots d\tilde{t}_n. \quad (14)$$

Отметим еще раз, что вместо токсодозы  $D$  токсичного химического вещества в рассмотренных законах поражения должна стоять соответствующая количественная характеристика того или иного поражающего фактора, определяющая его поражающее действие.

В рассмотренных факторных, факторно-временных и обобщенных факторно-временных законах поражения при изолированном и комбинированном действии поражающих факторов используется  $n$ -мерная логарифмически нормальная плотность распределения, которая имеет

$$\frac{n(n+3)}{2}$$

параметров [7], где  $n$  – количество рассматриваемых физических случайных величин (действующие величины поражающих факторов, времена наступления рассматриваемых эффектов поражения, длительность их сохранения):

$n$  медианных значений случайных величин поражающих факторов, вызывающих заданную степень тяжести поражения, например,  $PD_{50}$ ,  $LCt_{50}$ ,  $u_{50}$ ,  $\Delta P\phi_{50}$ ,  $Lt_{50}$ ,  $I\tau_{50}$  и т.д.;

$n$  средних квадратических отклонений натуральных логарифмов случайных величин поражающих факторов, вызывающих заданную степень тяжести поражения, времени ее наступления и длительности сохранения:  $\sigma_{\ln D}$ ,  $\sigma_{\ln t}$ ,  $\sigma_{\ln \tau}$ ,  $\sigma_{\ln u}$ ,  $\sigma_{\ln \Delta P\phi_{50}}$  и т.д.

$\frac{n(n-1)}{2}$  попарных коэффициентов корреляции натуральных логарифмов рассматриваемых случайных величин:  $r_{\ln D \ln t}$ ,  $r_{\ln D \ln \tau}$ ,  $r_{\ln t \ln \tau}$  и т.д.

В качестве примера рассмотрим параметры обобщенного факторно-временного закона поражения при изолированном действии токсичного химического вещества, то есть другими словами определим полный перечень необходимых токсикологических характеристик вещества. В данном случае будем иметь закон распределения трех коррелированных непрерывных случайных величин: токсодозы  $D$ , вызывающей заданный эффект поражения, времени  $t$  его наступления и длительности сохранения  $\tau$ . В связи с этим ОФВЗП будет иметь  $3(3+3)/2=9$  параметров, которые применительно к токсикологии называются токсикологическими характеристиками [8, 15, 17]:

$D_{50}$  ( $PD_{50}$ ,  $ED_{50}$ ,  $ID_{50}$ ) – медианная токсодоза, вызывающая заданную степень тяжести поражения;

$t_{50}$  ( $Pt_{50}$ ,  $Et_{50}$ ,  $It_{50}$ ) медианное время наступления и медианная длительность сохранения  $\tau_{50}$  ( $P\tau_{50}$ ,  $E\tau_{50}$ ,  $I\tau_{50}$ );

средние квадратические отклонения натуральных логарифмов случайной величины токсодозы, вызывающей заданную степень тяжести поражения,  $\sigma_{\ln D}$ , времени ее наступления  $\sigma_{\ln t}$  и длительности сохранения  $\sigma_{\ln \tau}$ ;

$r_{\ln D \ln t}$ ,  $r_{\ln D \ln \tau}$ ,  $r_{\ln t \ln \tau}$  – коэффициенты корреляции натуральных логарифмов случайных величин, токсодозы, вызывающей заданный эффект поражения и времени его наступления; токсодозы, вызывающей заданный эффект поражения и длительности его сохранения; времени наступления и длительности сохранения заданных эффектов поражения.

Обоснованием факторных, факторно-временных и обобщенных факторно-временных законов поражения различных элементарных объектов завершается первый этап описания опасности техногенных аварий.

Второй уровень обобщения. Рассмотренные факторные законы поражения позволяют получить наиболее полный показатель поражающего действия техногенной аварии: координатный закон поражения, для чего необходимо поле поражающего фактора (поражающих факторов) перевести в соответствующую вероятность поражения не ниже заданной степени тяжести посредством того или иного факторного закона поражения [2]. Однако на практике координатными законами поражения пользоваться для принятия решений для обоснования системы защиты населения и персонала от поражающего действия техногенных аварий, а также ранжирования потенциально опасных промышленных объектов по уровню опасности очень неудобно, поэтому в рассмотрение были введены наиболее полные и интегральные пространственно–временные показатели опасности.

В [13, 19] была сформулирована и решена следующая постановка задачи.

Пусть при техногенной аварии формируется неравномерное поле поражающего фактора, например, экспозиционных доз  $CT(x,y)$  при авариях на химически опасных объектах с выбросом токсичных химических веществ в окружающую среду. В пределах общей площади поражающего действия аварии  $S_n$  население распределено с некоторой плотностью  $q(x,y)=q(S)$ ,  $m^{-2}$ . Известно, что при действии заданной экспозиционной дозы  $CT$  (токсоэффекта  $T$ ) времена проявления эффектов поражения заданной степени тяжести ( $t$ ) и длительность их сохранения ( $\tau$ ) являются непрерывными случайными величинами с условной совместной логарифмически нормальной плотностью распределения  $f(\tilde{t}, \tilde{\tau}, T)$ , причем параметры этой плотности распределения:  $\theta_{50}$  – быстроедействие (медианное



время проявления эффектов поражения заданной степени тяжести) и  $\eta_{50}$  – последствие (медианное время сохранения эффектов поражения заданной степени тяжести) зависят от действующей экспозиционной дозы (токсоэффекта) [20, 7, 8, 15]. Необходимо найти закон распределения случайного времени наступления и, в общем случае, длительности сохранения эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести силы у населения  $f(\tilde{t}, \tilde{\tau})$  или  $F(t, \tau)$  на всей площади поражающего действия аварии.

Интегральная функция распределения случайного времени наступления и длительности сохранения эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести имеет следующий вид (проф. Кармишин А.М., 2010 г.) [4 – 6, 13, 19]:

$$F(t, \tau) = \int_0^t \int_0^\tau \frac{\int_0^{S_n} P(T)q(S)f(\tilde{t}, \tilde{\tau}, T)dS(T)}{\int_0^{S_n} P(T)q(S)dS(T)} d\tilde{t}d\tilde{\tau}. \quad (15)$$

В декартовых координатах интегральная функция распределения случайного времени наступления и длительности сохранения эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести записывается следующим образом (так как интегралы, входящие в выражение (15) сходятся, то общую площадь поражающего действия аварии для удобства записи можно заменить бесконечной плоскостью):

$$F(t, \tau) = \int_0^t \int_0^\tau \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P[T(x, y)]q(x, y)f(\tilde{t}, \tilde{\tau}, T)dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P[T(x, y)]q(x, y)dx dy} d\tilde{t}d\tilde{\tau}. \quad (16)$$

Интегральная функция распределения  $F(t, \tau)$ , по определению, описывает вероятность того, что случайные времена наступления и длительности сохранения рассматриваемых эффектов поражения будут меньше некоторых времен  $t$  и  $\tau$  соответственно.

Если рассматриваются необратимые (летальные) эффекты поражения, то соотношения (15) и (16) несколько упрощаются:

$$F(t, \tau) = \int_0^t \frac{\int_0^{S_n} P(T)q(S)f(\tilde{t}, T)dS(T)}{\int_0^{S_n} P(T)q(S)dS(T)} d\tilde{t}$$

или

$$F(t, \tau) = \int_0^t \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P[T(x, y)]q(x, y)f(\tilde{t}, T)dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P[T(x, y)]q(x, y)dx dy} d\tilde{t}. \quad (17)$$

Соотношения (15) и (16) и их частный случай (17) можно рассматривать как общее интегральное решение задачи о законе распределения случайных времен наступления и длительности сохранения у населения рассматриваемых эффектов поражения на всем поле поражающего действия техногенной аварии.

Полученное общее интегральное решение закона распределения случайных времен наступления и длительности сохранения у населения (персонала объекта) эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести, позволяет ввести в рассмотрение наиболее полные и интегральные пространственно-временные показатели опасности техногенной аварии и их частные случаи: пространственные и временные показатели опасности аварии.

С точки зрения оказания помощи пораженному населению, необходимо знать долю населения, у которого рассматриваемые эффекты поражения наступили к моменту времени  $t$  и сохраняются на продолжительность не менее  $\tau$ . Исходя из закона (16) эта вероятность может быть найдена следующим образом:

$$F(t, \tau) = \int_0^t \int_\tau^\infty \frac{\int_0^{S_n} P(T)q(S)f(\tilde{t}, \tilde{\tau}, T)dS(T)}{\int_0^{S_n} P(T)q(S)dS(T)} d\tilde{t}d\tilde{\tau}$$

или

$$F(t, \tau) = \int_0^t \int_\tau^\infty \frac{\int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty P[T(x, y)]q(x, y)f(\tilde{t}, \tilde{\tau}, T)dx dy}{\int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty P[T(x, y)]q(x, y)dx dy} d\tilde{t}d\tilde{\tau}. \quad (18)$$

Обычно при анализе опасности техногенных аварий принимается равномерное распределение населения в пределах общей площади ее поражающего действия

$$q(S) = \frac{1}{S_n}.$$

При таком допущении соотношение (18) примет следующий вид

$$P(t, \tau) = \int_0^t \int_\tau^\infty \frac{\int_0^{S_n} P(T)f(\tilde{t}, \tilde{\tau}, T)dS(T)}{S_0} d\tilde{t}d\tilde{\tau}, \quad (19)$$

где  $S_0$  – приведенная зона поражения [4 –6, 13, 19, 20, 21]

$$S_0 = \int_0^{S_n} P(T)q(S)dS(T).$$

Отметим, что подынтегральное выражение в двойном интеграле (18) есть плотность распределения случайных величин  $\tilde{t}$  и  $\tilde{\tau}$  на всей площади поражающего действия аварии, поэтому при  $t \rightarrow \infty$ ,  $\tau \rightarrow 0$   $P(t, \tau)$  будет стремиться к единице по определению. В связи с этим тройной интеграл в выражении (19) будет равен приведенной зоне поражения без учета времени наступления и длительности сохранения требуемых эффектов поражения, то есть

$$S_0 = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{S_n} P(T) f(\tilde{t}, \tilde{\tau}, T) dS(T) d\tilde{t} d\tilde{\tau}. \quad (20)$$

Из проведенного анализа общего интегрального решения (19) следует приведенная зона поражений, наступающих к заданному моменту времени  $t$  на продолжительность не менее  $\tau$

$$P(t, \tau) S_0 = S_0(t, \tau) = \int_0^t \int_\tau^\infty \int_0^{S_n} P(T) f(\tilde{t}, \tilde{\tau}, T) dS(T) d\tilde{t} d\tilde{\tau}. \quad (21)$$

Если соотношение (21) переписать несколько в ином виде, то получим обычное соотношение между приведенной зоной поражения и координатным законом поражения  $G(x, y)$ :

$$S_0(t, \tau) = \int_0^{S_n} \left( \int_0^t \int_\tau^\infty P(T) f(\tilde{t}, \tilde{\tau}, T) d\tilde{t} d\tilde{\tau} \right) dS(T) = \int_0^{S_n} G_{tr}(S) dS(T) = \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_0^{S_n} G_{tr}(x, y) dx dy, \quad (22)$$

где  $G_{tr}(x, y)$  – координатный закон поражений, наступающих к заданному моменту времени  $t$  на продолжительность не менее  $\tau$ .

Подводя промежуточный итог проведенного анализа можно, с позиций квалиметрии, сформулировать следующие выводы.

Наиболее полным пространственно-временным показателем опасности техногенной аварии является координатный закон поражений, наступающих к заданному моменту времени  $t$  на продолжительность  $\tau$ , не менее заданной –  $G_{tr}(x, y)$ .

Интегральным пространственно-временным показателем опасности техногенной аварии является приведенная зона поражений с учетом требуемых (заданных) времен наступления и длительности сохранения рассматриваемых эффектов поражения –  $S_0(t, \tau)$ .

Соответствующие показатели, без учета временных характеристик реализации поражающего действия аварии, являются частным случаем рассмотренных и могут рассматриваться как наиболее полный и интегральный пространственные показатели опасности техногенной аварии, то есть являются частным случаем пространственно-временных показателей опасности.

Рассмотрим теперь наиболее полные и интегральные временные показатели опасности техногенных аварий, которые также являются частным случаем пространственно-временных показателей опасности.

Если в соотношении (19) положить  $\tau = 0$ , то есть не рассматривать длительность сохранения эффектов поражения, то получим следующее выражение

$$P(t) = \frac{1}{S_0} \int_0^t \int_0^{S_n} P(T) f(\tilde{t}, T) dS(T) d\tilde{t}, \quad (23)$$

описывающее долю населения, получившего поражения, у которой эффекты поражения не ниже заданной степени тяжести наступили к моменту времени  $t$ .

С точки зрения теории вероятностей выражение (23) является интегральной функцией распределения случайного времени наступления у населения эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести, то есть описывает динамику проявления у населения эффектов поражения.

Соотношению (12) можно дать и другую трактовку. Анализ размерности двойного интеграла в этом соотношении показывает, что он имеет размерность площади и при  $t \rightarrow \infty$  этот двойной интеграл стремится к приведенной зоне поражения  $S_0$ . Обозначая

$$S_0(t) = \int_0^t \int_0^{S_n} P(T) f(\tilde{t}, T) dS(T) d\tilde{t}$$

и рассматривая его как приведенную зону поражения, сформировавшуюся к моменту времени  $t$ , соотношение (12) можно записать следующим образом:

$$G(t) = \frac{S_0(t)}{S_0}. \quad (24)$$

В прикладном смысле функция  $G(t)$  называется динамикой формирования приведенной зоны поражения.

По аналогии, если в соотношении (19) положить  $t = \infty$ , то есть не рассматривать время наступления эффектов поражения, то получим следующее выражение

$$P(\tau) = \frac{1}{S_0} \int_\tau^\infty \int_0^{S_n} P(T) f(\tilde{\tau}, T) dS(T) d\tilde{\tau}, \quad (25)$$

описывающее долю населения, получившего в результате аварии поражения, у которой эффекты поражения не ниже заданной степени тяжести сохраняются продолжительность времени не менее  $\tau$ .

Обозначая

$$S_0(\tau) = \int_\tau^\infty \int_0^{S_n} P(T) f(\tilde{\tau}, T) dS(T) d\tilde{\tau}$$

и рассматривая его как приведенную зону поражений, сохраняющихся продолжительность не менее  $\tau$ , соотношение (14) можно записать следующим образом

$$G(\tau) = \frac{S_0(\tau)}{S_0}. \quad (26)$$

В прикладном смысле функция  $G(\tau)$  называется динамикой сохранения приведенной зоны поражения.

В некотором смысле функции  $G(t)$  и  $G(\tau)$  является временными аналогами наиболее полного пространственного показателя опасности техногенной аварии – координатного закона поражения.

С точки зрения квалиметрии динамика формирования  $G(t)$  и динамика сохранения  $G(\tau)$  приведенной зоны поражения являются наиболее полными временными показателями опасности техногенной аварии.

Учитывая взаимосвязь координатного закона поражения и приведенной зоны поражения, в рассмотрение можно ввести интегральные временные показатели опасности техногенной аварии.

Так как приведенную зону поражения можно рассматривать как одну из числовых характеристик координатного закона поражения: нулевой начальный момент

$$S_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^0 y^0 G(x, y) dx dy,$$

то можно ввести в рассмотрение и числовые характеристики случайного времени наступления и длительности сохранения эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести.

Начальный момент порядка  $\alpha$  функции  $G(t)$  не существует, так как интеграл

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

является расходящимся.

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

$$m_{\alpha} = \int_0^{\infty} t^{\alpha} [1-G(t)] dt. \quad (27)$$

Тогда при  $\alpha = 0$  будем иметь нулевой начальный момент, который имеет специальные обозначение  $t_0$  и название – приведенное время непоражения

$$t_0 = \int_0^{\infty} [1-G(t)] dt. \quad (28)$$

Рассуждая аналогично, можно ввести в рассмотрение приведенное время сохранения эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести  $\tau_0$

$$\tau_0 = \int_0^{\infty} G(\tau) d\tau. \quad (29)$$

Исходя из выражения (27) под приведенным временем непоражения понимается условное время, в течение которого поражения не ниже заданной степени тяжести у пораженного населения не проявятся с вероятностью, равной единице [4 – 6, 13, 19].

Под приведенным временем сохранения эффектов поражения не ниже заданной степени тяжести понимается условное время, в течение которого поражения не ниже заданной степени тяжести у пораженного населения сохраняются с вероятностью, равной единице.

Рассмотренные показатели опасности, в отличие от концепции риска, на количественном уровне характеризуют реализацию поражающего действия аварии в пространстве и времени.

Третий уровень обобщения. Третий уровень обобщения связан с описанием последствий техногенной аварии. Как известно, в силу объективных причин количество пораженного населения при аварии является дискретной случайной величиной, поэтому наиболее полной характеристикой последствий техногенной аварии является закон распределения случайной величины ущерба (потерь) населения и персонала. В [22] показано, что эта дискретная случайная величина имеет биномиальное распределение. Вероятность того, что ровно  $K$  человек и  $N$  человек, на которых подействовали поражающие факторы аварии, получают поражение не ниже заданной степени тяжести, равна:

$$P_{K/N} = C_N^K G^K (1-G)^{N-K}, \quad (30)$$

где  $G$  – полная вероятность поражения человека

$$G = \iint_{S_n} g(x, y) g(x, y) dx dy, \quad (31)$$

$g(x, y)$  – плотность распределения координат нахождения населения в пределах площади поражающего действия аварии.

Вероятность того, что будет поражено менее  $K$  элементарных объектов, то есть функция распределения ущерба при техногенной аварии, с учетом соотношения (30), составит:

$$F_{K/N} = \sum_{i=0}^{K-1} C_N^i G^i (1-G)^{N-i}, \quad (32)$$

а вероятность того, что количество пораженных, у которых наступят поражения не ниже заданной степени тяжести, будет не меньше  $K$ , находится следующим образом:

$$F_{>K/N} = \sum_{i=K}^N C_N^i G^i (1-G)^{N-i} = 1 - \sum_{i=0}^{K-1} C_N^i G^i (1-G)^{N-i}, \quad (33)$$

где  $C_N^i$  – число сочетаний  $i$  по  $N$ ,

$$C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!}.$$

Именно эту вероятность иногда называют  $F-N$  кривая [23], а количество пораженных, соответствующих заданному значению  $F_{>K/N}$  называют гарантированный ущерб (потери).

Исходя из закона распределения случайной величины предотвращенного ущерба, математическое ожидания числа пораженного населения составит

$$M(K) = GN. \quad (34)$$

Таким образом, в настоящей статье рассмотрены теоретические аспекты описания опасности техногенных аварий, основанные на квалиметрическом подходе.

### Литература

1. Кармишин А.М. Проблемные вопросы промышленной безопасности / А.М. Кармишин, В.И. Гуменюк, В.А. Киреев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 2(178) – С. 320–324.
2. Актуальные проблемы оценки пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий / В.Ф. Ефимов [и др.]. // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. VIII науч.-практ. конф. 8 – 10 октября 2008 г. – Санкт-Петербург: УГПС МЧС России. - 2009. – С. 199 – 210.
3. Кармишин А.М. Оценка показателей опасности при авариях взрывоопасных объектов / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин // Сборник материалов X науч.-практ. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Оценка рисков возникновения чрезвычайных ситуаций» 5-6 октября 2010 г. – Москва : Центр «Антистихия». - 2010. – С. 207 – 213.
4. Кармишин А.М. К вопросу о количественных показателях опасности техногенных аварий / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, В.И. Гуменюк // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 2(177). – С. 281–288.
5. К вопросу о промышленной безопасности / А.М. Кармишин [и др.] // Материалы V всероссийского совещания заведующих кафедрами ВУЗОВ по вопросам образования в области обеспечения безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды 30 сентября – 6 октября 2013 г. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2013. – С. 127 – 131.
6. Кармишин А.М. Проблемные вопросы промышленной безопасности / А.М. Кармишин, В.И. Гуменюк, В.А. Киреев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 2(178). – С. 320–324.
7. Кармишин А.М., Киреев В.А. Математические методы фармакологии и токсикологии. Монография. – М.: ВА РХБ защиты. - 2005.– 181 с.
8. Кармишин А.М., Киреев В.А. Математические методы фармакологии и токсикологии. Монография. – М: Imageland Public Relations. - 2008.– 252 с.
9. К вопросу оценки токсичности химически опасных веществ при чрезвычайных ситуациях химической природы / А.М. Кармишин [и др.] // Химическая и биологическая безопасность. Специальный выпуск, посвященный Федеральной целевой программе «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009 – 20014 годы)». ФМБА. – Москва. - 2012. – С. 117 – 121.
10. Токсикологические характеристики физиологически активных веществ / А.М. Кармишин [и др.] // Безопасность в техносфере. – 2012. – № 4. – С. 42 – 46.
11. Физика взрыва : в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. – 3-е изд, переработанное – Москва: Физматлит. - 2004. – 832 с. – 1 т.
12. Гельфанд Б.У. Барометрическое действие взрывов / Б.У. Гельфанд, М.В. Сильников. – Санкт-Петербург: Астерион. - 2006. – 658 с.
13. Селиванов В.В. Оружие нелетального действия: учебник для высших учебных заведений / В. В. Селиванов, Д. П. Левин. — Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2017. — 356 с.
14. Средства поражения и боеприпасы: учебник / А. В. Бабкин [и др.]; Под общ. ред. В. В. Селиванова. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2008. — 984 с.

15. Математические методы фармакологии, токсикологии и радиобиологии. Монография / А.М. Кармишин [и др.]. – 2-е изд. – Москва : ООО «АПР». - 2011. – 330 с.
16. Кармишин А.М. Успехи теоретической токсикологии и фармакологии // Сборник материалов Всероссийской науч.-практ. конф., посвященной 55-летию ФГУП «НИИ ГПЭЧ» ФМБА России 17 февраля 2017 г. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та. - 2017. – С. 68-70.
17. Кармишин А.М. Полный перечень токсикологических характеристик физиологически активных веществ / А.М. Кармишин, А.И. Карнюшкин, В.И. Гуменюк // Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Сборник научных трудов VI Всероссийской науч.-практ. конф. 24 - 26 апреля 2014 г. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та. - 2014. – С. 150 - 158.
18. Кармишин А.М. К вопросу об оценке опасных факторов пожара / А.М. Кармишин [и др.] // Проблемы прогнозирования ЧС. IX НПК 14-15 мая 2009 г. – Москва : Центр «Антистихия». - 2009. – С. 158– 163.
19. Общие интегральные представления показателей опасности техногенных аварий / А.М. Кармишин [и др.] // Безопасность в техносфере. – 2013. – № 6. – С. 38 – 45.
20. Основы промышленной токсикологии / под ред. Н.А.Толоконцева, В.А. Филова. – Л.: Медицина. - 1976. – 304 с.
21. Кармишин А.М. Оценка показателей опасности при авариях взрывоопасных объектов / А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин // Сборник материалов X науч.-практ. конф. Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Оценка рисков возникновения чрезвычайных ситуаций 5 – 6 октября 2010 г. – Москва : Центр «Антистихия». - 2010. – С. 207 – 213 с.
22. Кармишин А.М. О законе распределения случайной величины пораженного населения при техногенной аварии / А.М. Кармишин, В.И. Гуменюк, В.П. Захаров // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт военно-технического образования и безопасности. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та. - 2016. – С. 17 – 20.
23. Риск аварии как оценка нежелательных потерь / А.И. Гражданкин, Д.В. Дегтярев, М.В. Печеркин // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: Труды Международной Научной Школы МА БР–2002 2-5 июля 2002 г. – Санкт-Петербург: Изд-во «Бизнес-Пресса». - 2002 – С. 515-518.

### Сведения об авторах

**Гуменюк Василий Иванович**, профессор Высшей школы техносферной безопасности, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, ул. Политехническая д. 29, Санкт-Петербург, тел. 8(909)5920710, e-mail: vasilij.gumenyuk@mail.ru

**Кармишин Александр Михайлович**, ведущий научный сотрудник ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики», 115487, ул. Нагатинская д. 16а, Москва, тел. 8(495)705-05-90, e-mail: vaxzk8chif@mail.ru

**Макаров Михаил Леонтьевич**, старший научный сотрудник, ФГБУ «27 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации», 105005, пер. Бригадирский д. 13, Москва, тел. 8(495)705-05-90, e-mail: vaxzk8chif@mail.ru