

**«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА
СЕЛИТЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И
РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ»**

Козлитин А.М.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Созданная человеком искусственная среда обитания – техносфера стала проявлять себя как феномен, подчиняющийся объективным, не зависящим от воли людей законам, становясь источником техногенных опасностей, реализуемых в виде поражающих воздействий на человека и экосистемы окружающей природной среды. Высочайшие достижения человеческой цивилизации – прорыв человека в космос, победы над голодом и болезнями, овладение атомной энергией и нанотехнологиями – оборачиваются трагедиями Бхопала и Базеля, утечкой нефти в Мексиканском заливе и ядовитого шлама в Венгрии, бедой Чернобыля и Фукусимы, катастрофой Саяно-Шушенской ГЭС. Как следствие человечество, осознав тот факт, что техногенные аварии и катастрофы – это объективная реальность техносферы, вероятность возникновения которых никогда не равна нулю, как и вероятность экстремальных природных явлений и процессов, вынуждено вести тяжелую борьбу со своими же технологиями, оказавшись перед выбором «быть или не быть» техносферной цивилизации.

В этих условиях одной из ключевых проблем промышленной безопасности становится анализ и количественная оценка риска опасных производственных объектов техносферы и принятие на этой основе научно обоснованных решений по уменьшению и предупреждению возможных аварий. Но для этого необходимо иметь математические модели и соответствующие аналитические методы квантификации риска.

Учитывая тот факт, что в результате реализации опасности нанесенный ущерб складывается из социальных Y_C , материальных Y_M и экологических $Y_Э$ потерь, автором предложена [1,2,3] и используется при расчетах математическая модель интегрированного риска $R(Y_\Sigma)$, как комплексного показателя опасности сложной технической системы, выраженного в едином стоимостном эквиваленте и объединяющего в себе риски социального $R(Y_C)$, материального $R(Y_M)$ и экологического $R(Y_Э)$ ущербов

$$R(Y_\Sigma) = R(Y_C) + R(Y_M) + R(Y_Э). \quad (1)$$

В основу k -й составляющей $R(Y_k)$ интегрированного риска положена формула математического ожидания соответствующих потерь

$$R(Y_k) = \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^m \sum_{s=1}^{\eta} R_{\text{rsk}}(x_i, y_j) \cdot Y_{\text{rsk}}(x_i, y_j). \quad (2)$$

Данная зависимость функционально связывает вероятность реализации неблагоприятного события и ущерб, нанесенный данным неблагоприятным событием.

Ущерб $Y_k(x, y)$, наносимый k -му реципиенту воздействия, зависит от вида реципиента, типа реализуемой r -й опасности на рассматриваемых элементарных площадках территории с ij -координатами, s -й степени поражения реципиента вследствие воздействия поражающего фактора и выражается в едином стоимостном эквиваленте. Для перехода к единому стоимостному эквиваленту для социального ущерба предлагается использовать цену спасения жизни человека (ЦСЖ). Величина ЦСЖ в обобщенном виде обоснована в [1,2,3], как средневзвешенная по наиболее значимым и рисковым областям и сферам жизнедеятельности величина затрат для дополнительного спасения жизни каждого следующего индивидуума.

Потенциальный риск $R(x, y)$, входящий в качестве множителя в уравнение (2), является вероятностной величиной и характеризует потенциал возможной опасности поражения реципиента

на рассматриваемой ij -й элементарной площадке территории при условии возникновения аварийной ситуации на опасном производственном объекте (ОПО). При этом уровень потенциального риска на указанной элементарной площадке, прилегающей к объекту территории, зависит от целого ряда случайных событий, совокупность которых может привести к поражению реципиента. Случайные события разделены на две группы.

Первая группа событий относится к сложной технической системе, то есть потенциально опасному объекту, и характеризует стохастический процесс реализации опасности (бесконтрольное высвобождение энергии или утечка химически опасных веществ). Основным показателем тяжести последствий реализовавшейся опасности является масса вещества (M), участвующая в создании поражающих факторов. Величина массы аварийного выброса на ОПО является случайной величиной и характеризуется соответствующим вероятностным распределением с плотностью $f(M)$.

Вторая группа - характеризует стохастический процесс поражения реципиента на рассматриваемой ij -й элементарной площадке прилегающей к объекту территории при условии возникновения аварийной ситуации на ОПО, и описывается условной вероятностью координатного поражения реципиента $P(\Gamma/M)$.

Основываясь на сказанном, потенциальный риск представлен интегральной формулой полной вероятности, отвечающей существу проблемы анализа потенциальной опасности промышленного объекта и позволяющей рассчитать риск на любой заданной площадке рассматриваемой территории с учетом технологических и технических особенностей, схемных решений, специфики возникновения и развития аварийных ситуаций. В общем случае потенциальный риск выражается следующей зависимостью:

$$R(E) = \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} f(M) \cdot P(\Gamma/M) dM, \quad (3)$$

где $f(M)$ - плотность распределения аварийных выбросов на объекте; $P(\Gamma/M)$ - вероятность поражения реципиента в рассматриваемой точке территории при условии аварийного выброса опасного вещества (определяется координатным законом поражения реципиента); Γ - расстояние от места аварии до рассматриваемой точки территории; M - масса аварийного выброса опасного вещества; $[M_{\min}, M_{\max}]$ - диапазон изменения массы аварийных выбросов на потенциально опасном объекте.

Функция $f(M)$, построенная для различных сценариев аварий с учетом массива данных по вероятности $\|P_{ij}\|$ и массе аварийного выброса $\|M_{ij}\|$, является базовой характеристикой технической системы, определяющей опасность объекта как источника аварийных выбросов. Для определения величин P_{ij} использованы инженерные методы оценки вероятности аварии и методы анализа статистических данных.

Автором разработана, обоснована и практически используется оригинальная методика, позволяющая на основе декомпозиции возможной аварийной ситуации и метода регрессионного анализа определить для рассматриваемой сложной технической системы модель и параметры функции $f(M)$ - технического риска системы. [1,2,3]

На следующем этапе количественной оценки потенциального риска $R(x,y)$ рассматриваются события, связанные с воздействием поражающих факторов аварии на реципиента (человека, материальные объекты, экосистемы) в рассматриваемой ij -й области прилегающей территории. При этом вероятность поражения реципиента в этой области определяется принятым в расчетах параметрическим законом поражения, зависящего от характера процесса и параметров поражающего фактора в рассматриваемой области территории.

Математическая модель и количественная интерпретация параметрического закона поражения определяются природой и конкретным механизмом действия поражающего фактора, а также видом и состоянием реципиента. В работах [1,2,3,4] показано, что задачи оценки последствий воздействия поражающих факторов на реципиента могут быть сведены к моделированию ситуации с помощью трехпараметрического распределения Вейбулла. Выполнен анализ эмпирико-статистических данных о характере воздействия поражающих факторов на человека, технологическое оборудование, здания и сооружения и получены аналитические зависимости параметрических законов поражения

реципиента, в основу которых положено трехпараметрическое распределение Вейбулла. Определены численные значения параметров соответствующих параметрических законов поражения реципиента.[1,2]

Зная параметрический закон поражения человека, мы не можем судить о характере распределения потенциального риска на прилегающей территории. Для оценки последствий аварий необходимо знать, как изменяется вероятность поражения человека по мере удаления от источника опасности, то есть от параметрического закона необходимо перейти к координатному закону поражения человека. Для решения данной задачи использовались математические модели распространения поражающих факторов (дозы D или избыточного давления ΔP_{Φ}) и метод обратных функций распределения. На основе вышесказанного автором получены аналитические зависимости [1,2] для координатных законов токсического и фугасного поражения человека, представленные функциями распределения следующего вида:

а) для токсического поражения

$$P(\Gamma) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < \Gamma \leq \Gamma_{LCt_{100\%}} \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\Psi(\Gamma) - PCt}{\sigma}\right)^{\gamma}\right] & \text{при } \Gamma_{LCt_{100\%}} < \Gamma \leq \Gamma_{PCt}, \end{cases} \quad (4)$$

б) для фугасного поражения

$$F(\Gamma) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{\Delta P_{\max}}{\eta}\right)^{\xi}\right] & \text{при } 0 < \Gamma \leq r_{\text{обл}} \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\Delta P(\Gamma) - \Delta P_{\text{пор}}}{\eta}\right)^{\xi}\right] & \text{при } r_{\text{обл}} < \Gamma \leq \Gamma(\Delta P_{\text{пор}}), \end{cases} \quad (5)$$

где σ , γ , PCt и η , ξ , $\Delta P_{\text{пор}}$ - параметры трехпараметрических законов распределения Вейбулла соответственно для токсического и фугасного поражения [1, 2]; $r_{\text{обл}}$ - радиус облака газопаровоздушной смеси (ГПВС).

В пределах зоны абсолютной смертности $0 > \Gamma \leq \Gamma_{LCt_{100\%}}$, при получении человеком токсодоз $\Psi(\Gamma) \geq LCt_{100\%}$, превышающих абсолютно смертельную для рассматриваемого ядовитого вещества, летальный исход вследствие возможной аварии на ОПО можно считать достоверным событием с вероятностью $P(\Gamma) = 1$.

При взрывах газопарового облака в «открытых», неограниченных пространствах максимальное избыточное давление может изменяться в широких пределах и зависит в значительной степени от вида горючего вещества и режима взрывного превращения облака ГПВС. В этой связи, для координатных законов фугасного поражения человека, вероятности летального исхода $F(\Gamma)$ даже в пределах быстро сторающего газопарового облака (дефлаграция) могут оказаться значительно меньше единицы. Данная особенность координатных законов фугасного поражения человека существенно отличает их от координатных законов токсического поражения.

При решении проблем промышленной безопасности обоснование показателей риска от какого-либо объекта проводится в пределах зоны острых воздействий – круга вероятного поражения (КВП). В качестве КВП при авариях на опасных производственных объектах рассматривается территория, ограниченная изолинией с пороговыми значениями рассматриваемого поражающего фактора (ПФ) для токсодозы PCt , избыточного давления $\Delta P_{\text{пор}}$ или интенсивности теплового излучения $J_{\text{пор}}$.

В этой связи, с учетом того, что при воздействии поражающего фактора на человека существует граничный (пороговый) уровень токсодозы или избыточного давления, ниже которого вероятность летального исхода пренебрежимо мала, в уравнения (4) и (5) введены параметры граничного, порогового воздействия: PCt – пороговая токсодоза для рассматриваемого ядовитого вещества и $\Delta P_{\text{пор}}$ – порог поражения избыточным давлением.

В плане развития теории техногенного риска предложена методология картирования коллективного риска и на ее основе для объектов химических и нефтехимических отраслей промышленности разработана методика, позволяющая на топографической карте получить распределение ожидаемого количества пораженных. Характер изолиний коллективного риска позволяет исследователю видеть наиболее опасные участки территории и, исходя из этого, принимать соответствующие организационные, управленческие и инженерные решения.

Алгоритм разработанной методики картирования рисков можно кратко представить следующей последовательностью: формирование сценариев развития аварий на потенциально опасном объекте → расчет масс аварийных выбросов для каждого сценария → расчет вероятностей реализации рассматриваемых сценариев → определение регрессионной модели развития аварии на объекте (технического риска) → на основе технического риска, параметрических законов поражения человека и детерминированных моделей формирования поля поражающих факторов расчет потенциального риска → картирование потенциального риска → определение матрицы вероятностей нахождения индивидуума в рассматриваемых ij -квадратах территории → расчет индивидуального риска → картирование индивидуального риска → определение матрицы распределения людей по ij -квадратам территории → расчет коллективного риска → картирование коллективного риска.

Характер поля коллективного риска отражает реальную картину ожидаемых последствий возможных аварий на потенциально опасных объектах химической и нефтехимической промышленности. Изолинии коллективного риска позволяют выделить на карте те ij -квадраты территории, где наиболее неблагоприятным образом сочетаются составляющие коллективного риска – вероятность летального исхода в течение года $R(x_i, y_j)$ и численность групп людей $N(x_i, y_j)$, объединенных одинаковыми условиями поражения и временем пребывания с соответствующими вероятностями $P(N, x_i, y_j)$ нахождения данных групп людей в рассматриваемых квадратах. [1,2,4]

На основе выполненных исследований разработаны:

- метод количественной оценки интегрированного риска, основанный на использовании стохастической модели возникновения и развития аварии в сложной технической системе, локальных характеристик степени воздействия поражающих факторов на реципиента в форме координатных и параметрических законов поражения, а также удельных стоимостных характеристик прямых потерь и цены спасения жизни человека;

- метод анализа сложной технической системы как источника аварийных выбросов, позволяющий на основе декомпозиции возможной аварийной ситуации получить распределение вероятностей количества опасного вещества, участвующего в создании поражающих факторов;

- метод картирования индивидуального, потенциального и коллективного риска, позволяющий получить распределение уровней соответствующего риска на рассматриваемой территории с возможностью аддитивного учета любого количества источников потенциальной опасности.

В ходе выполненных исследований показано, что задачи оценки последствий воздействия поражающих факторов на реципиента могут быть сведены к моделированию ситуации с помощью распределения Вейбулла. Выполнен анализ эмпирико-статистических данных о характере воздействия поражающих факторов на человека, технологическое оборудование, здания и сооружения, и получены аналитические зависимости параметрических и координатных законов поражения реципиента, в основу которых положено трехпараметрическое распределение Вейбулла. Определены численные значения параметров соответствующих параметрических и координатных законов поражения реципиента.

Описанные методы количественного анализа риска позволяют получить объективную информацию о степени опасности объекта, ранжировать прилегающую территорию по уровню индивидуального, потенциального и коллективного риска, выявить, при наличии законодательно установленных критериев социального и индивидуального риска, зоны и территории, где уровни риска достигают или превышают значения, при которых необходимо ужесточение контроля или принятие определенных мер по снижению риска и обеспечению безопасности производственного персонала и населения.

Основные результаты выполненных теоретических исследований и разработанные методики внедрены в ОАО «Саратовский НПЗ», ООО «Саратоворгсинтез», ОАО «Казаньоргсинтез», ОАО «Азот» и ОАО «Химпром» (г. Кемерово) для использования при анализе и количественной оценке риска аварий в декларациях промышленной безопасности, в планах локализации и ликвидации

аварийных ситуаций, при разработке паспортов безопасности опасных объектов, при экологической экспертизе возможных неблагоприятных воздействий на окружающую среду и связанных с ними социально-экономических и иных последствий деятельности объекта. Разработанные методы количественной оценки техногенных рисков также используются при проведении занятий по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» для студентов всех специальностей Саратовского государственного технического университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлитин, А.М. Интегрированный риск техногенных систем. Теоретические основы, методы анализа и количественной оценки: монография / Анатолий Козлитин. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2012. 260 с.

2. Козлитин А.М. Теория и методы анализа риска сложных технических систем: монография / А.М. Козлитин. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 200 с.

3. Козлитин А.М. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин. Саратов: СГТУ, 2002. 180 с.

4. Козлитин А.М. Совершенствование методов расчета показателей риска аварий на опасных производственных объектах / А.М. Козлитин // Безопасность труда в промышленности. 2004. №10. С. 35 - 42.

5. Веб-сайт Козлитина А.М. <http://risk-2005.narod.ru> - «Теория и практика анализа техногенных рисков».