

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РИСКА

Кострубицкий А.А.¹, Заворотный А.Г.²

¹Главное управление МЧС России по Донецкой Народной Республике

²Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

Аннотация

В статье проведен анализ и обобщение комплекса организационных и методических подходов к анализу риска чрезвычайных ситуаций техногенного характера и эффективности мероприятий по защите населения от их последствий. Рассмотрены вопросы, связанные с методологией оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Обоснованы методические подходы к оценке интегрированного риска возникновения и развития чрезвычайных ситуаций техногенного характера на опасных производственных объектах (ОПО). Изложены математические подходы при расчете ущерба от последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС). Определен физический смысл экономического эквивалента стоимости жизни среднестатистического человека, представляющий собой сумму среднедушевых располагаемых денежных годовых доходов населения страны в расчете на одного погибшего.

Ключевые слова

защитные мероприятия, интегральный риск, риск, чрезвычайная ситуация, ущерб, оценки эффективности

Введение

Увеличение и техническое усложнение мирового производственного потенциала, рост населения, урбанизация и связанное с этим повышение плотности населения приводят к тому, что влияние аварий, катастроф, стихийных бедствий на социальную среду населения постоянно увеличивается.

Анализ источников опасностей и угроз техногенного характера [1] приводит к выводу, что причинами постоянного увеличения негативного деструктивного влияния чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера являются:

- деятельность человека, направленная на получение различной энергии, развитие промышленных, транспортных, энергетических и других комплексов;
- рост уровня сложности производства с применением новых технологий, требующих высокой концентрации энергии, опасных веществ и оказывающих негативное воздействие на окружающую среду;
- несовершенство производственно-технологического оборудования, транспортных средств, снижение трудовой и технологической дисциплины;
- природные процессы и явления, способные вызвать аварии и катастрофы на производственных объемах.
- нарушения хозяйственных связей и сбои в технологических цепочках, вызывающие остановку производств;

– высокий уровень износа основных производственных средств; накопление вредных отходов производства;

– недостаточность мероприятий, уменьшающих масштабов и риск их возникновения.

Увеличение числа чрезвычайных ситуаций сочетается с растущим социально-экономическим ущербом и снижением защищенности населения. Таким образом, обеспечение безопасности, защита населения и объектов экономики от опасных техногенных процессов, недопущение гибели и травмирования людей являются приоритетными направлениями деятельности по обеспечению безопасности на современном этапе.

Управление защитой населения от техногенных опасностей, ведущих к возникновению ЧС, основывается на понятии риск.

Анализ публикаций показал, что значительный вклад в теорию и практику оценки риска ЧС и создания проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений, управления безопасностью и защитой населения внесли Н.А. Махутов, А.В. Мишуев, Н.Г. Топольский, В.А. Акимов, П.Г. Белов [1-4].

В работах [5-7] приведена информация о безопасности объектов экономики при ЧС техногенного характера.

В работах [8-12] разработаны математические модели системного подхода для оценки и управления риском техногенных аварий на потенциально опасных объектах энергетики, нефтегазового комплекса, оборонного комплекса и др.

Цель исследования – разработка модели оценки риска ЧС техногенного характера и эффективности защитных мероприятий на основе анализа риска.

Результаты

Под риском понимают возможность наступления сравнительно редких событий, то есть таких событий, математическое ожидание числа которых a за период времени Δt удовлетворяет неравенству

$$a(\Delta t) \ll 1. \quad (1)$$

Количественная оценка опасности техногенного характера определяется риском R , рассчитываемым как произведение вероятности P неблагоприятного события (авария, катастрофа и т.д.) и ожидаемого ущерба Y .

Риск от одного опасного явления целесообразно называть частным, а от нескольких явлений интегральным, выраженным в виде функции [13 – 15]

$$F_R = [P, Y] = \sum(P_j Y_j) , \quad (2)$$

где P_j – вероятность проявления j -го опасного техногенного события;

Y_j – материальный ущерб j -го события (выражается в денежном эквиваленте).

В совокупности интегрированный риск (техногенного и природного характера) можно представить в виде вектора, содержащего материальную (R_M), экономическую ($R_Э$), социальную (R_L) и экологическую (R_K) составляющие.

$$\bar{R}_\Sigma = R_M + R_Э + R_L + R_K . \quad (3)$$

При рассмотрении интегрального риска как некоторой временной функции от двух определяющих параметров – вероятности $P(t)$ возникновения опасности и ущерба $Y(t)$ от ее последствий, также имеющего вероятностную природу, – получаем следующее выражение

$$R_\Sigma(t) = f_R[P(t), Y(t)] , \quad (4)$$

или учитывая (3)

$$R_{\Sigma}(t) = f_R[R_M(t), R_3(t), R_L(t), R_K(t)] \quad (5)$$

Данное выражение является математической моделью интегрированного риска, которая обеспечивает методическую основу для прогнозирования и разработки мероприятий по снижению его уровня до приемлемого уровня и защиты населения. В целом данную функцию можно рассматривать как элемент управления интегральным риском.

Формулы (2) – (5) применимы лишь в случае несовместных неблагоприятных событий. В случае совместных факторов (событий) в работе [15-19] получено следующее выражение

$$R = p_1q_2q_3Y_1 + p_2q_1q_3Y_2 + p_3q_1q_2Y_3 + p_1q_2q_3(Y_1 + Y_2) + p_1q_3q_2(Y_1 + Y_3) + p_2q_3q_1(Y_2 + Y_3) + p_1q_2q_3(Y_1 + Y_2 + Y_3) \quad (6)$$

где $q_i = 1 - p_i$.

Выражение (6) легко обобщается на произвольное число неблагоприятных факторов (исходов).

Структура процедуры анализа и снижения риска чрезвычайных ситуаций представлена на рис. 1.

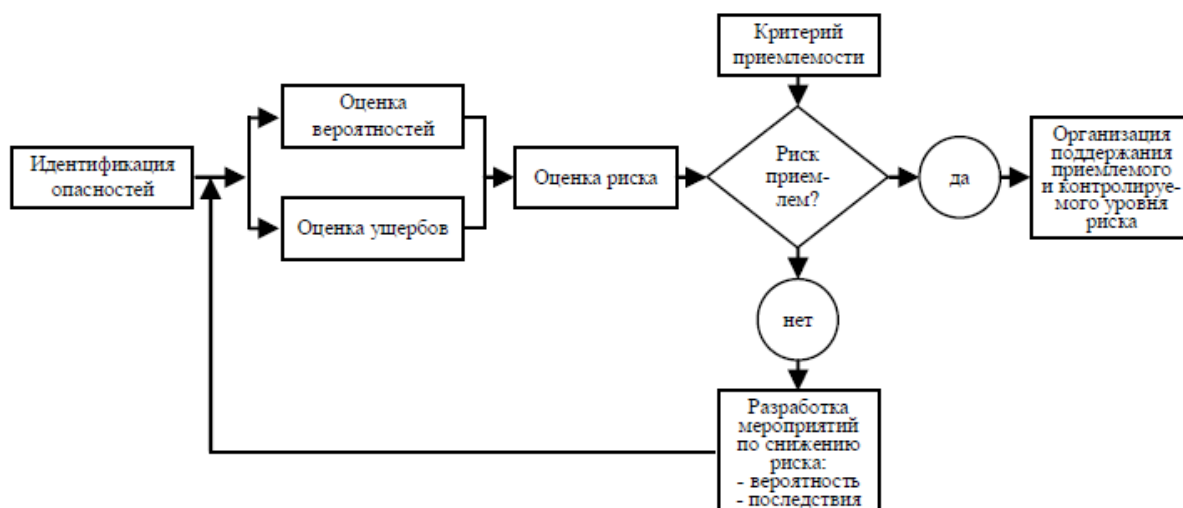


Рисунок 1 – Блок-схема анализа риска

Суть концепции анализа риска заключается в построении множества (всех без исключения) сценариев возникновения и развития возможных аварий на объекте с последующей оценкой частот реализации каждого из сценариев и определением масштабов последствий при этих сценариях развития аварии.

Получение количественных оценок потенциальной опасности ЧС включает в себя решение следующих задач:

- построение всего множества сценариев возникновения и развития аварии;
- оценку частот реализации каждого из сценариев возникновения и развития аварий;
- построение полей поражающих факторов, возникающих при различных сценариях развития аварии;
- оценку последствий воздействия поражающих факторов аварии на человека или другие материальные объекты;
- расчёт показателей риска.

Аварии и катастрофы чаще всего возникают при одновременном сочетании большого числа независимых случайных факторов.

При достаточно частом повторении ЧС на определенном объекте и наличии массива статистических данных о предыдущих ЧС для моделирования повторяемости применяют статистические методики, в которых функция риска, равная вероятности наступления очередной ЧС на промежутке времени $(\tau_{\text{чс}}, \tau)$, определяется соотношением

$$P(\tau) = P(\tau_{\text{чс}} < T < \tau) = \int_{\tau_{\text{чс}}}^{\tau} f(\tau) d\tau = \frac{\Phi\left(\frac{\tau - \tau_{\text{чс}}}{\tau}\right) - \Phi\left(\frac{\tau_{\text{чс}} - \tau_{\text{чс}}}{\tau}\right)}{0,5 - \Phi\left(\frac{\tau_{\text{чс}} - \tau_{\text{чс}}}{\tau}\right)}, \quad (6)$$

где $\Phi(\dots)$ – функция Лапласа, значение которой определяется по таблицам или вычисляется с достаточной для инженерных приложений точностью с помощью аппроксимации

$$\Phi(x) \cong 0,5(1 - (1 + 0,049867x + 0,021141x^2 + 0,0032x^3 + +0,000038x^4)^{-16}). \quad (7)$$

В ряде случаев последовательность независимых друг от друга ЧС техногенного характера может быть описана формулой Пуассона

$$P_k(\tau) = \frac{\left(\frac{\tau - \tau_{\text{чс}}}{\tau_{\text{чс}}}\right)^k \exp\left(-\frac{\tau - \tau_{\text{чс}}}{\tau_{\text{чс}}}\right)}{k!}, \quad (8)$$

где $P_k(\tau)$ – вероятность наступления k событий за время τ , или формулой для степенного распределения

$$H(\tau) = 1 - \left(\frac{\tau_{\text{чс}}}{\tau}\right)^{\alpha-1}. \quad (9)$$

Параметр α степенного распределения вероятностей определяется по имеющимся эмпирическим данным методом наименьших квадратов

$$\alpha = 1 + A/B, \quad (10)$$

$$\text{где } A = \sum_{i=1}^m \ln\left(\frac{\tau_{\text{чс}}}{\tau_i}\right) \ln(1 - H_i^*), B = \sum_{i=1}^m \ln^2\left(\frac{\tau_{\text{чс}}}{\tau_i}\right).$$

Для выбора модели, наиболее точно соответствием опытными данным используется метод минимизации суммы квадратов разности расчетных и эмпирических значений.

$$\sum_{i=1}^m (H_i - H_i^*)^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Графики функций риска, полученных на основе различных законов распределения времени ожидания, представлены на рис. 2.

Рассмотренные выше функции риска позволяют прогнозировать вероятность наступления ЧС в течении заданного промежутка времени.

Анализ статистических данных показывает, что нормальное распределение и распределение Пуассона более адекватно описывают повторяемость отказов технических систем с большой степенью износа, а степенные распределения характерны для сравнительно редких стихийных бедствий и техногенных катастроф.

При отсутствии данных статистики для оценки вероятности редких событий по которым статистики практически нет, используется теоретико-вероятностный подход для определения вероятности.

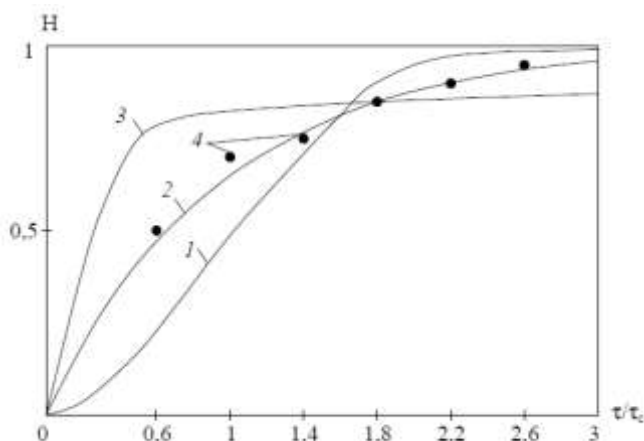


Рисунок 2 – Зависимость вероятности наступления ЧС от времени ожидания:
 1 – нормальное распределение;
 2 – распределение Пуассона;
 3 – степенное распределение;
 4 – опытные данные

Когда нет статистических данных и теоретических нет возможности построения математических моделей, используется эвристический метод, основанный на экспертных оценках.

Таким образом, анализ риска для населения и территорий от ЧС основан на использовании различных концепций, методов и методик (рис. 3).



Рисунок 3 – Методы и методики анализа риска на основе современных концепций

Несмотря на то, что многие исследователи признают неэтичность и аморальность оценки человеческой жизни, все же оказалось возможным выразить стоимость человеческой жизни, исходя из затрат общества на подготовку человека (воспитание, обучение, лечение и т.д.) и потери от его несостоявшейся отдачи.

Разработанные методики расчета экономической эффективности снижения преждевременной смертности людей (назовем их медицинскими методиками) оперируют такими критериями, как недопроизведенная продукция, потери чистого национального дохода, недополученный чистый продукт. Техничко-экономические методики рассматривают человека как орудие труда. По существу, оценивается не человек как таковой, а его экономические возможности.

Мало того, строгое и последовательное толкование этих методик приводит к тому, что смерть пенсионера сопровождается чистым экономическим эффектом, тогда как падеж скота при его любом возрасте – только ущербом. Международная комиссия по радиологической защите, анализируя такого рода методики, разъясняет: Метод оценки жизни предполагает, что

индивиды подобны некоторому типу капитального оборудования, чья потенциальная производительность (отдача) утрачивается в связи с преждевременной кончиной. Ценность жизни приравнивается к ценности средств к жизни, как это отражается в индивидуальных утратах будущих заработков. Принятие этого подхода привело бы к выводу, что безвременная смерть пожилых людей приносит обществу чистую пользу.

В монографии [19] такой подход отвергается и предлагается рассчитывать экономический эквивалент стоимости человеческой жизни по формуле

$$\mathcal{E}(T_{ж}) = \frac{D_c}{P_y}, \quad (12)$$

где $\mathcal{E}(T_{ж})$ – экономический эквивалент стоимости жизни среднестатистического человека в среднем возрасте $T_{ж}$, имеющего среднедушевой располагаемый денежный годовой доход D_c и среднюю вероятность смерти P_y за 1 год.

Средний возраст живущих людей $T_{ж}$ может быть выражен через плотность распределения вероятностей $f(t_{ж})$ возраста $t_{ж}$ живущих людей, согласующегося (для стран, указанных в табл. 8, по критерию согласия Пирсона при уровне значимости $\alpha = 0,03-0,10$) с распределением Вейбулла – Гнеденко:

$$T_{ж} = \int_0^{\infty} t_{ж} f(t_{ж}) dt = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{a}{b}\right) + c, \quad (13)$$

$$\text{где } f(t_{ж}) = \frac{b}{a} \left(\frac{t_{ж}-c}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{t_{ж}-c}{a}\right)^b\right];$$

a, b, c – параметры плотности распределения вероятностей возраста $t_{ж}$ живущих людей:

a – параметр масштаба;

b – параметр формы;

c – параметр сдвига;

Γ – гамма-функция (табулирована в математических справочниках):

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} x^{y-1} e^{-x} dx \quad (15)$$

Физический смысл экономического эквивалента стоимости жизни среднестатистического человека представляет собой сумму среднедушевых располагаемых денежных годовых доходов населения страны в расчете на одного умершего D_c – среднедушевой располагаемый денежный годовой доход).

Экономический эквивалент стоимости жизни $\mathcal{E}(t_{жк})$ среднестатистического человека определенного контингента людей среднего возраста $t_{ж}$, считающего приемлемым компенсацию ΔK_{oi} за опасный вид деятельности, увеличивающей риск смерти от i – й причины на $\Delta P_{y(+)}$

$$\Delta P_{y(+)} = \frac{\text{Число людей погибших от опасного вида деятельности за единицу времени}}{\text{Число людей, подвергаемых риску гибели от опасного вида деятельности за единицу времени}} \cdot \quad (16)$$

Отсюда получаем

$$\mathcal{E}(t_{жк}) = \frac{\Delta K_{oi} \left(\frac{\text{Число людей, подвергаемых риску гибели от опасного вида деятельности за единицу времени}}{\text{Число людей, погибающих от опасного вида деятельности за единицу времени}} \right)}{\text{Число людей, подвергаемых риску гибели от опасного вида деятельности за единицу времени}} \cdot \quad (17)$$

Таким образом, физический смысл экономического эквивалента стоимости жизни среднестатистического человека определенного контингента людей, подвергаемого риску гибели от опасного вида деятельности, представляет собой суммарную компенсацию, выплачиваемую этому контингенту в расчете на одного погибшего человека (ΔK_{oi} – компенсация, выплачиваемая одному среднестатистическому человеку).

Обобщая вышесказанное, составляем алгоритм оценки эффективности мероприятий по защите населения в ЧС.

На первом этапе формируется модель «человек-опасный производственный объект» (далее – ОПО). Вводятся параметры, количественно отражающие опасные характеристики ОПО и все составляющие эффективности функционирования ОПО в рамках теории рисков. В заключение формулируется общая задача оптимизации и её математическая постановка.

На втором этапе осуществляется систематизация, идентификация техногенных опасностей ОПО, и проводится негативная оценка их последствий. Все виды опасностей модели (Ч – ОПО) определяются и систематизируются. Третий этап предполагает проведение анализа интегрального риска. Его целью является прогнозирование ущерба (потерь), который может быть причинен ОПО человеку, и населению в целом от последствий угроз техногенного характера. Ущерб рассматривается как результат причинно-следственных факторов.

Четвертый этап включает моделирование системы (Ч – ОПО). Этот этап включает учет существенных факторов, которые определяют возникновение и последствия опасностей на ОПО, составление смысловых моделей и их формализацию на основе диаграмм причинно-следственных связей (дерева событий и исходов).

На пятом этапе, для оценки вероятности идентифицированных техногенных опасностей ОПО, проводится частотный анализ. Этот анализ основан на положениях теории вероятностей и элементов математической статистики.

На шестом этапе анализируются последствия (исходы). Этот этап направлен на оценку ущербов (потерь), вследствие возникших аварий и отказов на ОПО, травматизма людей с летальным или тяжелым исходом (потерей трудоспособности) и др.

Седьмой этап включает процедуру вычисления, оценки и сопоставления риска.

Управление риском состоит в мониторинге, идентификации и осуществлении обоснованных мероприятий, направленных на получение допустимого риска. Для определения, является ли риск допустимым, рассматривается его значение, полученное после выполнения процедуры обработки риска. Если риск не является приемлемым, то рассматриваются действия, направленные на снижение или предотвращение риска. Мониторинг риска должен быть непрерывным на всех этапах, включая проектирование, эксплуатацию и реконструкцию ОПО.

Заключение

1. Необходимость снижения числа техногенных аварий и защиты населения, делает актуальной проблему комплексного анализа уровня техногенной опасности, выраженной через понятие интегрированного риска.

2. Обоснована модель определения интегрального риска, влияющего на функционирование опасных производственных объектов, на основе обеспечения мониторинга информации по установлению техногенных в том числе опасностей на объектах ОПО и их количественных оценок.

3. Оценка интегрального риска R , влияющего на функционирование ОПО, включает ущерб от опасного техногенного события и вероятность его возникновения, учитывающий материальную, экономическую, социальную и экологическую составляющие.

4. Разработанная модель управления уровнем интегрального риска, влияющая на функционирование ОПО и его количественных оценок, позволяет оценивать ущербы и проводить разработку мероприятий по снижению его уровня интегрального риска.

Библиография

1. Щербаков, Ю.С. Исследование методов анализа риска на основе концепций обеспечения безопасности / Ю.С. Щербаков // Материалы конференции. 2009. – № 1. – С. 185–191.
2. Святенко, И.Ю. Снижение риска чрезвычайных ситуаций и обеспечение безопасности жизнедеятельности населения. Опыт Москва / И.Ю. Святенко // ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). – 2018. – С. 206–219.
3. Мусаев, В.К. Об оценке безопасности сложных технических систем с помощью метода анализа риска / В.К. Мусаев, Е.В. Дикова, В.В. Стародубцев, С.Н. Самойлов, О.В. Куранцов // Сборник материалов конференции «Актуальные проблемы социально-экономической и экологической безопасности Поволжского района», 2015. – С. 157–160.
4. Бакиров, И.К. Анализ основных методов подхода к анализу оценки пожарного риска зданий и сооружений / И.К. Бакиров, М.М. Файзулина // Материалы конференции. 2016. – № 1–2(5). – С. 13–14.
5. Артюшин, Ю.И. Оценка эффективности мероприятий по защите населения в чрезвычайных ситуациях / Ю.И. Артюшин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. – № 6. – С. 35–38.
6. Проблемы оценки эффективности деятельности пожарной охраны по спасению людей / А.А. Порошин, В.В. Харин, Е.В. Бобринев, А.А. Кондашов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы: материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России, 2017. – С. 589–591.
7. Евдокимов В.И. Анализ рисков в чрезвычайных ситуациях в России в 2004–2013 гг.: монография / Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России. – СПб.: Политехника сервис, 2015. – 95 с.
8. Анализ рисков и обеспечение защищенности критически важных объектов нефтегазохимического комплекса. – ТюмГНГУ, 2013. – 560 с.
9. Бардулин, Е.Н. Формирование модели управления интегральным риском от угроз природного и техногенного характера на объектах военной инфраструктуры / Е.Н. Бардулин, В.П. Авдотьин, М.Н. Козин, В.В. Носов // Технологии гражданской безопасности, 2017. – № 3 (53). – С. 74–81.
10. Махутов, Н.А. Системный подход к оценке и управлению рисками / А.Н. Махутов, Р.С. Ахметханов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2012. – № 5. – С. 56–69.
11. Гуменюк, В.И. Разработка математической модели и методики оценки риска ЧС на потенциально опасном объекте энергетики с их программной реализацией / В.И. Гуменюк, А.Ю. Туманов // Технологии гражданской безопасности, 2017. – № 1 (51). – С. 66–75.
12. Мусаев, В.К. Анализ риска в безопасности населения и территорий объектов экономики от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / В.К. Мусаев // Проблемы безопасности российского общества, 2012. – № 3. – С. 32–37.
13. Шаптала, В.Г. Основы моделирования чрезвычайных ситуаций : учебное пособие / В.Г. Шаптала, В.Ю. Радоуцкий, В.В. Шаптала; под общ. ред. В.Г. Шаптала. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 166 с.
14. Марухленко, А.Л. Математическая модель системного подхода для оценки техногенных аварий / А.Л. Марухленко, С.Л. Марухленко // Известия Юго-Западного государственного университета, 2013. – № 2. – С. 60–64.
15. Смалюк, В.Н. Оценка риска на основе логико-вероятностных методов / В.Н. Смалюк // Двойные технологии, 2006. – № 1 (34). – С. 27–31.
16. Методические основы управления системой защиты населения в чрезвычайных ситуациях техногенного характера / А.Г. Заворотный, А.А. Кострубицкий, А.В. Калач // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2021. – №1. – С. 80-88.

17. Кострубицкий А.А. Матричная модель оценки относительной значимости мероприятий РСЧС // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 4-21. – С. 50-58.

18. Кострубицкий А.А., Заворотный А.Г. Анализ чувствительности модели оценивания относительной эффективности мероприятий защиты населения в чрезвычайных ситуациях техногенного характера // Технологии гражданской безопасности. – 2024. – № 1(79).

19. Харисов, Г.Х. Экономический эквивалент стоимости человеческой жизни. – М.: Монография, 2016. – 65 с.

MODEL FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF MEASURES TO PROTECT THE POPULATION FROM MAN-MADE EMERGENCIES BASED ON RISK ANALYSIS

Kostrubitsky A.A.,¹ Zavorotny A.G.²

¹Main Directorate of the Ministry of EMERCOM of Russia for the Donetsk People's Republic

²State Fire Academy of EMERCOM of Russia

Abstract

The article analyzes and summarizes a set of organizational and methodological approaches to the analysis of the risk of man-made emergencies and the effectiveness of measures to protect the population from their consequences. Issues related to the methodology for assessing the risk of man-made emergencies are considered. Methodological approaches to assessing the integrated risk of the occurrence and development of man-made emergencies at hazardous industrial facilities are substantiated. Mathematical approaches to calculating damage from the consequences of emergencies are presented. The physical meaning of the economic equivalent of the cost of life of an average person is determined, which is the sum of the average per capita disposable annual monetary income of the country's population per one deceased.

Key words

protective measures, integral risk, risk, emergency, damage, efficiency assessment