

УДК 614+504.05

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К АНАЛИЗУ РИСКА НА ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ВЕТРА ПО МНОГОЛЕТНИМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

FEATURES OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO RISK ASSESSMENT AT FIRE AND EXPLOSION-DANGEROUS OBJECTS WITH REFERENCE TO WIND CONDITIONS ACCORDING TO LONG-TERM METEOROLOGICAL OBSERVATIONS

Сергей Петрович Сущев, Валерий Иванович Ларионов, Анатолий Александрович Александров

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Sergey P. Sushchev, Valeriy I. Larionov, Anatoliy A. Aleksandrov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: esrc@esrc.ru

Аннотация. В настоящее время человек сталкивается со значительными изменениями среды своего обитания. Это обусловлено как увеличением масштабов технологий, научно-техническим И информационным прогрессом, повышением уровня вмешательства человека в окружающую природную среду, так и периодически меняющимися климатическими условиями, ростом сейсмической активности и другими факторами. Это приводит к активизации опасностей и угроз возникновения масштабных аварий на опасных объектах и, как следствие, к необходимости разработки обеспечению устойчивости безопасного новых решений ПО И функционирования этих объектов. Такого рода опасности и угрозы



обусловливают ряд сопутствующих рисков и увеличивают потери и материальный ущерб от аварийных событий. Сложившаяся ситуация определяет необходимость решения актуальной проблемы, заключающейся концептуальном обеспечении требуемого уровня промышленной безопасности объектов, котором производят, на используют, перерабатывают, хранят или транспортируют легковоспламеняющиеся и пожаровзрывоопасные вещества, создающие реальную угрозу возникновения техногенной чрезвычайной ситуации. Поэтому требует исследования дополнительного вопрос анализа риска на пожаровзрывоопасных объектах с учетом прогнозных метеоданных.

В статье рассмотрены методы, позволяющие проводить комплексную оценку риска объектов, в том числе в условиях меняющихся метеоусловий, разрабатывать решения, направленные на минимизацию риска, повышать результативность действий по обеспечению безопасности объекта.

Abstract. Nowadays, humans face significant environmental changes. It us associated not only with technologies enhancement, scientific, technical and information progress, increase in the level of human intervention in natural environment, but also with periodically changing climatic conditions, increase in seismic activity and various other factors. All these factors lead to increased hazards and threats of large-scale accidents at hazardous facilities and, as a result, to the need to develop new solutions for ensuring sustainability and safe operation of these facilities. Such hazards and threats arise several associated risks and increase losses and property loss from incidents. Current situation determines the need to solve this topical issue of maintaining the required level of industrial safety on facilities where inflammable, fire and explosion-dangerous substances are produced, used, processed, stored, or transported as they create real threat of man-made emergency. Thus, risk assessment issues for fire and explosion-dangerous facilities with reference to forecast meteorological data require additional research.



The article discusses methods that allow to perform comprehensive risk assessment of facilities even in changing weather conditions, to devise solutions of risk minimization, and to increase the efficacy of actions on safety promotion on the facility.

Ключевые слова: пожаровзрывоопасный объект, поражающие факторы, безопасность, риск, неопределенность, анализ риска, управление рисками геоинформационные системы, экспертные системы

Keywords: fire and explosion-dangerous facilities, damage effects, safety, risk, uncertainty, risk assessment, risk management, geoinformation systems, expert systems

Введение

Оценка риска аварий на пожаровзрывоопасных объектах (ПВОО) основана на анализе причин возникновения и условий развития аварий, поражения персонала и населения, причинения ущерба имуществу предприятия, вреда окружающей природной среде, для чего могут быть использованы различные методы, в том числе расчетно-аналитический метод количественного анализа риска.

Количественный подход к анализу риска сводится к определению частоты (вероятности) причинения ущерба (вреда) определенного вида на рассматриваемом объекте или территории. Такой подход отличается многообразием расчетных методов.

Расчетно-аналитический метод основан на вероятностных закономерностях, описывающих воздействие поражающих факторов и уязвимость элементов риска (людей и объектов, находящихся в зоне риска). Проведение количественного анализа требует большого объема информации аварийности, ПО надежности оборудования, учета особенностей окружающей метеоусловий, территории, времени



пребывания людей в опасных зонах и других факторов, а также выполнения экспертных работ и высокой квалификации исполнителей [1].

Для анализа риска территорию вокруг рассматриваемого опасного объекта разбивают на элементарные площадки. Для каждой из них подготавливают исходные данные, в том числе информацию по характеристикам зданий и размещению людей, и определяют параметры возможных поражающих факторов.

Метод позволяет оценивать и сравнивать различные опасности техногенного характера по единым показателям. Он наиболее эффективен как на стадии проектирования, строительства и функционирования опасного производственного объекта, так и при обосновании и оптимизации мер безопасности и при оценке опасности крупных аварий, в том числе на на линейных и площадочных объектах и пр.

Оценка риска с учетом сценариев развития аварий

При определении ожидаемых потерь различают два расчетных случая:

- 1) когда интенсивность поражающего фактора рассчитывается по факту возникновения ЧС;
- 2) когда воздействие рассматривается в виде вероятностной модели (для этого случая проводится оценка риска).

При известной интенсивности поражающего фактора (*случай 1*), например взрыва, математическое ожидание потерь на площадке с координатами (x, y) можно определить по формуле

$$M[N(x,y)] = P[\Delta P(x,y)]\psi(x,y)\Delta x \Delta y, \tag{1}$$

где $P[\Delta P(x, y)]$ — вероятность поражения людей на площадке с координатами (x, y) при воздействии избыточного давления ΔP ;

 $\psi(x, y)$ – плотность людей в пределах площадки;

 Δx , Δy – размеры площадки.



Вероятность $P[\Delta P(x, y)]$ определяется по законам¹ поражения людей (функций уязвимости) с учетом значений поражающих факторов взрыва [1, 2].

Для вычисления ожидаемого числа пострадавших в районе опасного объекта площадью S суммируются потери по всем площадкам

$$M(N) = \iint_{S} P[\Delta P(x, y)] \psi(x, y) dx dy, \qquad (2)$$

при этом расчет проводится как для людей, размещенных в зданиях, так и для людей, находящихся на открытой местности. В зависимости от решаемой задачи определяют общие, безвозвратные или санитарные потери.

При вероятностной модели воздействия (*случай* 2) рассматриваются возможные сценарии аварий и варианты их развития. После выявления для каждого из рассматриваемых ПВОО возможных сценариев аварий, специфики их возникновения и развития, расчета полей потенциальной опасности этих аварий и определения вероятности реализации их негативного воздействия оценивают ожидаемое число пострадавших по формуле

$$M(N) = \iint_{S} \sum_{i} P(C_{i}) P_{i} \left[\Phi(x, y) \right] \psi(x, y) dx dy, \qquad (3)$$

где $P(C_i)$ — вероятность реализации i-го сценария аварии (пожар, огненный шар, взрыв и др.);

 $P_i[\Phi(x, y)]$ — вероятность поражения людей со смертельным исходом или нанесением вреда здоровью от воздействия поражающего фактора Φ на площадке с координатами (x, y) при i-м сценарии аварии.

-

¹ Законы поражения и законы разрушения (функции уязвимости) описывают процесс сопротивления элементов риска воздействию. Законы разрушения характеризуют уязвимость зданий и сооружений, а законы поражения — уязвимость людей в зонах ЧС. Устанавливают зависимость между вероятностью *P* поражения человека (повреждения сооружения, здания) и интенсивностью проявления поражающего фактора (или расстоянием от центра очага до здания, сооружения). Законы поражения (разрушения) определяют заблаговременно и применяют в зависимости от вида рассматриваемой ЧС.



Вероятность $P_i[\Phi(x, y)]$ определяется на основе законов поражения людей (функций уязвимости) при аварийных взрывах и пожарах с учетом значений поражающих факторов (тепловые, барические и пр. воздействия), рассчитанных для площадки (x, y) [1, 2, 3].

Сценарии аварий, вероятности их реализации, варианты их воздействия на человека (поражающие факторы) принимаются с учетом деревьев событий.

Потенциальный территориальный риск, характеризующий частоту реализации в рассматриваемой точке (x, y) территории поражающего фактора, приводящего к гибели человека, определяют из выражения

$$R_{\Pi}(x,y) = \lambda \sum_{i} P(C_{i}) P_{i} [\Phi(x,y)], \qquad (4)$$

где λ — частота возникновения аварии на объекте за год (частота инициирующего события).

Значение показателя R_{Π} вычисляют при допущении, что на каждой площадке (x, y) находится человек. Зонирование территории по потенциальному территориальному риску выполняют, соединяя изолиниями точки с одинаковыми значениями риска.

Коллективный риск на территории определяют как ожидаемое число погибших с учетом пребывания людей на объекте в зданиях различного типа в течение суток:

$$R_{\text{\tiny KOJI}} = \lambda \iint_{S} \sum_{i} P(C_{i}) P_{i} [\Phi(x, y)] \psi(x, y) dx dy, \tag{5}$$

при этом размещение персонала на объекте в течение суток учитывается величиной $\psi(x, y)$.

 $\it Индивидуальный риск для человека$ на территории объекта рассчитывают с учетом численности людей $\it N_0$ в зоне риска

$$R_{\text{инд}} = R_{\text{кол}} / N_0. \tag{6}$$



Оценку риска на ПВОО проводят как при возможных авариях непосредственно на рассматриваемом объекте, так и при авариях на рядом расположенных опасных объектах.

Оценка риска с учетом режима ветра по многолетним наблюдениям

При оценке риска аварийных выбросов (проливов) продукта из резервуаров, его испарении с образованием и последующим дрейфом облака газопаровоздушной смеси интенсивность поражающих факторов в рассматриваемых точках будет зависеть от условий формирования взрывоопасного облака, расположения его в момент взрыва, а также скорости и повторяемости ветров по направлениям [4].

Дальность дрейфа взрывоопасного облака, в пределах которой сохраняется способность к воспламенению, зависит от условий формирования облака, массы и свойств опасного вещества, состояния атмосферы. Расположение облака в момент взрыва по направлению ветра может быть задано функцией распределения дрейфа облака (рисунок 1, a), т.е. вероятностью такого события, что точка взрыва будет на расстоянии, меньшем заданной величины L ($0 \le L \le L_{\max}$), от места аварии [4]:

$$F(L) = P(\overline{L} < L), \tag{7}$$

где \overline{L} — случайные значения расстояния.

Вероятность появления газопаровоздушного облака в пределах отрезка ΔL на расстоянии L от резервуара при заданном направлении ветра рассчитывается по формуле

$$P(L) = f(L)\Delta L. \tag{8}$$

Здесь f(L) = F'(L) — функция плотности распределения дрейфа облака (рисунок 1, b).



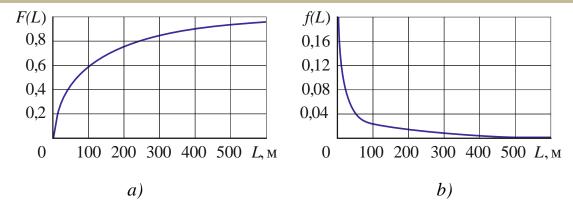


Рисунок 1. Функции распределения F(L) (*a*) и плотности распределения f(L) (*b*) дрейфа облака

Figure 1. Distribution functions F (L) (a) and distribution density f (L) (b) of cloud drift

При заблаговременных оценках также необходимо учитывать повторяемость направлений ветра α на рассматриваемой территории. Для примера на рисунке 2 приведен график функции плотности распределения $\phi(\alpha)$ повторяемости ветров, построенный на основе розы ветров для Москвы. В таком случае вероятность появления газопаровоздушного облака в пределах сектора $\Delta\alpha$ будет вычисляться по формуле



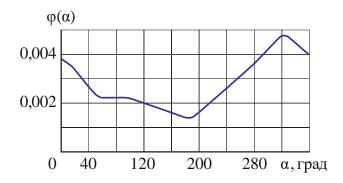


Рисунок 2. Функция плотности распределения $\phi(\alpha)$ повторяемости ветров для Москвы

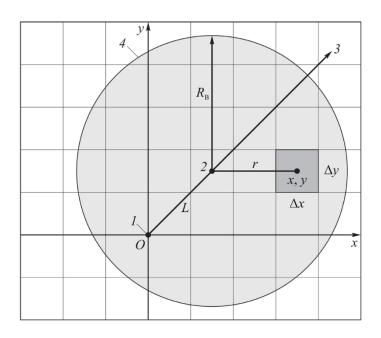
Figure 2. Distribution density function $\varphi(\alpha)$ of the wind frequency for Moscow

Для проведения расчетов вокруг резервуара нужно сформировать матрицу, каждую ее ячейку представить площадкой размерами 5×5 м. При



оценке вероятностей и интенсивностей поражающих факторов шаг по дрейфу облака целесообразно принять равным 25 м, а по направлению ветра – 6 градусов.

Расчетная схема для определения вероятности появления поражающего фактора различной интенсивности в пределах элементарной площадки с координатами (x, y), приведена на рисунке 3. При определении ожидаемых потерь на территории площадью S(cnyuau 2) следует учитывать дрейф облака и повторяемость направления ветра в течение года:



- 1 резервуар; 2 точка взрыва; 3 направление дрейфа облака;
- 4 зона действия взрыва; L рассматриваемое значение перемещения облака; r расстояние от центра площадки (x, y) до точки взрыва; $R_{\rm B}$ радиус зоны воздействия взрыва; Δx , Δy размеры площадки
- 1 reservoir; 2 explosion point; 3 direction of cloud drift;
- 4 explosion zone; L is the considered value of the cloud movement;
- r is the distance from the center of the site (x, y) to the point of explosion;
- $R_{\rm B}$ radius of the explosion impact zone; Δx , Δy platform dimensions

Рисунок 3. Расчетная схема для определения вероятности появления поражающего фактора на элементарной площадке с координатами (*x*, *y*)

Figure 3. Calculation scheme for determining the probability of the appearance of a damaging factor on an elementary site with coordinates (x, y)



$$M(N) = \iint_{S} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{L_{\text{max}}} P[\Delta P(x, y)] f(L) \phi(\alpha) \psi(x, y) dL d\alpha dx dy, \qquad (10)$$

где $P[\Delta P(x, y)]$ — вероятность поражения людей на площадке (x, y) при воздействии избыточного давления ΔP ;

f(L), $\varphi(\alpha)$ —функции плотности распределения дрейфа облака L ($0 \le L \le L_{\max}$) и повторяемости направлений ветра α ($0 \le \alpha \le 2\pi$) за год соответственно²;

 $\psi(x, y)$ — плотность людей в пределах площадки с учетом времени их пребывания;

 L_{\max} — максимальное расстояние дрейфа облака.

Вероятность $P[\Delta P(x, y)]$ определяется на основе законов поражения людей при значениях давлений на площадке (x, y), рассчитанных с учетом расстояния r от центра площадки до точки взрыва [1, 2].

Потенциальный территориальный риск, характеризующий появление в рассматриваемой точке (x, y) поражающего фактора, соответствующего гибели человека, определяется с учетом частоты λ аварии за год:

$$R_{\Pi}(x,y) = \lambda \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{L_{\text{max}}} P[\Delta P(x,y)] f(L) \phi(\alpha) dL d\alpha.$$
 (11)

Показатели коллективного и индивидуального рисков в районе пожаровзрывоопасного объекта определяются с учетом математического ожидания потерь (10) по формулам

$$R_{\text{кол}} = \lambda M(N); \quad R_{\text{инд}} = R_{\text{кол}} / N_0,$$
 (12)

где N_0 — численность людей в зоне риска.

Выводы

Развитие экономики России в современных условиях сопровождается повышением рисков для промышленного сектора, что обусловлено

² Расчеты проводятся при средней скорости ветра.



старением и износом основных фондов промышленности, а также недостаточным внедрением безрисковых технологий производства и управления. Подобная ситуация резко повышает актуальность, важность и значимость мероприятий управления рисками промышленных предприятий, широкого использования в этих целях информационных технологий, экспертных систем, систем поддержки принятия решений, баз данных по многолетним метеорологическим наблюдениям и пр.

На основе предложенного в статье методического подхода анализа риска при авариях на потенциально опасных объектах в МГТУ им. Н.Э. Баумана разрабатываются аппаратно-программные средства обеспечения безопасности городов России с использованием технологий искусственного интеллекта.

Работа, результаты которой использованы в данной статье, выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2019-087 от 18.12.2019.

Список источников

- 1. Александров А.А., Ларионов В.И., Сущев С.П. Анализ и управление техногенными и природными рисками. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 357 с.
- 2. Котляревский В.А., Ларионов В.И., Сущев С.П. Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология: В 3 Т. Законы поражения. Прочность и динамика сооружений / Под ред. В.А. Котляревского. М.: АСВ, 2008. Т. 2. 640 с.
- 3. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах // Сборник нормативно-правовых и методических документов, применяемых в области обеспечения пожарной безопасности: В 2 Ч. М.: Типография Полимаг, 2010. Ч. 2. С. 533-572.



4. Методика оценки последствий аварий на пожаровзрывоопасных объектах // Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС. М.: ВНИИ ГОЧС, 1994. Кн. 2. С. 2- 42.

References

- 1. Aleksandrov A.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. *Analiz i upravlenie tekhnogennymi i prirodnymi riskami* [Analysis and Management of Man-Made and Natural Risks]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ, 2019. 357 p. [in Russian].
- 2. Kotlyarevskii V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. *Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya: V 3 T. Zakony porazheniya. Prochnost' i dinamika sooruzhenii* [Encyclopedia of Safety: Construction, Industry, Ecology: In 3 Volumes. The Laws of Defeat. Strength and Dynamics of Structures]. Ed. by V.A. Kotlyarevskogo. Moscow, ASV Publ., 2008, Vol. 2. 640 p. [in Russian].
- 3. Metodika opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennykh ob"ektakh [Methodology for Determining The Calculated Values of Fire Risk at Production Facilities]. *Sbornik normativno-pravovykh i metodicheskikh dokumentov, primenyaemykh v oblasti obespecheniya pozharnoi bezopasnosti: V 2 Ch.* [Collection of Regulatory and Methodological Documents Used in the Field of Fire Safety: In 2 Parts]. Moscow, Tipografiya Polimag Publ., 2010, Part 2, pp. 533-572. [in Russian].
- 4. Metodika otsenki posledstvii avarii na pozharovzryvoopasnykh ob"ektakh [Methodology for Assessing the Consequences of Accidents at Fire and Explosion Hazardous Facilities]. *Sbornik metodik po prognozirovaniyu vozmozhnykh avarii, katastrof, stikhiinykh bedstvii v RSChS* [Collection of Methods for Predicting Possible Accidents, Catastrophes, Natural Disasters in the RSChS]. Moscow, VNII GOChS Publ., 1994, Book 2. pp. 2-42. [in Russian].



Сведения об авторах

About the Authors

Сущев Сергей Петрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Sushchev Sergey P., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: esrc@esrc.ru

Ларионов Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Valeriy I. Larionov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Study of Extreme Situations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: lar@esrc.ru

Александров Анатолий Александрович, д-р техн. наук, профессор, президент, заведующий кафедрой «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Aleksandrov Anatoliy A., Doctor of Engineering Sciences, Professor, President, Head of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: bauman@bmstu.ru