

УДК 371.315

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ АВАРИЙ ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

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

THEORETICAL METHODS OF ESTIMATION OF EMERGENCY DANGER ON EXPLOSIBLE OBJECTS

Рассматриваются вопросы, связанные с теоретическими методами оценивания наиболее полных и интегральных пространственных показателей опасности аварий взрывоопасных объектов. Анализируются взрывы конденсированных взрывчатых веществ и газо-, паро-, пылевоздушных смесей. С позиций квалиметрии рассматриваются поля избыточного давления во фронте воздушной ударной волны, факторные законы поражения и на этой основе — координатные законы поражения и приведенные зоны поражения.

ВЗРЫВООПАСНЫЙ ОБЪЕКТ; ПОЛЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВО ФРОНТЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ; ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ОБЪЕКТ; ФАКТОРНЫЙ ЗАКОН ПОРАЖЕНИЯ; КООРДИНАТНЫЙ ЗАКОН ПОРАЖЕНИЯ; ПРИВЕДЕННАЯ ЗОНА ПОРАЖЕНИЯ; ПАРАМЕТРЫ ЗАКОНОВ.

The article observes the issues related to theoretical methods of estimation of the most complete and integral special indicators of emergency danger on explosible objects. The explosions of condensed explosive materials as well as gas-, vapour- and dust-air mixtures are considered. From the position of qualimetry the fields of excess pressure in the shock wave front and factor damage laws are studied, and on their basis — coordinate damage laws and equivalent damage areas.

EXPLOSIBLE OBJECT; FIELD OF EXCESS PRESSURE IN THE SHOCK WAVE FRONT; ELEMENTARY OBJECT; FACTOR DAMAGE LAW; COORDINATE DAMAGE LAW; EQUIVALENT DAMAGE AREA; PARAMETERS OF DAMAGE LAWS.

Одна из актуальных научных задач в области промышленной безопасности — обоснование системы показателей, характеризующих опасность техногенных аварий, и выработка на этой основе научно обоснованных технических и следующих из этого организационных мероприятий, которые позволяют снизить опасность техногенных аварий промышленных предприятий.

В этой связи необходимо различать потенциальную опасность техногенной аварии и ее последствия [1, 2]. Потенциальная опасность техногенной аварии промышленного объекта определяется внутренними процессами ее раз-

вития, внешними процессами формирования полей поражающих факторов, а также реализацией поражающего действия на население (персонал объекта) и объекты инфраструктуры. Последствия аварии, помимо потенциальной опасности техногенной аварии промышленного объекта, зависят еще от количества и плотности распределения объектов поражения (люди, техника, инженерные сооружения) в пределах общей площади поражающего действия аварии.

В нашей стране при описании последствий техногенных аварий (катастроф), а также последствий штатного функционирования про-

мышленных объектов широко используется терминология, пришедшая из банковской сферы США, основанная на концепции риска. При этом выделяют различные уровни риска: индивидуальный, коллективный, социальный и т. д.

Описание последствий техногенных аварий в терминах риска, на наш взгляд, не совсем корректно, так как под риском обычно понимают вероятность (усредненная по времени, по пространству, по времени и пространству) наступления нежелательных последствий аварии, например летальных поражений населения. Поэтому постоянно необходимо уточнять, о каком риске идет речь.

Активно развивается одна из составляющих аксиологии (науки оценивания) — **квалиметрия** — наука о методологии всеобщего управления качеством (TQM).

Методы квалиметрии могут быть применены не только к техническим устройствам и изделиям [1, 3], но также и к техногенным авариям промышленных объектов. С использованием идеи квалиметрии в интересах решения проблемы квантификации, к настоящему времени обоснованы наиболее полные пространственно-временные показатели опасности техногенных аварий [1–4]. В интересах решения проблемы скаляризации обоснованы интегральные пространственно-временные показатели опасности. Для решения проблемы детерминизации обоснованы условные и безусловные наиболее полные статические и динамические пространственно-временные и интегральные показатели опасности техногенных аварий (катастроф) как при изолированном, так и при и комбинированном действии поражающих факторов, возникающих при техногенных авариях [2, 5].

Разработанная система показателей опасности техногенных аварий и методы их теоретической оценки сформировались в единую теорию опасности техногенных аварий на детерминированной и стохастической основах. она излагается авторами на протяжении последних 15 лет в различных вузах (Военная академия химической защиты — до 2006 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана с 2001 года по настоящее время, Военная академия связи и Санкт-Петербургский политехнический университет).

Рассмотрим методы теоретической оценки показателей наиболее полных и интегральных

показателей опасности с использованием детерминированной теории на примере взрывоопасных объектов, или, другими словами, техногенной аварии, продуцирующей мгновенно действующий поражающий фактор.

Основным поражающим фактором взрывоопасных объектов является воздушная ударная волна, при этом поле поражающего фактора (избыточное давление во фронте воздушной ударной волны) зависит от того, что взрывается: конденсированные ВВ или газо-, паро-, пылевоздушные смеси.

Как известно, избыточное давление во фронте воздушной ударной волны при взрыве конденсированных взрывчатых веществ описывается уравнением М.А. Садовского, которое не очень удобно для дальнейших аналитических исследований. С достаточной для практики точностью уравнение М.А. Садовского можно аппроксимировать следующим степенным соотношением [6]:

$$\Delta P_{\phi}(R) = A m_{\tau}^{\frac{\alpha}{3}} R^{-\alpha}, \quad (1)$$

где A и α — параметры модели, численное значение которых зависит от размерности переменных, входящих в уравнение (1) — тротилового эквивалента взрыва m_{τ} , расстояния до взрыва R и избыточного давления во фронте воздушной ударной волны ΔP_{ϕ} .

При взрыве газо-паро, пылевоздушной смеси поле избыточного давления во фронте воздушной ударной волны аппроксимируется в логарифмических координатах параболическим уравнением вида

$$\ln \Delta P_{\phi}(R) = a + b \ln \bar{R} + c \ln^2 \bar{R}, \quad (2)$$

где a , b , c — параметры модели.

Однако поле избыточного давления во фронте воздушной ударной волны в данном случае может быть описано с использованием кругового нормального закона в виде

$$\Delta P_{\phi}(x, y) = \frac{S_{\Delta P_{\phi}}}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}} = \Delta P_{\phi\max} e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где σ_x , σ_y , σ — параметры модели, имеющие размерность длины; $S_{\Delta P_{\phi}}$ — интегральная бароплощадь (параметр модели).

Для описания вероятности поражения не ниже заданной степени тяжести (применительно к людям), вероятности разрушения не ниже заданной степени тяжести (здания, строения, сооружения), вероятности повреждения не ниже заданной степени тяжести (техника и технологическое оборудование) применяются различные детерминированные и вероятностные модели. В совокупности персонал промышленного объекта, население, объекты инфраструктуры, техники и технологического оборудования в дальнейшем для краткости будем называть элементарными объектами, т. е. объектами, которые могут рассматриваться только в одном из двух состояний — поражен или не поражен.

Так, длительное время факторный закон поражения элементарного объекта при действии на него воздушной ударной волны описывался нормальным законом

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\Delta P_{\Phi} - \overline{\Delta P_{\Phi}}}{\sqrt{2} \sigma_{\Delta P_{\Phi}}} \right) \right], \quad (4)$$

однако в [5] было показано, что более корректно использование логарифмически нормального закона в виде

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{k} \ln \frac{\Delta P_{\Phi}}{\Delta P_{\Phi,50}} \right) \right], \quad (5)$$

где $\overline{\Delta P_{\Phi}}$, $\sigma_{\Delta P_{\Phi}}$, $\Delta P_{\Phi,50}$ и \sqrt{k} — параметры закона, зависящие от вида элементарного объекта поражения и рассматриваемой степени тяжести поражения.

Объединяя уравнение (1) или (2) с факторным законом поражения, можно получить наиболее полный показатель опасности взрывоопасности — координатный закон поражения (КЗП). Задача аналитического описания КЗП оказалась настолько сложной, что длительное время в этом вопросе использовались различные аппроксимации, параметры которых находились из тех или иных соображений [7]. Так, более 50 лет назад американским физиком Вигнером было предложено аппроксимировать неизвестный координатный закон поражения нецентральным χ -квадрат распределением с числом степеней свободы, равным двум:

$$G(R) = \int_0^{R_{\Pi}} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{R^2+r^2}{2\sigma^2}} I_0 \left(\frac{Rr}{\sigma^2} \right) dr, \quad (6)$$

где R_{Π} — параметр закона: радиус приведенной зоны поражения, м²; σ — параметр закона, м;

$I_0(u)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Принципиальный недостаток такого представления КЗП заключался в том, что его параметры R_{Π} и σ рассчитывались численным способом с использованием метода моментов по формуле

$$m_{\alpha} = \int_0^{\infty} R^{\alpha} G(R) dR,$$

что не позволяло проводить дальнейший аналитический анализ опасности взрывов при решении практически важных задач. Так, например, первый ($\alpha = 1$) и третий ($\alpha = 3$) моменты равны [7] соответственно

$$m_1 = \frac{R_{\Pi}^2}{2}; \quad m_3 = \frac{R_{\Pi}^2}{2} \left(2\sigma^2 + \frac{R_{\Pi}^2}{2} \right),$$

откуда, рассчитывая численными методами первый и третий начальные моменты, представлялось возможным найти параметры КЗП в виде (6).

Однако на базе уравнений (1), (2) и (5) несложно получить следующее аналитическое представление КЗП:

для взрывов конденсированных взрывчатых веществ КЗП имеет вид [5]

$$G(R) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\sqrt{k_R} \ln \frac{R}{R_{50}} \right) \right], \quad (7)$$

где R_{50} и $\sqrt{k_R}$ — параметры КЗП, выражаемые через мощность взрыва, параметры поля избыточного давления во фронте воздушной ударной волны и параметры факторного закона поражения);

для взрывов газо-, паро- и пылевоздушных смесей КЗП имеет вид [6]

$$G(x, y) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\sqrt{k} \left(\frac{x^2 - x_{50}^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2 - y_{50}^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] \right\}, \quad (8)$$

или при $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$

$$G(R) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\sqrt{k_R} \left(R^2 - R_{50}^2 \right) \right] \right\}, \quad (9)$$

где x_{50} и y_{50} — полуоси эллипса, на границе которого $\Delta P_{\Phi} = \Delta P_{\Phi,50}$; R_{50} — расстояние на котором $\Delta P_{\Phi} = \Delta P_{\Phi,50}$.

Тогда интегральный показатель опасности — приведенная зона поражения S_0 — может быть найдена следующим образом [2, 3, 5]:

$$S_0 = 2\pi \int_0^{\infty} G(R) R dR. \quad (10)$$

Так, для взрывов конденсированных взрывчатых веществ (КЗП в виде уравнения (7)) приведенная зона поражения находится следующим образом:

$$S_0 = 2\pi \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\sqrt{k_R} \ln \frac{R}{R_{50}} \right) \right] R dR = \\ = A^2 m_T^{\frac{2}{3}} \Delta P_{\phi,50}^{\frac{2}{3}} e^{\frac{1}{k_R}}, \quad (11)$$

а для взрывов газо-, паро- и пылевоздушных смесей приведенную зону поражения можно найти как

$$S_0 = \pi \sigma_x \sigma_y \ln \bar{\Delta P}_{\phi \max} \left\{ \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{k} \ln \bar{\Delta P}_{\phi \max} \right) \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\sqrt{\pi k} \ln \bar{\Delta P}_{\phi \max}} e^{-k \ln^2 \bar{\Delta P}_{\phi \max}} \right\}, \quad (12)$$

где $\bar{\Delta P}_{\phi \max}$ — максимальный бароэффект

$$\bar{\Delta P}_{\phi \max} = \frac{\Delta P_{\phi \max}}{\Delta P_{\phi 50}}.$$

Уравнения (11) и (12) позволяют количественно решать прикладные вопросы, имеющие важное практическое значение [2, 3, 5–10]:

определять последствия взрыва вплоть до структуры пораженных людей (персонал и население), а также различных объектов инфраструктуры;

анализировать влияние защитных мероприятий на снижение приведенной зоны поражения за счет повышения устойчивости элементарного объекта, т. е. увеличения $\Delta P_{\phi 50}$ или уменьшения мощности взрыва m_T ;

оптимизировать защитные мероприятия по критерию максимального снижения приведенной зоны поражения при выделенном финансовом ресурсе на их выполнение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармишин А.М., Киреев В.А., Гуменюк В.И. Проблемные вопросы промышленной безопасности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета 2013. № 2(178). С. 320–324.
2. Басенко В.Г., Гуменюк В.И., Танчук М.И. Безопасность жизнедеятельности. Защита в чрезвычайных ситуациях. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.
3. Ефимов В.Ф., Кармишин А.М., Киреев В.А. Карнюшкин А.И. Актуальные проблемы оценки пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий. Сб.: Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. VIII научно-практическая конференция. 8–10 октября 2008 г. Доклады и выступления. С-Пб.: Изд-во УГПС МЧС России, 2009. С. 199–210.
4. Кармишин А.М., Киреев В.А., Гуменюк В.И. К вопросу о количественных показателях опасности техногенных аварий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета 2(177) 2013. - ISSN 1994–2354. СПб.: ГПУ, 2013, с. 281–288.
5. Кармишин А.М., Киреев В.А. Карнюшкин А.И. Теоретическое описание комбинированного действия АХОВ // Сб. докл. на V научно-практ. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». 15–16 ноября 2005 г.— М.: ООО «Рекламно-издательская фирма «МТП-инвест», 2006. С. 379–392.
6. Кармишин А.М., Киреев В.А., Карнюшкин А.И. Оценка показателей опасности при авариях взрывоопасных объектов // Сб. матер. X научно-практ. конф. «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Оценка рисков возникновения чрезвычайных ситуаций». 5–6 октября 2010 г. М.: Изд-во Центра «Антистихия», 2010. С. 207–213.
7. Кармишин А.М., Киреев В.А. [и др.]. Теория поражающего действия ОМП. М.: Изд-во ВУ РХБ защиты, 2003. — 280 с.
8. Кармишин А.М., Киреев В.А. Карнюшкин А.И. Структура пораженных при техногенных авариях // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. IX научно-практическая конференция. 14–15 мая 2009 г. Доклады и выступления. М.: Изд-во Центра «Антистихия», 2009. С. 37–38.
9. Одинцов Л.Г. [и др.]. Технология ведения аварийно-спасательных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций / МЧС России. М.: Изд-во ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. — 286 с.
10. Актуальные вопросы предупреждения чрезвычайных ситуаций / Под общей ред. В.А. Акимова / МЧС России. М.: Изд-во ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010. 352 с.

REFERENCES

1. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Gumenyuk V.I.** Problemniye voprosy promyshlennoy bezo-pasnosti. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. № 2(178). SPb.: Izd-vo SPb. GPU, 2013. S. 320–324. (rus.)
2. **Basenko V.G., Gumenyuk V.I., Tanchuk M.I.** Bezopasnost' zhiznediel'nosti. Zashchita v chrezvychainykh situatsiyakh. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2008. (rus.)
3. **Efimov V.F., Karmishin A.M., Kireev V.A. Karnyushkin A.I.** Aktual'nye problemy otsenki prostranstvennovremennykh pokazateley opasnosti tekhnogennykh avari. *Sb.: Problemy prognozirovaniia chrezvychainykh situatsiy. VIII nauchno-prakticheskaya konferentsiya. 8–10 oktyabrya 2008 g. Doklady i vystupleniya*. Izd-vo S Pb.: UGPS MChS Rossii, 2009. S. 199–210. (rus.)
4. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Gumenyuk V.I.** K voprosu o kolichestvennykh pokazatelyakh opasnosti tekhnogennykh avari. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. №2(177). SPb.: Izd-vo SPb. GPU, 2013. S. 281–288. (rus.)
5. **Karmishin A.M., Kireev V.A. Karnyushkin A.I.** Teoreticheskoe opisaniye kombinirovannogo deistviya AK-hOV». *Sb. dokl. na V nauchno-prakticheskoy konferentsii 15–16 noyabrya 2005 g. «Problemy prognozirovaniya chrezvychainykh situatsiy*. M.: OOO «Reklamno-izdatel'skaia firma «MTP-invest», 2006. S. 379–392. (rus.)
6. **Karmishin A.M., Kireev V.A., Karnyushkin A.I.** Otsenka pokazateley opasnosti pri avariakh vzryvoopasnykh ob»ektov. *Sbornik materialov X nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy prognozirovaniya chrezvychainykh situatsiy. Otsenka riskov vznikoveniya chrezvychainykh situatsii». 5–6 oktyabrya 2010 g. Doklady i vystupleniya*. M.: Tsentr «Antistikhia», 2010. S. 207–213 s. (rus.)
7. **Karmishin A.M., Kireev V.A. [i dr.]**. Teoriya porazhaiushchego deistviya OMP. M.: Izd-vo VU RKhB zashchity, 2003. 280 s. (rus.)
8. **Karmishin A.M., Kireev V.A. Karnyushkin A.I.** Struktura porazhennykh pri tekhnogennykh avariakh. *Sb.: Problemy prognozirovaniya chrezvychainykh situatsiy. IX nauchno-prakticheskaya konferentsiya. 14–15 maia 2009 g. Doklady i vystupleniya*. M.: Izd-vo Tsentr «Antistikhia», 2009. S. 37–38. (rus.)
9. **Odintsov L.G. [i dr.]**. Tekhnologiya vedeniya avariyno-spatatel'nykh rabot pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy / MChS Rossii. M.: Izd-vo FGU VNII GOChS (FTs), 2011. 286 s. (rus.)
10. Aktual'nye voprosy preduprezhdeniya chrezvychainykh situatsiy / Pod obshchey redaktsiey V.A. Akimova / MChS Rossii. M.: Izd-vo FGU VNII GOChS (FTs), 2010. 352 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУМЕНИЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

КАРМИШИН Александр Михайлович — доктор технических наук профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, г. Москва, Россия; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

КИРЕЕВ Владимир Анатольевич — доктор технических наук профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, г. Москва, Россия; e-mail: kireev@mail.ru

AUTHORS

GUMENYUK Vasily I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

KARMISHIN Alexander M. — Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2-nd Bauman Str. 5, Moscow, Russia; e-mail: Vaxzk8chif@pochta.ru

KIREEV Vladimir A. — Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2-nd Bauman Str. 5, Moscow, Russia; e-mail: kireev@mail.ru