

Повышение достоверности прогнозирования поражающих факторов на пожаровзрывоопасных объектах

Е.В. Арефьева, главный научный сотрудник, д-р техн. наук¹,

А.В. Рыбаков, начальник лаборатории, д-р техн. наук²

¹Научно-исследовательский центр анализа и управления рисками, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России

²Научно-исследовательский центр Академии гражданской защиты МЧС России

e-mail: elaref@mail.ru

Ключевые слова:

техногенный риск, прогноз, чрезвычайные ситуации, управляющие воздействия, достоверность прогноза, система прогнозирования.

Разработан способ повышения достоверности прогнозирования характеристик чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Используется возможность повышения точности совокупного прогноза воздействия нескольких поражающих факторов при наличии ограничивающих ресурсов. Процесс прогнозирования рассматривается как управляемая система. В качестве управляющих воздействий рассматриваются датчики системы мониторинга, параметры измерений, расчетные методы и модели, информационное и вычислительное обеспечение прогнозных решений.

1. Введение

На производственных площадях опасных производственных объектов (ОПО) перемещается и сосредотачивается большое количество взрывоопасных веществ. За последние годы значительно возросло число объектов, аварии на которых носят все более угрожающий характер. Потери от таких чрезвычайных ситуаций (ЧС) ежегодно исчисляются миллиардами рублей. Реальный экономический ущерб от катастрофических аварийных ситуаций, возникающий вследствие прекращения, ограничения или несвоевременной поставки потребителям продукции, созданной ОПО, возрастает в 200 и более раз [1]. Снижение риска техногенных ЧС и смягчение их последствий возможно за счет принятия превентивных мер, направленных на предупреждение ЧС, в том числе за счет повышения точности прогноза возникновения ЧС и повышения точности прогнозной оценки последствий поражающих факторов ЧС на ОПО.

2. Прогнозирование ЧС

Процесс прогнозирования ЧС опирается на систему мониторинга параметров опасности, параметров состояния объекта, включая параметры обу-

дования и технологических процессов, и служит для выработки управленческих решений, направленных на предупреждение и снижение последствий ЧС на ОПО. Процесс прогнозирования рассматривается как управляемый процесс, в котором за счет управляющих воздействий можно регулировать качество прогнозного решения. В качестве управляющих воздействий, обеспечивающих получение более достоверного прогноза, будем рассматривать действия: установку более чувствительных датчиков; выбор оптимальных мест их расположения; качественную обработку информации мониторинга; использование более адекватных расчетных моделей и методов оценки значений поражающих факторов и оценки их последствий и т. д. Результатом управления выступит получение более достоверного прогноза в соответствии с заданной точностью отклонения расчетных и фактических значений прогнозируемых параметров поражающих факторов на ОПО и прогнозной оценки их последствий.

Рассматривается пожаровзрывоопасный объект, на который могут воздействовать поражающие факторы техногенного характера: ударная волна, тепловое излучение, осколки боеприпасов, части поврежденно-

го оборудования и т.п. Обозначим общее количество таких факторов через N , а последствия таких факторов через X_n , $n = 1, N$. Пусть при заданных характеристиках внешних воздействий действительные (фактические) последствия каждого фактора есть X_n . Реализация процесса прогнозирования связана с выполнением таких этапов, как сбор информации, обработка и анализ получаемых данных с датчиков, выбор и обоснование расчетной математической модели для оценки воздействия каждого из рассматриваемых поражающих факторов X_n , $n = 1, N$, а также оценки совокупного воздействия по всем факторам, т.е. выполняется комплексная оценка результата прогнозирования последствий поражающих факторов [2].

Будем рассматривать указанные элементы формирования прогнозных решений как управляющие воздействия U_p , $i = 1, I$, введение которых должно обеспечить улучшение качества прогноза. При этом реализация каждого такого управляющего воздействия связана с некоторыми затратами c_p , $i = 1, I$ (материальными, информационными, инструментальными, энергетическими, интеллектуальными, вычислительными и т.д.). Затраты могут быть связаны с созданием дополнительных точек мониторинга параметров опасности, характеристик состояний объекта и процессов, протекающих на объекте, с установкой дополнительных более точных датчиков, с проведением дополнительных экспериментов для уточнения коэффициентов расчетных математических моделей и т.д. Таким образом, оценка результата воздействия поражающего фактора X_n есть некоторый функционал от управлений U_p , т.е. $X_n = F_n(U_i, i = 1, I)$. При прогнозировании по каждому поражающему фактору ошибка прогноза есть

$$\Delta_n = |X_n - \tilde{X}_n| = |F_n(U_i) - \tilde{X}_n|, \quad n = 1, N, i = 1, I. \quad (1)$$

Тогда задача обеспечения наилучшего прогноза последствий воздействия n -го поражающего фактора заключается в выборе такого оптимального воздействия на процесс прогнозирования U_p , при котором достигается минимум

$$\Delta_n^* = |F_n(U_i^*) - \tilde{X}_n| = \min_{U_i} |F_n(U_i) - \tilde{X}_n|. \quad (2)$$

Существенным аспектом при таком выборе параметров управления являются затраты $c_n(U_n^*)$ на реализацию управления по каждому фактору. Учёт затрат приводит к тому, что целевая функция (2) определяется при условии, что суммарные затраты на реализацию управления U_i^* не должны превышать заданное значение c_0 , отражающее лимит экономических и других ресурсных затрат.

В этом случае задача минимизации ошибки прогнозирования сводится к выбору таких U_i^* , при которых обеспечивается условие (2) при выполнении ресурсных ограничений, не превышающих лимит c_0 . Фактически это означает, что за счет оптимального выбора регулирующих прогнозное решение воздействий (установка дополнительных датчиков, их рациональное размещение, повышение разрешающей способности измерительных приборов и т.д.) необходимо добиться минимальных прогнозных отклонений от фактических значений при ограничениях на допустимые затраты.

При получении комплексной ошибки прогноза по совокупности факторов необходимо учесть тот факт, что выбор управлений U_i для обеспечения $\min \Delta_n$ по фактору X_n может влиять на ошибку прогнозирования по другим факторам.

Действительно, рассмотрим два последствия X_s , X_{s+k} .

Пусть $X_s = F_s(U_1, U_2, U_3)$, а $X_{s+k} = F_{s+k}(U_2, U_3, U_1)$, т.е. $\Delta_s = \min_{\{U_1, U_2, U_3\}} \Delta(u)$, а $\Delta_{s+k} = \min_{\{U_2, U_3, U_1\}} \Delta(u)$.

Здесь существуют управления U_2 и U_3 — общие для этих последствий, а U_1 и U_1 — разные. Кроме того, есть два значения минимальных ошибок прогноза для последствий X_s и X_{s+k} . Однозначный выбор управлений здесь затруднён. Возникает задача многокритериального выбора при одинаковых предпочтениях выбора (возможно, требуется построение множества Парето).

Выход из создавшегося положения может быть получен путем формирования комплексной ошибки прогноза, которая учитывала бы ошибки по всем воздействиям [2]. Введём в качестве комплексной ошибки сферическую норму вектора, составленную из частных ошибок прогноза по каждому фактору:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{n=1}^N \Delta_n^2}. \quad (3)$$

Тогда задача обеспечения наилучшего комплексного прогноза сводится к выбору таких управляющих (регулирующих качество прогноза) воздействий $U_k^{**} \in \{U_i, i = 1, I, k \in 1, I\}$, при которых достигается минимум

$$\Delta^{**} = \min_{\{U_i\}} \Delta = \sqrt{\sum |F_n(U_k^{**}) - \tilde{X}_n|^2} \quad (4)$$

при выполнении условия ограничения на ресурсы

$$\sum_i c_i(U_k^{**}) \leq c_0. \quad (5)$$

Исходными данными для решения задачи выступает набор поражающих факторов $n = 1, N$ техногенного характера и сопоставленные по каждому фактору действительные последствия \tilde{X}_n . Кроме того,

предполагается, что существует система прогнозирования (набор расчетных прогнозных моделей), которая позволяет получать по каждому поражающему фактору оценку последствий воздействия \widehat{X}_n . На элементы системы прогнозирования можно оказывать воздействие — управление $U_i, i=1, I$, которое в общем случае приводит к получению оценок \widehat{X}_n , причём известны связи

$$\widehat{X}_n = F_n(U_i), i = \overline{1, I}. \quad (6)$$

Каждое управление U_i требует соответственных затрат $c_i = c_i(U_i)$, а общие допустимые затраты не должны превышать некую величину c_0 .

Рассмотрим алгоритм реализации разработанного метода. На первом шаге рассчитаем относительную ошибку прогнозирования по каждому фактору

$$\delta_n = \left| \frac{\widehat{X}_n - \widetilde{X}_n}{\widetilde{X}_n} \right|$$

и построим вариационный ряд в обратной последовательности;

определим норму вектора как

$$\|\Delta\|_0 = \sqrt{\sum_n \delta_n^2}. \quad (7)$$

Эта величина соответствует комплексной оценке ошибки прогноза системы прогнозирования (по всем расчетным моделям и показаниям датчиков, используемых при расчетах).

Выберем из вариационного ряда величину $\delta_n = \max_n \{\delta_n\}$, а из набора управляющих воздействий — U_i^* . Следствием воздействия управления U_i^* на результат прогнозирования по фактору n будет величина X_n^* , причём

$$\delta_n^*(U_i^*) = \left| \frac{X_n^*(U_i^*) - \widetilde{X}_n}{\widetilde{X}_n} \right| < \delta_n. \quad (8)$$

В силу соотношения (7) использование управления U_i^* в общем случае приведёт к изменению относительной погрешности по другим факторам, т.е. значение нормы (8) после введения управления U_i^* примет вид

$$\|\Delta\|_1 = \sqrt{\sum_n \delta_n^2(U_i^*)}. \quad (9)$$

Расчёт измененных значений $\delta_n(U_i^*)$ целесообразно проводить с учётом структуры зависимостей вида (7). Следует ожидать, что в силу различной физической природы проявления последствий фактора X_n управление U_i может воздействовать не на все последствия X_n .

Введём матрицу размером $N \times I$ с элементами 1 или 0, ставящую в соответствие последствиям воз-

действия факторов техногенного характера $X_n, n=1, N$ управления $U_i, i=1, I$. Подобная матрица позволяет наглядно продемонстрировать влияние управления U_i на факторы X_n , что позволяет выявить относительные ошибки прогнозирования $\delta_n(U_i^*)$, от которых в соответствующем столбце имеются 1. Матрица может иметь следующую структуру.

$$\begin{array}{c|ccc} & u_1 & u_2 & u_1 \\ \hline x_1 & & 1 & \\ x_2 & 1 & -1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline x_n & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

Значение 1 указывает на наличие воздействия управления U_i на последствие фактора X_n ; 0 (не указаны) — на отсутствие воздействия управления.

Управление U_i^* следует считать эффективным, если

$$\|\Delta\|_1 < \|\Delta\|_0. \quad (10)$$

Затраты, соответствующие введённому управлению U_i^* , есть $c_i(U_i^*)$. Если $\sum_i c_i(U_i^*) \leq c_0$, то возможно и целесообразно дальнейшее уменьшение комплексной ошибки прогнозирования. Если окажется, что при введении управления U_i^* суммарная стоимость затрат на повышение качества прогноза превышает лимит, т.е. выполняется неравенство $\sum_i c_i(U_i^*) > c_0$, то необходимо выбрать управление U_i^{**} такое, что $c_i(U_i^{**}) < c_i(U_i^*)$, и требуется заново оценить элементы относительной погрешности $\delta_n(U_i^{**})$, $n=1, N$.

При совместном выполнении условий

$$\|\Delta\|_2 = \sqrt{\sum_n \delta_n^2(U_i^{**})} < \|\Delta\|_0 \quad (11)$$

и

$$c_i(U_i^{**}) \leq c_0 \quad (12)$$

возможно дальнейшее уменьшение комплексной ошибки прогнозирования за счет выбора как элемента вида δ_n , так и соответствующих управлений. Если хотя бы одно из условий вида (11), (12) не выполняется, то это означает, что при данных ограничениях по затратам уменьшить ошибку прогнозирования нельзя и требуется пересмотреть ресурсное обеспечение прогнозирования.

3. Применение моделей прогноза

Применение изложенных положений было рассмотрено при вычислениях по расчетным моделям оценки последствий поражающих факторов при взрывах газа на пожаровзрывоопасных объектах при разгермети-

зации оборудования (рис. 1) [2]. При оценке процессов барического воздействия при разгерметизации оборудования, находящегося под давлением и содержащего взрывоопасный газ, требуется отдельно рассмотреть два различных по своей природе процесса [3]:

- распространение ударной волны, образованной под воздействием адиабатического расширения, истекающего из места разгерметизации газа (первичная ударная волна);
- генерация и распространение воздушной ударной волны от возможного взрыва газо-воздушной смеси (вторичная ударная волна).

Оценка параметров ударно-волнового воздействия включает три модели.

I. *Модель расчета параметров первичной волны*, основанная на модифицированной модели [3] Садовского М.А., позволяет учесть вид оборудования (сосуд, трубопровод), пространственный фактор распространения волны; место повреждения трубопровода. Управляющими будут параметры, учитывающие физические особенности образования первичной волны: вид оборудования; расстояние от места разрыва до ближайшего места завершения трубопровода; коэффициент, учитывающий пространственный фактор распространения волны.

Для сравнения выбран критерий, приведенный в (2). В результате ошибки прогноза, вычисленные по (7) и (9), для радиусов реализации избыточных давлений получены:

- для соотношений по формуле Садовского $\|\Delta\|_0 = 1,48$
- для модифицированной модели расчета параметров адиабатического взрыва $\|\Delta\|_1 = 0,46$ [4].

Выбранные управляющие воздействия эффективны, так как выполняется условие $\|\Delta\|_1 < \|\Delta\|_0$.

II. *Модель расчета параметров ударно-волнового воздействия в открытом пространстве*, основанная на модифицированной модели Б.Е. Гельфанда [4], позволяет учесть всплытие облака, расположение трубопровода (подземное, наземное), пространственный фактор распространения волны. Здесь управляемым параметром будет высота всплытия облака. Используя тот же критерий (2), была определена достоверность модифицированной модели для расчета дефлаграционного взрыва в открытом пространстве [4]. Значение нормы вектора ошибок прогноза, полученного на основе модифицированной модели (с управляющим параметром), $\|\Delta\|_1 = 0,34$. Значение нормы вектора ошибок прогноза, полученного на основе утвержденной методики РД 03-409-01 [5] (без управляющего параметра). Выбранные управляющие воздействия эффективны, так как выполняется условие $\|\Delta\|_1 < \|\Delta\|_0$.

III. *Модель расчета параметров ударно-волнового воздействия в помещении*, основанная на уравнениях материального баланса наполняемости помещения [4], позволяет учесть наличие легко сбрасываемых конструкций, систем вентиляции и категорию помещений по классу пожарной опасности. Управляемым параметром выступает площадь легко сбрасываемых конструкций. Аналитический вид модели приведен в [4]. Значение нормы вектора ошибок прогноза, полученного на основе модифицированной модели (с управляющим параметром площадь легко сбрасываемых конструкций), $\|\Delta\|_1 = 0,27$. Значение нормы вектора ошибок прогноза, полученного на основе утвержденной методики [5] (без управляющего

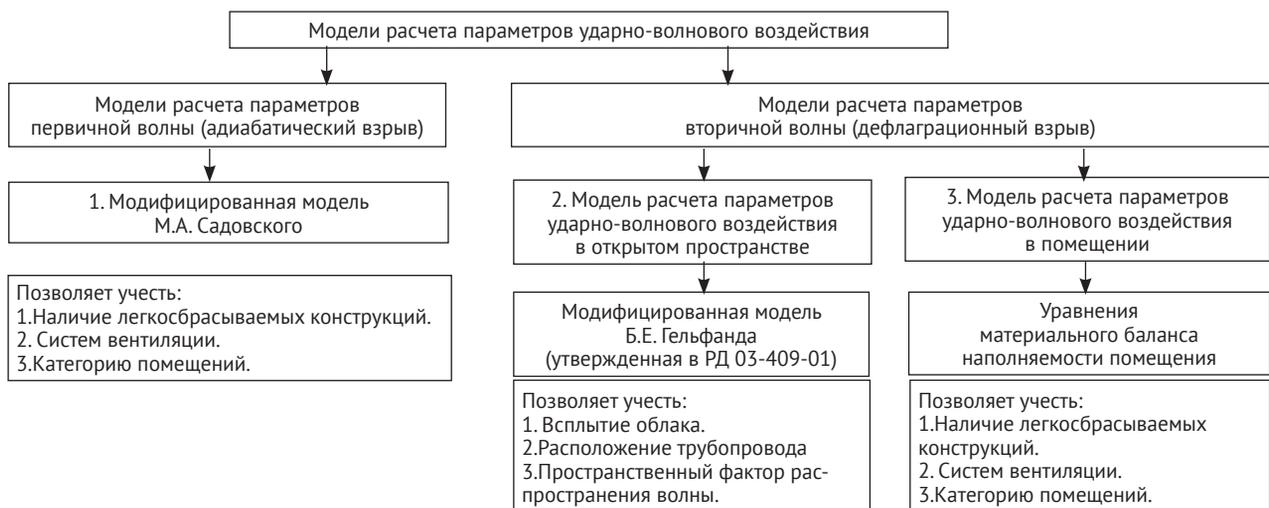


Рис. 1. Общая структура расчетных моделей прогнозирования значений поражающих факторов ЧС техногенного характера на пожаро-взрывоопасном объекте

параметра), $\|\Delta\|_0 = 1,03$. Условие эффективности выполнено $\|\Delta\|_1 < \|\Delta\|_0$, поэтому модель с высокой точностью достоверная.

4. Заключение

Ошибки прогноза по всем расчетным моделям оказались удовлетворительными, что свидетельствует о возможном увеличении точности получаемых прогнозных значений поражающего фактора удар-

ной волны. Предложенный способ повышения достоверности прогнозирования характеристик последствий поражающих факторов на ОПО и параметров чрезвычайных ситуаций техногенного характера на пожаровзрывоопасных объектах позволяет обосновать выбор расчетных моделей и методов, совершенствовать оборудование мониторинга с учетом ограниченных ресурсов, что позволит снизить техногенные риски на ОПО.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бесчастнов М.В.* Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. — М.: Химия, 1991. 432 с.
2. *Воскобоев В.Ф., Арефьева Е.В., Рыбаков А.В.* Метод повышения достоверности прогнозирования характеристик чрезвычайных ситуаций техногенного характера на пожаровзрывоопасных объектах // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. — 2015. — № 3. — с. 13–21.
3. *Гамера Ю.В., Овчаров С.В.* Модель образования и распространения первичной воздушной волны при аварии оборудования, находящегося под высоким

давлением// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 12. — с. 74–78.

4. *Рыбаков А.В.* Расчет устойчивости конструкций зданий к барическому воздействию при авариях с участием сжатого природного газа. Информационная технология. Монография. — Химки: ФГБОУ ВПО «Академия гражданской защиты МЧС России», 2014 г., 139 с.
5. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. РД 03–409–01. Утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 26.06.2001 № 25.

REFERENCES

1. *Beschastnov M.V.* *Promyshlennyye vzryvy. Otsenka i preduprezhdenie* [Industrial explosions. Evaluation and prevention]. Moscow, Khimiya Publ., 1991, 432 p. (in Russian)
2. *Voskoboev V.F., Aref'eva E.V., Rybakov A.V.* Metod povysheniya dostovernosti prognozirovaniya kharakteristik chrezvychaynykh situatsiy tekhnogennogo kharaktera na pozharovzryvoopasnykh ob"ektakh [A method for increasing the reliability of forecasting performance technogenic emergencies at facilities požarovzryvoopasnykh]. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity* [Scientific and educational civil protection issues]. 2015, I. 3, pp. 13–21. (in Russian)
3. *Gamera Yu.V., Ovcharov S.V.* Model' obrazovaniya i rasprostraneniya pervichnoy vozduшной volny pri avarii oborudovaniya, nakhodyashchegosya pod vysokim davleniem [Model formation and propagation of the primary air waves when equipment failure under high pressure]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in the industry]. 2012, I. 12, pp. 74–78. (in Russian)

pasnost' truda v promyshlennosti [Occupational safety in the industry]. 2012, I. 12, pp. 74–78. (in Russian)

4. *Rybakov A.V.* *Raschet ustoychivosti konstruksiy zdaniy k baricheskomu vozdeystviyu pri avariyaх s uchastiem szhatogo prirodnogo gaza. Informatsionnaya tekhnologiya* [Calculation of building structures resistance to the effects of the pressure in case of accidents involving the compressed natural gas. Information technology]. Khimki, FGBOU VPO «Akademiya grazhdanskoy zashchity MChS Rossii» Publ., 2014, 139 p. (in Russian)
5. *Metodika otsenki posledstviy avariynykh vzryvov toplivno-vozduшной smesey. RD03–409–01. Utv. Postanovleniem Gosgortekhnadzora Rossii ot 26.06.2001 № 25* [Methods of assessing the effects of accidental explosions of fuel-air mixtures. RD03–409–01. Approved. Decree Gosgortekhnadzor Russia from 26.06.2001 number 25]. (in Russian)

Increase in Reliability for Injurious Effects Forecasting on Fire- and Explosion Hazardous Facilities

E.V. Arefyeva, Doctor of Engineering, Chief Researcher, Research and Development Centre for Risks Analysis and Management All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the EMERCOM of Russia

A.V. Rybakov, Doctor of Engineering, Head of Laboratory, Research and Development Centre of Civil Defense Academy (CDA) EMERCOM of Russia

A method for increasing of technogenic emergencies' characteristics forecasting reliability has been developed. The possibility for accuracy increase of a cumulative forecasting for impacts of several injurious effects in the presence of limiting resources is used. The forecasting process is considered as a managed system. Monitoring system's sensors, measurements parameters, calculation methods and models, forecast decisions' information and computing support are considered as control actions.

Keywords: technogenic risk, forecasting, emergencies, control actions, forecasting reliability, forecasting system.