

С. Н. Гончаренко<sup>1</sup>, И. В. Ярощук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

# РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И МОДЕЛЕЙ ОПИСАНИЯ И ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АНТИРИСКОВЫХ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

*Рассмотрен подход к построению вероятностной модели прогнозирования взрыво- и пожароопасных ситуаций на сложном технологическом объекте. В основу разработки модели положено статистическое исследование технологических параметров. На примере исследования динамики температурной кривой сформирована имитационная модель системы аварийного расхолаживания реактора. При разработке статистической модели использована совокупность подходов и инструментов теории вероятности и математической статистики, осуществлена проверка показателей на нормальный закон распределения, произведен расчет основных статистических характеристик, определены параметры функции распределения вероятности. Предложен метод оценивания температур на основе зонирования рабочего диапазона по аналогии с сигмальными интервалами. Рассмотрена оценка риска аварии на основе схемы испытаний Бернулли с переменными вероятностями. Приведен вероятностный расчет оценки риска аварий и инцидентов на технологическом объекте. На основании анализа существующих методик сформулировано исходное множество альтернативных вариантов антирисковых мероприятий. Рассмотрен вопрос комплексного управления мероприятиями по устранению взрыво- и пожароопасных последствий на основе внедрения антирисковых мер. На основании факторного и статистического анализов выявлен перечень показателей исходного множества антирисковых мероприятий, что в совокупности с множеством альтернативных вариантов легло в основу формирования сценариев антирисковых мер.*

**Ключевые слова:** вероятностная модель, оценка риска аварий, автоматизированный контроль, уровень приемлемого риска

## Введение

Развитие атомной промышленности в России всегда относилось к числу приоритетных государственных задач. Атомная электростанция – огромная структура, связанная с высокой взрыво- и пожароопасностью. Нарушения хода технологических процессов, проходящих на станции, способны привести к возникновению техногенной катастрофы, последствия которой будут устраняться не одно десятилетие.

В связи с этим объекты атомной электростанции снабжены не только современными многоконтурными контрольно-измерительными приборами и автоматикой, но также и сложной системой их резервирования и всевозможными системами безопасности [1–3]. При этом прогнозирование возникновения взрыво- и пожароопасных ситуаций с последующим выбором оптимальных антирисковых мероприятий может существенно снизить последствия аварии или вообще предотвратить ее.

Одна из главных систем, обеспечивающих безопасный режим работы ядерного реактора в случае возникновения аварийных ситуаций, – система

аварийного расхолаживания реактора (САРХ). Главный ее объект – термосифон пассивного отвода тепла от ТВЭЛов, принцип работы которого основан на испарительно-конденсационном способе передачи тепла от контура реактора к атмосферному воздуху.

Основными технологическими переменными в системе аварийного расхолаживания, которые подлежат контролю, являются распределение температуры вдоль тепловой трубы, температура и расход охлаждающей контур воды, температура окружающего воздуха. Также контролируются подаваемое напряжение и ток нагревателя [4].

## Оценка рисков возникновения пожароопасных ситуаций

САРХ была выбрана авторами для оценки рисков возникновения пожароопасных ситуаций по следующим причинам. Во-первых, она расположена в необслуживаемом контуре, т.е. в контуре, который на очень высоком уровне оснащен контрольно-измерительными приборами, поскольку проникновение в него обслуживающего персонала

невозможно; во-вторых, достаточно просто получить доступ к показаниям датчиков температуры САРХ.

Поскольку рассматриваемые объекты САРХ находятся на действующей АЭС, было принято решение ограничиться пассивным экспериментом на имитационной модели.

Для оценки рисков возникновения пожароопасных ситуаций авторами использовались статистические данные с датчиков температуры, расположенных на объекте спиралевидным образом. Для полученного с каждого датчика набора показателей температуры ( $x_i(T_i)$ ,  $i=1, \dots, 10$ ) были построены соответствующие временные зависимости  $T_i(t)$ .

Имеющиеся данные рядов динамики были проверены на соответствие законам статистического распределения с расчетом  $\chi^2$  – критерия согласованности Пирсона и определением уровней сигмальных отклонений. В результате не было выявлено случаев выхода числовых значений динамических рядов случайных величин за допустимые границы (согласно правилу трех сигм).

Возможные диапазоны значений температур для каждого датчика, по аналогии с правилом трех сигм, условно разделили три зоны. Первая, зеленая зона, определяет интервал температур, попадая в который температура  $T_i$  лишь с низкой долей вероятности может привести к возникновению пожароопасной ситуации. Вторая, желтая зона, характеризуется средним уровнем статистической вероятности возникновения пожароопасной ситуации при попадании в нее температуры  $T_i$ . Третья, красная зона, является критической – попадание в нее температуры  $T_i$  может привести к возникновению пожароопасной ситуации с высокой степенью вероятности. Непосредственное значение вероятности возникновения пожароопасных ситуаций определяется исходя из параметров статистического закона распределения.

Для дальнейшей оценки риска было выдвинуто предположение, что возникновение пожароопасных ситуаций подчинено схеме испытаний Бернулли с переменными вероятностями. При некоторой  $i$ -й температуре технологического процесса в САРХ пожароопасная ситуация может возникнуть с вероятностью  $p_i$  или не возникнуть с вероятностью  $(1 - p_i)$  [5]. Возможное количество аварий, т.е. сумма этих вероятностей, в пределе имеет распределение Пуассона

$$P(x=k) = \frac{\lambda e^{-\lambda}}{k!},$$

где  $k$  – количество аварий, приходящихся на единицу времени, при этом  $\lambda = \sum_{i=1}^n p_i$ .

Величины вероятностей возникновения аварийных ситуаций подчиняются нормальному распределению, поскольку характеризуются существенным количеством, не имеющих превалирующего значения возмущающих факторов. В таком случае оценку риска возникновения аварий и внештатных ситуаций можно выразить следующим образом [6]:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{2^k} P(A_i)P(C_j | A_i)y_j + \sum_{i=1}^n P(B_i)y_{ини}, \quad (1)$$

где  $P(A_i)$  – вероятность аварий из-за  $i$ -й температуры;  $P(C_j | A_i)$  – условная вероятность развития аварии по  $j$ -му сценарию;  $y_j$  – ущерб при развитии аварии по  $j$ -му сценарию;  $P(B_i)$  – вероятность возникновения внештатной ситуации из-за  $i$ -й температуры;  $y_{ини}$  – ущерб от внештатных ситуаций из-за  $i$ -й температуры.

Поскольку в модели заложено десять датчиков температуры и каждый из них независим от других, то полученные значения температур можно рассматривать как совместные события. Тогда риск возникновения пожароопасных ситуаций  $R$  является вероятностью наступления совместных событий и может быть рассчитан следующим образом:

$$R = P(A_1, A_2, \dots, A_{10}) = 1 - P(\overline{A_1})P(\overline{A_2}) \dots P(\overline{A_{10}}), \quad (2)$$

где  $P(\overline{A_1})P(\overline{A_2}) \dots P(\overline{A_{10}})$  – вероятности наступления противоположных событий.

### Оценка эффективности проведения антирисковых мер

Полученные математические модели позволяют прогнозировать величину удельного эффекта запланированных протоколом мер по предотвращению пожароопасных ситуаций [7]:

$$U_i = \frac{Effect_i}{r_i}, \forall Effect_i = Z_i - Z_{mi} - r_i \cup Effect_i > 0,$$

где  $Z_i, Z_{mi}$  – прогнозные значения ущерба без запланированных мер по уменьшению риска возникновения пожароопасных ситуаций и с ними соответственно;  $r_i$  – расходование ресурса на  $i$ -ю меру для уменьшения риска.

Спецификой при реализации мер по предотвращению возникновения пожароопасных ситуаций является их зависимость от значительного количества внешних и внутренних факторов, которые характеризуются высокой степенью изменчивости, что грозит высокой степенью риска при принятии антирисковых мер. Проведенный авторами анализ показал, что существующие методики оценки эффективности проведения антирисковых мер в основном не предусматривают прогнозирования хода развития ситуации [8, 9].

Обозначим исходное множество альтернативных вариантов антирисковых мероприятий как

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_{m-1}, u_m\}$ . С применением метода факторного анализа показатели исходного множества антирисковых мероприятий можно разделить на несколько групп по степени их влияния на эффективность внедрения и использования. Было выявлено, что эффективность зависит от четырех основных факторов: типа мероприятий (активные, пассивные); местоположения; типологической схемы; обеспеченности (системы автоматизации, резервирования, системы пожаротушения).

Множество альтернативных вариантов мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций имеет вид  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{m-1}, w_m\}$ . С учетом специфики реализуемых мер оценка вариантов позволила сформулировать множество допустимых вариантов  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{m-1}, y_m\}$ ,  $Y \in W$  [10, 11], что легло в основу создания сценариев антирисковых мероприятий [12].

Вероятности реализации каждого из мероприятий определялись в соответствии с интегральными законами распределения и показателями экологических последствий функционирования объекта.

Оценка вероятности практической реализации сформулированных вариантов противопожарных

мероприятий  $P_j$  проводилась посредством определения общего закона распределения плотностей вероятностей выявленных ранее факторов. Вид распределения определялся с учетом статистических данных о выбранных показателях. Критерием для выбора вида закона распределения являлся критерий Пирсона и его величина  $\chi^2$  при условии  $\chi^2 \leq \chi^2_{r,5\%}$ .

### Выводы

В ходе проведенных исследований предложен подход, учитывающий возможные факторы риска при внедрении антирисковых мер, основанный на определении статистических показателей в каждый момент времени. Методом итеративного перебора совокупности проектов огнезащиты проведена оценка альтернативного множества антирисковых мероприятий в случае возникновения пожароопасных ситуаций. Предложенная методика оценки риска возникновения пожароопасных ситуаций, основанная на статистическом анализе температурных показателей с датчиков системы аварийного расхолаживания ядерного реактора, может быть использована и на других технологических объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корниец Т.П., Аликова О.П. Управление рисками в атомной энергетике как основа обеспечения энергетической безопасности России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 22 (163). С. 37–47.
2. Лобанова Н.А. Противопожарная защита систем безопасности новых АЭС: дис. канд. техн. наук. М., 2006. 209 с.
3. Ковалевич О.М. Экологическая безопасность, техногенные риски, устойчивое развитие России и ядерная энергетика России // Сб. науч. тр. конф. «Экологическая безопасность, техногенные риски и устойчивое развитие». М., 2002. С. 54–57.
4. Методика анализа влияния пожаров и их последствий на безопасный останов и расхолаживание реакторной установки. М.: Концерн Росэнергоатом, 1998.
5. Гончаренко С.Н., Парсегов А.С. Моделирование и оценка риска эксплуатации промышленного оборудования в отечественных и зарубежных исследованиях // Управление риском. 2013. № 2 (66). С. 35–43.
6. Лачихина А.Б. Вероятностная модель процесса выполнения транзакций в базе данных // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 3. № 4. С. 25–37.
7. Чумак Д.Ю., Щелетина Т.Д. Классификация риска как необходимый элемент управления в проектах ядерной энергетике // Атомная энергия. 2014. Т. 116. № 2. С. 108–113.
8. Гончаренко С.Н., Дементьева Е.В. Обзор отечественных и зарубежных исследований по анализу риска возникновения аварийных ситуаций на горном предприятии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 10. С. 177–185.
9. Гончаренко А.Н. Разработка методики интеграции информационных технологий в бизнес-процессы горнопромышленного предприятия // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2011. № 11. С. 17–24.
10. Федунец Н.И., Гончаренко А.Н. Инновационный подход к определению структуры программных решений для бизнес-процессов промышленного предприятия // Программные продукты и системы. 2012. № 1. С. 18.
11. Вяткин В.Н., Гамза В.А., Маевский Ф.В. Риск-менеджмент. 2-е изд. М.: Юрайт, 2017. 365 с.
12. Хохлов Н.В. Управление риском. М.: Юнити Дана, 1999. 239 с.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Гончаренко Сергей Николаевич**, д.т.н., профессор, ФГФОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский проспект, д.4, тел.: 8 (499) 230-28-11, e-mail: gs16@mail.ru.

**Ярошук Ирина Викторовна**, к.т.н., доцент, ФГФОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский проспект, д.4, тел.: 8 (499) 230-28-11, e-mail: irvic1@mail.ru.

S.N. Goncharenko, I.V. Yaroshhuk

## CRITERIA AND MODELS FOR DESCRIPTION AND ASSESSMENT EFFICIENCY REALIZATION OF ANTI-RISK FIRE-PREVENTION ACTIONS

The paper describes an approach to the construction of a probabilistic prediction model for explosive and fire hazardous situations at a complex technological object. The basis for the development of the model is a statistical study of technological parameters. Using the study of the dynamics of the temperature curve as an example, a simulation model of the reactor emergency cooling system is formed. When developing the statistical model, a set of approaches and tools of the theory of probability and mathematical statistics is used, the indicators are checked for a normal distribution law, the basic statistical characteristics are calculated, the parameters of the probability distribution function are determined. A method for temperatures estimation based on the zoning of the working range is proposed by analogy with sigma-intervals. An accident risk assessment based on a Bernoulli test scheme with variable probabilities is considered. A probabilistic calculation of the risk assessment of accidents and incidents at a technological facility is given. Based on the analysis of existing methods, an initial set of alternative anti-risk measures has been formulated. The issue of integrated management of measures to eliminate explosive and flammable effects through the introduction of anti-risk measures is considered. On the basis of factor and statistical analyzes, a list of indicators of the original set of anti-risk measures is identified, which, together with a variety of alternative options, formed the basis for the scenarios of anti-risk measures.

**Keywords:** probabilistic model, accidents risk assessment, automated control, acceptable risk level

## REFERENCES

1. Korniets T.P., Alikova O.P. Risk management in the nuclear power industry as the basis for ensuring Russia's energy security. *Natsionalnye interesy: priority i bezopasnost*, 2012, no. 22 (163), pp. 37–47. (In Russian).
2. Lobanova H.A. *Protivopozharnaya zashchita sistem bezopasnosti novykh AES* [Fire protection of new NPP safety systems. Dissertation]. Moscow, 2006, 209 p. (In Russian).
3. Kovalevich O.M. Environmental safety, technological risks, sustainable development of Russia and nuclear energy of Russia. (Conference proceedings) *Ekologicheskaya bezopasnost, tekhnogennyye riski i ustoichivoe razvitie*. Moscow, 2002. pp. 54–57. (In Russian).
4. *Metodika analiza vliyaniya pozharov i ikh posledstviy na bezopasnyi ostanov i raskholazhivanie reaktornoj ustanovki* [Methods for analyzing the effects of fires and their consequences on safe shutdown and cooling down of a reactor facility]. Moscow, Rosenergoatom, 1998. (In Russian).
5. Goncharenko S.N., Parsegov A.S. Modeling and risk assessment of the operation of industrial equipment in domestic and foreign studies. *Upravlenie riskom*, 2013, no. 2 (66), pp. 35–43. (In Russian).
6. Lachikhina A.B. Probabilistic model of database transaction realization. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, vol. 3, no. 4., pp. 25–37. (In Russian).
7. Chumak D. Yu., Shchepetina T. D. Risk classification as a necessary management element in nuclear power projects. *Atomic Energy*, 2014, vol. 116, no. 2, pp. 144–149. (In Russian).
8. Goncharenko S.N., Dementeva E.V. Review of domestic and foreign studies on the risk analysis of emergencies at a mining enterprise. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten*, 2010, no. 10, pp. 177–185. (In Russian).
9. Goncharenko A.N. Development of methods for integrating information technology into the business processes of a mining enterprise. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2011, no. 11, pp. 17–24. (In Russian).
10. Fedunets N.I., Goncharenko A.N. Innovative approach to determining the structure of software solutions for industrial enterprise business processes. *Programmnye produkty i sistemy*, 2012, no. 1, p. 18. (In Russian).
11. Vyatkin V.N., Gamza V.A., Maevskii F.V. *Risk-menedzhment* [Risk management]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Yurait Publ., 2017, 365 p. (In Russian).
12. Khokhlov N.V. *Upravlenie riskom* [Risk management]. Moscow, Yuniti Dana, 1999, 239 p. (In Russian).

## AUTHORS

**Goncharenko Sergey**, D. Sc., professor, National University of Science and Technology (MISiS), 4, Leninskiy prospekt, Moscow, 1199049, Russian Federation, tel.: +7 (499) 230-28-11, e-mail: gs16@mail.ru.

**Yaroshhuk Irina**, Ph. D., assistant professor, National University of Science and Technology (MISiS), 4, Leninskiy prospekt, Moscow, 1199049, Russian Federation, tel.: +7 (499) 230-28-11, e-mail: irvic@mail.ru.