

УДК 614.8; 621.311.2; 621.039

И.С. Фогилев, А.Д. Ищенко

(Академия ГПС МЧС России; e-mail: galich_ivan@mail.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕЙСТВИЙ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА ПРИ ПОЖАРЕ В ПОМЕЩЕНИЯХ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Рассмотрены вопросы оценки временных характеристик действий оперативного персонала при пожарах в помещениях атомных электростанций до прибытия подразделений пожарной охраны. Показана возможность применения математического аппарата интервального анализа к оценке временных характеристик действий оперативного персонала АЭС. Данный подход проиллюстрирован на примере первичных действий персонала при пожаре в машинном зале и на щите управления АЭС.

Ключевые слова: атомная электростанция, оперативный персонал, щит управления, машинный зал, пожарная безопасность, интервальный анализ.

Общие положения

В природе многие процессы могут складываться из нескольких операций, обладающих временными характеристиками. Эти характеристики являются, как правило, недетерминированными – вероятностными [1], нечёткими [2] или интервальными [3]. Моделирование таких процессов может предусматривать совершение алгебраических действий с недетерминированными величинами – сложение, вычитание, перемножение, деление, взятие функций. Действия с вероятностными величинами рассмотрены, например, в [1, 4], действия с нечёткими величинами – в [2, 5], действия с интервальными величинами – в [3, 4]. Результатом вычислений будут соответственно вероятностные, нечёткие и интервальные величины.

Основы интервального исчисления

В дальнейшем применительно к вопросам обеспечения пожарной безопасности на атомных электростанциях [6] будут рассмотрены вопросы действий с интервальными величинами. При этом используются следующие положения [4, 7]:

а) интервальное число $[x] = [x_m, x_6]$ равномерно распределено на отрезке с левой границей x_m и правой границей x_6 .

б) в результате действий с двумя интервальными числами $[x_1]$ и $[x_2]$ также получается интервальное число $[y] = [y_m, y_6]$, границы которого определяются по выражению:

$$\begin{bmatrix} y_m \\ y_6 \end{bmatrix} = \alpha_1 \mp \sqrt{3(\alpha_2 - \alpha_1^2)}, \quad (1)$$

где α_1, α_2 – параметры (начальные моменты), которые для некоторых алгебраических действий приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Начальные моменты для определения границ результирующего
интервального числа при арифметических действиях**

Действие	$[y] = f([x_1], [x_2])$	α_1	α_2
Сложение, вычитание	$[y] = [x_1] \pm [x_2]$	$\frac{x_{1м} + x_{1б} \pm x_{2м} \pm x_{2б}}{2}$	$\pm \frac{(x_{1м} + x_{1б})(x_{2м} + x_{2б})}{2} +$ $+\frac{x_{1м}^2 + x_{1м}x_{1б} + x_{1б}^2 + x_{2м}^2 + x_{2м}x_{2б} + x_{2б}^2}{3}$
Умножение	$[y] = [x_1][x_2]$	$\frac{(x_{1м} + x_{1б})(x_{2м} + x_{2б})}{4}$	$\frac{(x_{1м}^2 + x_{1м}x_{1б} + x_{1б}^2)(x_{2м}^2 + x_{2м}x_{2б} + x_{2б}^2)}{9}$
Деление	$[y] = \frac{[x_1]}{[x_2]}$	$\frac{x_{1м} + x_{1б}}{2(x_{2б} - x_{2м})} \ln \frac{x_{2б}}{x_{1м}}$	$\frac{x_{1м}^2 + x_{1м}x_{1б} + x_{1б}^2}{3x_{2м}x_{2б}}$
Обратная величина	$[y] = \frac{1}{[x_1]}$	$\frac{1}{x_{1б} - x_{1м}} \ln \frac{x_{1б}}{x_{1м}}$	$\frac{1}{x_{1м}x_{1б}}$

Примечание: границы интервалов могут быть определены экспертными методами или по результатам экспериментов

При алгебраических действиях над n интервальными числами $[x_1], [x_2], \dots, [x_n]$ сохраняются правила аддитивности и коммутативности [8]. Например, при сложении трёх ($n = 3$) интервальных чисел:

$$[y] = [x_1] + [x_2] + [x_3] = [x_1] + [x_4] = [x_3] + [x_5], \quad (2)$$

где $[x_4] = [x_2] + [x_3]$; $[x_5] = [x_1] + [x_2]$.

При сложении/умножении:

$$[y] = [x_1]([x_2] + [x_3]) = [x_1][x_2] + [x_1][x_3] = [x_3][x_1] + [x_1][x_2]. \quad (3)$$

В частном случае, когда имеет место "цепочка" сложений, можно использовать следующее правило: математическое ожидание y_{cp} результирующей интервальной величины $[y]$ равно сумме математических ожиданий суммируемых чисел, а дисперсия D_y – сумме дисперсий¹.

Из этого следует соотношение:

$$\begin{bmatrix} y_m \\ y_b \end{bmatrix} = 0,5 \left[\sum_{i=1}^n (x_{iм} + x_{iб}) \mp \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{iб} - x_{iм})^2} \right]. \quad (4)$$

Далее будут рассмотрены примеры использования данного подхода к оценке временных характеристик действий оперативного персонала **атомной электростанции (АЭС)** до прибытия пожарных подразделений.

¹ в [9] это показано на примере эвакуации людей при эрланговских распределениях

Примеры расчёта

1. Требуется дать оценку суммарного времени действий оперативного персонала при пожаре на щите управления АЭС.

Известно, что эти действия состоят из пяти ($n = 6$) этапов [10], а продолжительность каждого этапа – интервальная величина $[t_{iM}, t_{iO}]$, приведённая в табл. 2.

Таблица 2

Временные характеристики этапов действий оперативного персонала при пожаре на щите управления АЭС

Этап	$t_{iM}, \text{мин.}$	$t_{iO}, \text{мин.}$
1. Получение сигнала о пожаре	0,5	1,5
2. Надевание средств индивидуальной защиты, подключение дыхательных аппаратов со сжатым воздухом	4	5
3. Сбор информации, проведение переключений	2	3
4. Тушение пожара первичными средствами пожаротушения	3	5
5. Выход из непригодной для дыхания среды, переход на запасной щит управления	2	4
6. Передача информации прибывающим пожарным	1	3

Из выражения (4):

$$\begin{bmatrix} y_M \\ y_6 \end{bmatrix} = 0,5[1 + 1,5 + 4 + 5 + 2 + 3 + 3 + 5 + 2 + 4 + 1 + 3 \mp \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2}] = 17,00 \mp 3,87.$$

Таким образом, получена интервальная оценка общего времени действий оперативного персонала при пожаре на ЩУ: $[y] = [13,13; 20,87]$ мин.

2. Требуется дать оценку суммарного времени действий оперативного персонала при пожаре в машинном зале АЭС.

Известно, что эти действия состоят из шести ($n = 8$) этапов [10], а продолжительность каждого этапа – интервальная величина $[t_{iM}, t_{iO}]$, приведённая в табл. 3.

Таблица 3

Временные характеристики этапов действий оперативного персонала при пожаре в машинном зале АЭС

Этап	$t_{iM}, \text{мин.}$	$t_{iO}, \text{мин.}$
1. Обнаружение пожара	0,5	1,5
2. Сообщение начальнику смены станции, в пожарно-спасательную часть по охране АЭС	1	3
3. Время сбора средств индивидуальной защиты	1	3
4. Движение к месту пожара	5	6
5. Надевание средств индивидуальной защиты, подключение дыхательных аппаратов со сжатым воздухом	4	5
6. Сбор информации, переключения, тушение	2	3
7. Выход из опасной зоны	2	4
8. Передача информации прибывающим пожарным	1	3

Из выражения (4):

$$\begin{bmatrix} y_m \\ y_6 \end{bmatrix} = 0,5[0,5 + 1,5 + 1 + 3 + 1 + 3 + 5 + 6 + 4 + 5 + 2 + 3 + 2 + 4 + 1 + 3 \mp \\ \mp \sqrt{1^2 + 2^2 + 2^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 2^2 + 2^2}] = 22,50 \mp 4,47.$$

Таким образом, получена интервальная оценка общего времени действий оперативного персонала при пожаре в машинном зале АЭС: $[y] = [18,03; 26,97]$ мин.

Выводы

С использованием интервального анализа становится возможным с большей объективностью оценивать временные характеристики действий оперативного персонала при пожарах на атомных электростанциях. Это, в свою очередь, позволит пожарно-спасательным подразделениям по охране АЭС объективно планировать действия по тушению пожаров, а учебно-тренировочным центрам АЭС эффективно готовить должностных лиц станции к действиям при возникновении пожаров в помещениях АЭС в начальной стадии их развития.

Литература

1. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1998. 576 с.
2. *Пегат А.* Нечёткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.
3. *Жолен Л., Кифер М., Дидри О., Вальтер Э.* Прикладной интервальный анализ. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 468 с.
4. *Таранцев А.А.* Случайные величины и работа с ними: учеб.-метод. пос. СПб.: изд. дом "Петрополис", 2011. 160 с.
5. *Борисов В.В., Федулов А.С., Зернов М.М.* Основы нечёткой арифметики: учеб. пос. для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 98 с.
6. *Пузач С.В., Лебедченко О.С, Ищенко А.Д., Фогилев И.С.* Временной механизм воздействия опасных факторов пожара на персонал АЭС и комплексная защита от них // Пожаровзрывобезопасность. № 8. 2017. С. 15-24.
7. *Таранцев А.А.* О связи интервального анализа с теорией вероятностей // Заводская лаборатория. Т. 70. № 3. С. 60-65.
8. *Бронштейн Н.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1986. 544 с.
9. *Таранцев А.А., Нодь А.П.* О суммировании случайных величин (на примере оценки движения мобильных объектов) // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. № 4. 2015. С. 112-120.
10. *Фогилев И.С., Ищенко А.Д.* Моделирование действий оперативного персонала атомной электростанции в условиях развития опасных факторов пожара // Пожары и чрезвычайные ситуации, предотвращение, ликвидация. 2018. № 1 (в печати).

Статья поступила в редакцию интернет-журнала 18 ноября 2017 г.

I.S. Fogilev, A.D. Ishchenko

APPLICATION OF THE INTERVAL ANALYSIS TO ESTIMATING TIME CHARACTERISTICS OF OPERATIONAL BRIGADES ACTIONS IN FIRE IN THE ENTIRE ATOMIC POWER STATIONS

The issues of assessing the time characteristics of the actions of operational staff in case of fire on important energy facilities before the arrival of fire brigade was analyzed. A feature of the work of the staff of power facilities is a multi-shift round-the-clock regime as part of operational brigades that monitor the technological process of the electricity generation. In cases of fires, operational staff is the first who begins to evacuate people, to control process equipment under the influence of dangerous fire factors, to collect information about the incident, and also takes actions to extinguish the fire by primary fire extinguishing means. The analysis of moving the fire brigades to the location of call (for the example of NPP) showed a time range of 2 to 35 minutes. At the same time, executed research of the dynamics of the development of fires in typical rooms of power facilities showed the need to eliminating the fire in the next few minutes. If it is not possible to eliminate the fire by the operative staff, then, according to experts, catastrophic technogenic consequences are possible.

The possibility of using the mathematical apparatus of interval analysis to evaluate the time characteristics of the actions of operational staff of power facilities was considered by the authors of the article considered. This approach is illustrated by the example of an estimation of the total time of primary actions of operational staff in case of a fire in the engine room and the control panel of the NPP.

It should be noted that of interval analysis, it becomes possible to assess the time characteristics of the actions of staff in case of fire at energy facilities with the use of the mathematical apparatus with more objectivity and, ultimately, will allow objectively plan actions to extinguish fires in the initial stage of development.

Key words: nuclear power plant, operational personnel, control board, machine room, fire safety, interval analysis.

References

1. Venttsel E.S. *Teoriia veroiatnostei: ucheb. dlia vuzov* [Probability theory: textbook for high schools]. Moscow, Vysshaya shkola, 1998, 576 p.
2. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Moscow, BINOM. Laboratoriia znaniy Publ., 2009, 798 p.
3. Zholen L., Kifer M., Didri O., Valter E. *Prikladnoi intervalnyi analiz* [Applied interval analysis]. Moscow, Izhevsk, Institute of Computer Science Publ., 2005, 468 p.
4. Tarantsev A.A. *Sluchainye velichiny i rabota s nimi: ucheb.-metod. pos.* [Random variables and work with them: textbook]. Saint-Petersburg: izd. dom "Petropolis" Publ., 2011. 160 p.
5. Borisov V.V., Fedulov A.S., Zernov M.M. *Osnovy nechetkoi arifmetiki: ucheb. pos. dlia vuzov* [Basics of fuzzy arithmetic: textbook for high schools]. Moscow, Goriachaia liniia – Telekom Publ., 2014. 98 p.
6. Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Ishchenko A.D., Fogilev I.S. Temporal mechanism impact hazard fire on nuclear power plants staff and comprehensive protection against them. *Pozharovzryvobezopasnost*, no 8, 2017, pp. 15-24.
7. Tarantsev A.A. O svyazi intervalnogo analiza s teoriei veroiatnostei [On the connection of interval analysis with probability theory]. *Zavodskaya laboratoriia*, vol. 70, no 3, pp. 60-65.
8. Bronshtein N.N., Semendiaev K.A. *Spravochnik po matematike dlia inzhenerov i uchashchikhsia vuzov* [Handbook of mathematics for engineers and University students]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 544 p.
9. Tarantsev A.A., Nod A.P. On the summation of random variables (by the example of the time of motion of mobile objects). *Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii*, no 4, 2015, pp. 112-120.
10. Fogilev I.S., Ishchenko A.D. The model of nuclear power plant operating personnel actions under the development of the fire dangerous factors. *Pozhary i chrezvychainye situatsii, predotvrashchenie, likvidatsiia*, 2018, no 1 (in print).