ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 6, с. 538–542

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.039

ВЫБОР И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ВЭ ОИАЭ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ СХЕМЫ МОНТЕ-КАРЛО

© 2020 г. А. В. Крянев[1,3,*], В. В. Бочкарев[1,2], Б. Д. Бриллиантов[1,2], С. Г. Климанов[1]

[1] Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409 Россия

[2] НТЦ ядерной и радиационной безопасности, Москва, 107140 Россия

[3] Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

**e-mail: avkryanev@mephi.ru*

Поступила в редакцию 20.09.2020 г.
После доработки 20.10.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

В статье приводится новая схема выбора оптимального варианта вывода из эксплуатации (ВЭ) типового объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) и анализа его устойчивости с помощью метода Монте-Карло. Согласно предлагаемой схеме выбор оптимального варианта осуществляется путем многократной реализации с помощью метода Монте-Карло значений частных показателей для каждого рассматриваемого варианта ВЭ, ранжирования вариантов по комплексному показателю в порядке их убывания и подсчетом суммарного количества мест для каждого варианта. Оптимальным вариантом считается тот, у которого суммарное количество мест оказывается минимальным. Аналогично проводится анализ устойчивости выбранного варианта ВЭ ОИАЭ, для которого подсчитывается введенный показатель устойчивости. Проведенные численные эксперименты показали эффективность разработанной схемы выбора оптимального варианта ВЭ ОИАЭ и его устойчивости в условиях неопределенности исходных данных. В статье приведены результаты численных расчетов выбора оптимального варианта ВЭ и его устойчивости для условно реального объекта.

Ключевые слова: вывод из эксплуатации (ВЭ), объекты использования атомной энергии (ОИАЭ), ядерно-радиационная безопасность (ЯРБ), оптимальный вариант, показатели, устойчивость, неопределенность, схема Монте-Карло

DOI: 10.1134/S2304487X20050077

1. ВВЕДЕНИЕ

Исходные данные, на основе которых определяется процесс ВЭ ОИАЭ, известны с неопределенностями, что порождает неопределенности в расчетных моделях, на основе которых рассчитываются числовые значения показателей ЯРБ исходного и последующих состояний выводимого из эксплуатации ОИЯЭ. Неопределенности значений показателей присутствуют и для тех показателей, которые предварительно рассчитываются, и для тех показателей, для которых даются экспертные оценки. Поэтому, для разработки схемы и основанного на ней алгоритма оценки вариантов ВЭ ОИАЭ и исследования устойчивости выбранного оптимального варианта для математического описания неопределенности в значениях входных данных необходимо использовать, как аппарат теории вероятностей, когда входные данные получены расчетным путем, так и аппарат нечетких множеств, когда входные данные получены путем экспертных оценок [1–8].

Согласно предложенной схеме выбор оптимального варианта осуществляется путем многократной реализации с помощью метода Монте-Карло значений частных показателей для каждого рассматриваемого варианта ВЭ, ранжирования вариантов по комплексному показателю в порядке их убывания и подсчетом суммарного количества мест для каждого варианта. Оптимальным вариантом считается тот, у которого суммарное количество мест оказывается минимальным.

2. ВЫБОР И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ВЭ ОИАЭС ПОМОЩЬЮ СХЕМЫ МОНТЕ-КАРЛО

Ниже приводится схема выбора оптимального варианта ВЭ ОИАЭ и анализа его устойчивости, основанная на многократной реализации с помощью метода Монте-Карло значений частных показателей для каждого рассматриваемого варианта ВЭ, ранжирования вариантов по комплексно-

му показателю в порядке их убывания и подсчетом суммарного количества мест для каждого варианта, на основе которого определяется показатель устойчивости найденного оптимального варианта ВЭ ОИАЭ.

Входными данными для рассматриваемой схемы являются:

1) Количество вариантов ВЭ – n;

2) Количество частных показателей $K_{ij} - m$ (их наименования и нумерация);

3) Интервалы изменения частных показателей K_{ij} (формула 1) в условиях неопределенности

$$K_{ij} \in [x_{ij\min},\ x_{ij\max}] \qquad (1)$$
$$i = \overline{1,n};\quad j = \overline{1,m}$$

Замечание. Считается, что:

a) Интервалы (1) соответствуют экспертным оценкам, когда они задаются экспертами;

b) Соответствуют интервалам $\bar{K}_{ij} \pm 2\sigma_{ij}$, когда они задаются нормальным распределением;

c) В дальнейших расчетах будет считаться, что интервалы (1) соответствуют нормальному распределению на интервале $\bar{K}_{ij} \pm 2\sigma_{ij} N(\bar{K}_{ij}; 2\sigma_{ij})$,

где

$$\bar{K}_{ij} = \frac{\bar{K}_{ij\max} + \bar{K}_{ij\min}}{2}, \qquad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\bar{K}_{ij\max} + \bar{K}_{ij\min}}{4}; \qquad (3)$$

d) Распределение K_{ij} как случайных величин независимых друг от друга;

4) Значения коэффициентов приоритета частных показателей относительно друг друга w_j, $j = \overline{1,m}$ (можно в шкале $0 \le w_j \le 100$ или в шкале $0 \le w_j \le 1$);

5) Указано, что показатели $j = \overline{1,m_1}$ – чем больше, тем лучше, а показатели $j = \overline{m_1+1,m}$ – чем меньше, тем лучше.

Ниже представлен алгоритм расчета приоритетов вариантов и построение гистограмм распределения комплексного показателя K_i, $i = \overline{1,n}$ для каждого варианта ВЭ.

Разыгрывается набор значений частных показателей $K_{ijk}, k = \overline{1,N}$ для каждого варианта (k – номер розыгрыша). Для розыгрыша используется датчик нормального распределения случайной величины $N(\bar{K}_{ij}; 2\sigma_{ij})$ (см. (2)).

Замечание. Если разыгранное значение K_{ijk} удовлетворяет неравенству $K_{ijk} < \bar{K}_{ij} - 2\sigma_{ij}$, то полагаем $K_{ijk} = \bar{K}_{ij} - 2\sigma_{ij}$.

Аналогично, если $K_{ijk} > \bar{K}_{ij} + 2\sigma_{ij}$, то полагаем $K_{ijk} = \bar{K}_{ij} + 2\sigma_{ij}$.

Ниже приведена последовательность дальнейших шагов реализации алгоритма, реализующего последовательность розыгрышей.

1) Производится нормировка всех частных показателей для каждого розыгрыша $k = \overline{1,N}$ отдельно (формулы 4 и 5):

$$K^H_{ijk} = \frac{K_{ijk} - K_{jk\min}}{K_{jk\max} - K_{jk\min}};\ \text{для}\ j = \overline{1,m_1}; \qquad (4)$$

$$K^H_{ijk} = \frac{K_{jk\max} - K_{ijk}}{K_{jk\max} - K_{jk\min}};\ \text{для}\ j = \overline{m_1,m} \qquad (5)$$

где $K_{jk\min} = \min\limits_{i=1,n}\{K_{ijk}\}$, $K_{jk\max} = \max\limits_{i=1,n}\{K_{ijk}\}$.

Все нормированные значения K^H_{ijk} частных показателей принадлежат интервалу [0, 1].

2) Для каждого фиксированного $k = \overline{1,N}$ и каждого варианта ВЭ подсчитывается комплексный показатель:

$$K_{ik} = W_1 K^H_{i1k} + \ldots + W_m K^H_{imk}, \quad i = 1,\ldots,n, \qquad (6)$$

где $W_j, j = 1,\ldots,m, \sum_{j=1}^{m} W_j = 1$, – коэффициенты приоритета частных показателей;

3) Для каждого варианта ВЭ строится гистограмма распределения комплексного показателя.

Примеры результатов численных расчетов распределения комплексного показателя приведены на рис. 1, 2;

4) Производится ранжирование (для каждого фиксированного $k = \overline{1,N}$ отдельно) комплексного показателя:

$$K_{(1)k} \ge K_{(2)k} \ge \ldots \ge K_{(n)k} \qquad (7)$$

и подсчитывается суммарное число позиций в (7) для каждого варианта ВЭ:

$$n_i^+ = \sum_{k=1}^{N} (n)_{(i_k)k}, \quad i = \overline{1,n}, \qquad (8)$$

где $(n)_{(i_k)k}$ – номер позиции i-го варианта ВЭ при k-м розыгрыше.

Вариант i^*c наименьшим $n_i^+ (n_{i^*}^+ = \min\limits_{i=1,n}\{n_i^+\})$ является оптимальным.

В частности, если $n_{i^*}^+ = N$ (минимально возможное), то вариант ВЭ с номером i^* назовем абсолютно приоритетным или абсолютно устойчивым, в противном случае, если $n_{i^*}^+ > N$, то вариант с номером i^* будем называть относительно устойчивым;

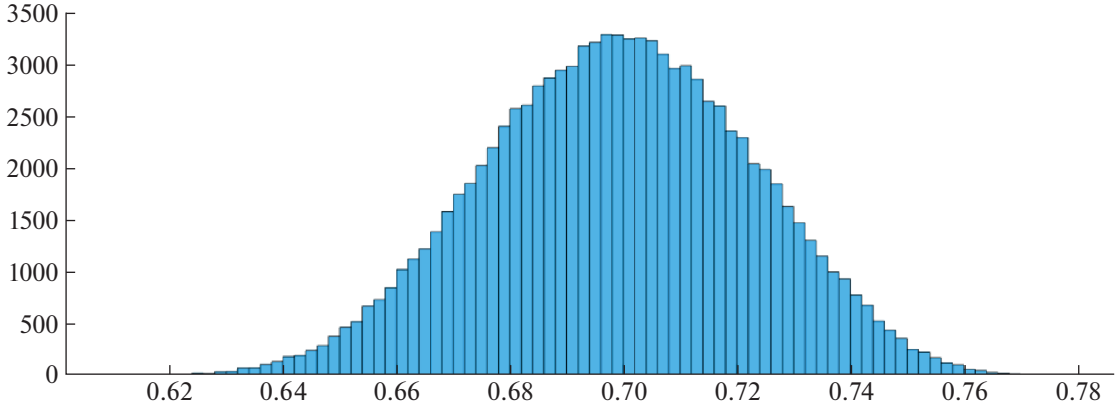

Рис. 1. Пример гистограммы распределения комплексного показателя.

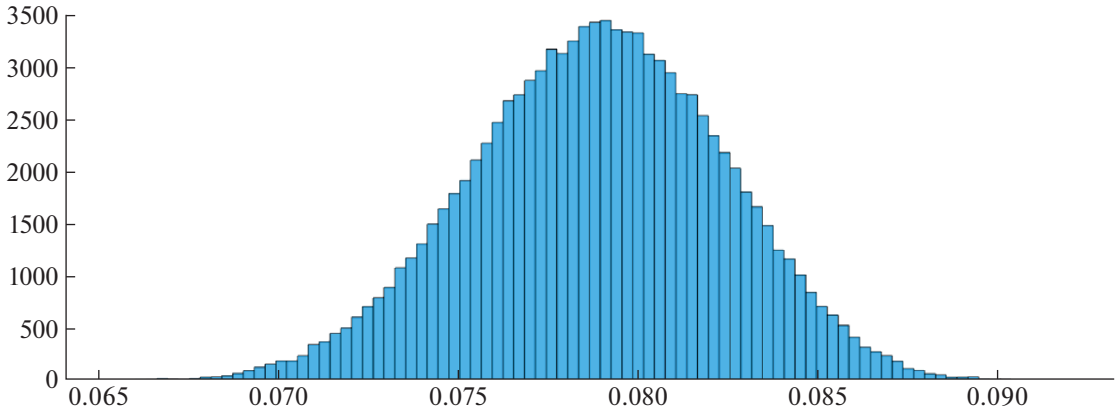

Рис. 2. Пример гистограммы распределения комплексного показателя.

5) Вычисляем показатель устойчивости оптимального варианта ВЭ ОИАЭ:

$$St_{i^*} = \frac{nN - n_i^+}{nN - N}. \quad (9)$$

Показатель устойчивости оптимального варианта ВЭ с номером i^* равен 1, если этот вариант абсолютно устойчив.

Чем больше St_{i^*} (чем ближе St_{i^*} к 1) для варианта ВЭ с номером i^*, тем устойчивее этот оптимальный вариант.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена новая схема выбора оптимального варианта ВЭ типового ОИАЭ и анализа его устойчивости с помощью метода Монте-Карло. Предлагается схема выбора оптимального варианта на основе многократной реализации с помощью метода Монте Карло значений частных показателей для каждого рассматриваемого варианта ВЭ, ранжирования вариантов по комплексному показателю в порядке их убывания и подсчетом суммарного количества мест для совокупности реализаций частных показателей для каждого варианта ВЭ. Оптимальному варианту соответствует тот, у которого суммарное количество мест оказывается минимальным. Введен новый показатель устойчивости выбранного варианта ВЭ ОИАЭ. Представлены результаты численных экспериментов, которые показали эффективность разработанной схемы выбора оптимального варианта ВЭ ОИАЭ и его устойчивости в условиях неопределенности исходных данных.

В статье представлены результаты научных исследований, выполненные в рамках договора № 313/1685-Д, финансируемого АО “Наука и инновации”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Емец П.Е., Крянев А.В.* Инвестиционная эффективность вывода из эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов (ЯРОО) // Ядерная и радиационная безопасность. 2011. № 1 (59). С. 10–19.

2. *Бочкарев В.В., Крянев А.В., Ханбикова Д.Т.* Ранжирование ядерно- и радиационно-опасных объектов, эксплуатация которых прекращена. "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем": материалы Всероссийской конференции с международным участием, М.: РУДН, 2014. С. 195–197.

3. Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities. IAEA, 2017. 68 p.

4. *Крянев А.В., Лукин Г.В.* Математические методы обработки неопределенных данных. М.: Физматлит, 2006.

5. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981.

6. *Пегат А.*. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.

7. *Семёнов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крянев А.В.* Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М.: URSS, 2015.

8. РБ-153-18 "Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии". Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 декабря 2018 г. № 666. 22 с.

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 6, pp. 538–542

Selection and Analysis of the Stability of the Optimal Variant of the Decommissioning of Nuclear Facilities under the Conditions of Uncertainty of the Initial Data using a Monte Carlo Method

A. V. Kryanev[a,c,#], V. V. Bochkarev[a,b], B. D. Brilliantov[a,b], and S. G. Klimanov[a]

[a] *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

[b] *Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, 107140 Russia*

[c] *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia*

[#] *e-mail: avkryanev@mephi.ru*

Received September 20, 2020; revised October 20, 2020; accepted November 10, 2020

Abstract—A new scheme has been presented to select the optimal option for decommissioning of a typical nuclear facility and to analyze its stability using the Monte Carlo method. According to the proposed scheme, the optimal option is chosen by multiple Monte Carlo realizations of the particular indicators for each considered option of decommissioning, ranking the options according to the complex indicator in descending order, and calculating the total number of places for each option. The option with the minimum total number of seats is the best. Similarly, the analysis of the stability of the selected decommissioning variant of the nuclear power plant is carried out, for which the entered stability indicator is calculated. The numerical experiments have shown the efficiency of the developed scheme for choosing the optimal variant of the decommissioning of a nuclear facility and its stability under conditions of uncertainty in the initial data. The optimal variant of decommissioning and its stability for a conditionally real object have been numerically calculated.

Keywords: decommissioning (DC), nuclear facilities (NFs), nuclear and radiation safety (NRS), optimal option, indicators, stability, uncertainty, Monte Carlo scheme

DOI: 10.1134/S2304487X20050077

REFERENCES

1. Emets P.E., Kryanev A.V., *Investitsionnaya effektivnost vivoda iz ekspluatatsii yaderno i radiatsionno opasnih obektov (YaROO)* (Investment efficiency of decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities (NROO)), *Nuclear and Radiation Safety*, 2011, no. 1 (59), pp. 10–19.

2. Bochkarev V.V., Kryanev A.V., Hanbikova D.T., *Ranjirovanie yaderno i radiatsionno opasnih obektov, ekspluatatsiya kotorih prekrashena, "Informatsionno-tielekommunikatsionnie tehnologii i matematicheskoe modelirovanie vicokotehnologicheskih system": materiali Vserossiskoi konferentsii s mejdunarodnim uchastiem* (Ranking of Nuclear and Radiation Hazardous Facilities Whose Operation has been Discontinued, "Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems": Materials of the All-Russian Conference with International Participation), Moscow: PFUR, 2014, pp. 195–197 (in Russian).

3. Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities, IAEA, 2017. 68 p.

4. Kryanev A.V., Lukin G.V., *Matematicheskie metodi obrabotki neopredelennih dannih* (Mathematical Methods for Processing Uncertain Data), M.: Fizmatlit, 2006.
5. Orlovskii S.A., *Problemi prinyatiya reshenii pri nechetkoi ishodnoi informatsii* (Decision Problems with Fuzzy Source Information), M.: Nauka, 1981.
6. Pegat, A., *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy-modelingandcontrol), M.: BINOM. Knowledge Laboratory, 2009.
7. Semenov S.S., Voronov E.M., Poltavskii A.V., Kryanev A.V., *Metodi prinyatiya reshenii v zadachah otsenki kachestva i tehnicheskogo urovnya slojnih tehnicheskih system* (Decision-Making Methods for Assessing the Quality and Technical Level of Complex Technical Systems), M.: URSS, 2015.
8. RB-153-18 *"Rekomendatsii po obosnovaniu vibora variant vivoda iz ekspluatatsii obektov is polzovaniya atomnoi energii", Utverjdteno prikazom Federalnoi slujbi po ecologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 29 dekabrya 2018 g.* ("Recommendations on the Justification of the Choice of Option for Decommissioning of Nuclear Facilities", Approved by order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of December 29, 2018"), Moscow, no. 666, 22 p.