

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОИАЭ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЯРБ

В. В. Бочкарев^{1,2}, Б. Д. Бриллиантов^{1,2}, С. Г. Климанов², А. В. Крянев², Д. С. Смирнов²

¹ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Статья поступила в редакцию 26 октября 2021 г.

Подготовлена по материалам доклада на Третьей международной научно-практической конференции «Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров», ФГУП «РАДОН», 22–23 сентября 2021 г.

В статье приведены схема и алгоритм выбора оптимальных технологических операций при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии (ВЭ ОИАЭ), а также определена степень устойчивости выбранного варианта технологических операций в условиях неопределенности исходных данных комплексного инженерного и радиационного обследования (КИРО), которые порождают неоднозначность показателей. Этот выбор производится на основе комплексного показателя, объединяющего в виде линейной суперпозиции частные данные для каждого рассматриваемого способа ВЭ. Наилучшее решение принимается путем многократной реализации метода Монте-Карло для значений частных показателей в каждом рассматриваемом случае, ранжирования их по комплексному показателю в порядке убывания и подсчета суммарного количества мест, минимальное из которых считается оптимальным вариантом.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, объект использования атомной энергии (ОИАЭ), вывод из эксплуатации (ВЭ), технологические операции, оптимальный вариант, частные показатели, комплексный показатель, погрешности, среднеквадратическое отклонение (СКО), метод Монте-Карло, устойчивость выбранного варианта.

Оценка вариантов реализации ВЭ ОИАЭ

Ниже представлен перечень некоторых основных типовых физических характеристик конструкций, необходимых для расчета показателей выводимого из эксплуатации объекта.

Каждая конструкция имеет неопределенные числовые значения характеристик, задаваемые парой величин — средним значением (математическим ожиданием), P_{cp} и СКО, σ_n :

1) материальный объем (вес, площадь, длина с указанием качественной характеристики материалов, учитываемой в расчетах показателей

технологических операций по демонтажу, дезактивации, переработке, транспортировке, захоронению, и другие);

2) характеристика (показатели) радиационного заражения (объем РАО, его тип и другие).

Каждой конструкции (элементу) соответствует набор нескольких возможных технологических операций по ВЭ. Для каждой пары «конструкция — технологическая операция» рассчитаны частные показатели с погрешностями, описываемые СКО, — σ .

В качестве базовых частных показателей, характеризующих как пару «конструкция — технологическая операция», так и вариант выбора технологических операций в целом, взят следующий их набор:

- 1) стоимость работ — CP_i, σ_{CPi} ;
- 2) длительность работ — $ДЛ_i, \sigma_{ДЛi}$;
- 3) дозовая нагрузка на персонал — $ДНП_i, \sigma_{ДНPi}$;
- 4) дозовая нагрузка на население — $ДНН_i, \sigma_{ДНNi}$;
- 5) воздействие на окружающую среду (объемы выбросов и сбросов РВ) — $ВС_i, \sigma_{BCi}$.

Здесь $CP_i, ДЛ_i, ДНП_i, ВС_i, ДНН_i$ — средние значения частных показателей; $\sigma_{CPi}, \sigma_{ДЛi}, \sigma_{ДНPi}, \sigma_{BCi}, \sigma_{ДНNi}$ — СКО этих показателей.

Для каждого варианта ВЭ с несколькими возможными технологическими операциями ($i=1, \dots, n$) подсчитывается комплексный показатель K_i :

$$K_i = \alpha_1 CP_{Hi} + \alpha_2 ДЛ_{Hi} + \alpha_3 ДНП_{Hi} + \alpha_4 ВС_{Hi} + \alpha_5 ДНН_{Hi}, \quad (1)$$

где $\alpha_j, j=1, \dots, 5$ — введенные (принятые) коэффициенты приоритета частных показателей $0 \leq \alpha_j \leq 1, \sum_{j=1}^5 \alpha_j = 1, CP_{Hi}, ДЛ_{Hi}, ДНП_{Hi}, ВС_{Hi}, ДНН_{Hi}$ — нормированные значения частных показателей, рассчитываемых, например для показателя CP_{Hi} , согласно ниже представленной формуле (2):

$$CP_{Hi} = (CP_{\max} - CP_i) / (CP_{\max} - CP_{\min}), \quad (2)$$

где: $CP_{\max} = \max(CP_1, \dots, CP_n); CP_{\min} = \min(CP_1, \dots, CP_n)$.

Аналогично производится нормирование остальных показателей и их СКО.

Разыгрываются значения частных показателей $K_{ijk}, k=1, N$ для каждого варианта выбора набора технологических операций $i=1, \dots, n, j=1, \dots, 5$ (k — номер розыгрыша). Для моделирования методом Монте-Карло используется датчик нормального распределения случайной величины $N(\bar{K}_{ij}; \sigma_{ij})$.

Для каждого варианта выбора набора технологических операций строится гистограмма распределения комплексного показателя (рис. 1).

Выбор оптимального варианта реализации ВЭ ОИАЭ

Производится ранжирование (для каждого фиксированного $k=1, N$ отдельно) комплексного показателя:

$$K_{(1)k} \geq K_{(2)k} \geq \dots \geq K_{(n)k} \quad (3)$$

и подсчитывается суммарное число позиций в (3) для каждого варианта выбора набора технологических операций:

$$n_i^+ = \sum_{k=1}^N (n)_{(i_k)k}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где $(n)_{(i_k)k}$ — номер позиции i -го варианта выбора набора технологических операций при k -м розыгрыше.

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

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

Вычисляем показатель устойчивости:

$$St_{i^*} = (nN - n_{i^*}^+) / (nN - N). \quad (5)$$

Для оптимального варианта выбора набора технологических операций с номером i^* он равен 1, если этот вариант абсолютно устойчив.

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

На рис. 1, 2 показаны гистограммы устойчивости по результатам расчета комплексного показателя и показателя устойчивости методом Монте-Карло для четырех вариантов выбора набора технологических операций.

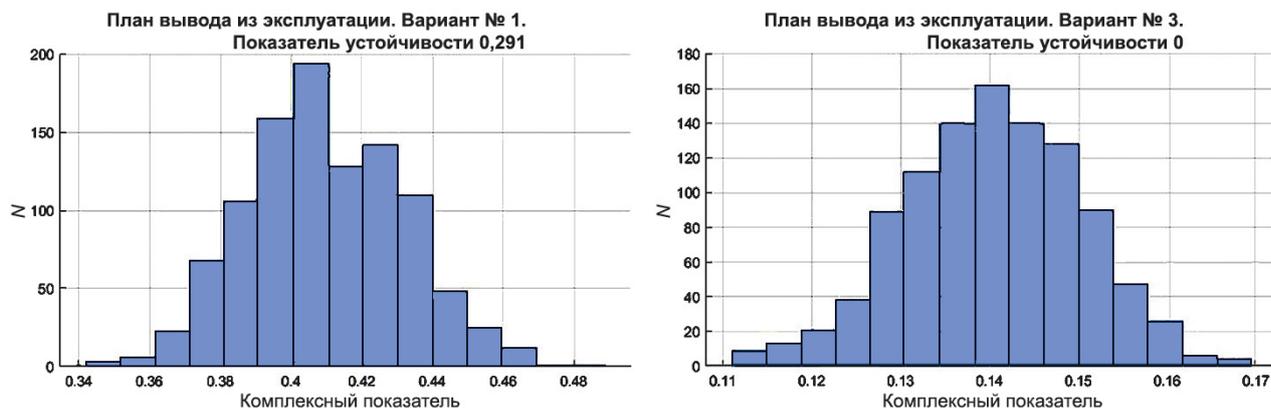


Рис. 1. Результаты расчета устойчивости методом Монте-Карло для вариантов № 1, 3 при равных коэффициентах приоритета частных показателей

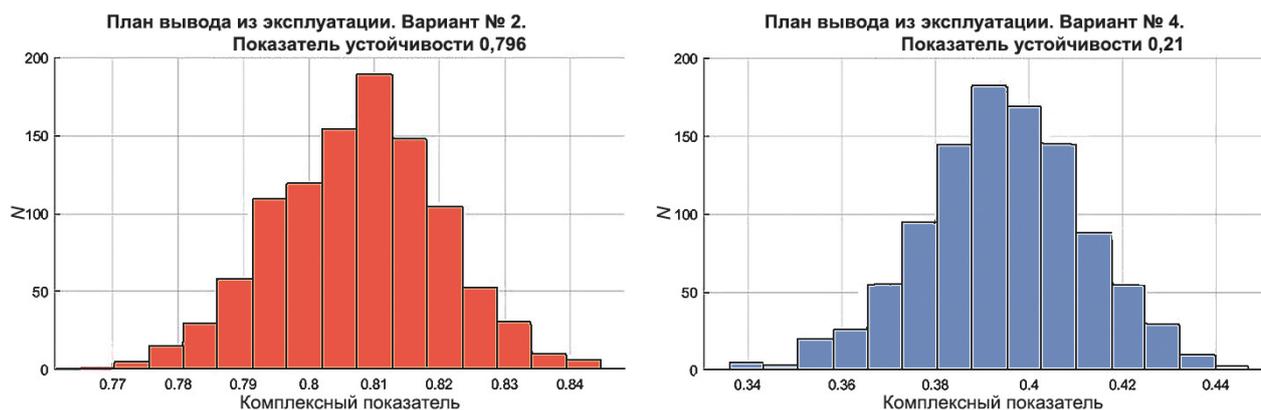


Рис. 2. Результаты расчета устойчивости методом Монте-Карло для вариантов № 2, 4 при равных коэффициентах приоритета частных показателей

Из рис. 1 и 2 видно, что второй вариант выбора набора технологических операций с показателем устойчивости, равным 0,796, является оптимальным и условно устойчивым.

Заключение

Отметим, что различным аспектам оценки вариантов реализации ВЭ ОИАЭ посвящены работы [1–7]. Представленная в данной статье схема использована в системе поддержки принятия оптимальных решений при ВЭ ОИАЭ [8]. В работе представлены результаты научных исследований, выполненных в рамках договора № 313/1685-Д, финансируемого АО «Наука и инновации».

Литература

1. НП-091-14. Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Общие положения.
2. Емец П. Е., Ковалевич О. М., Крянев А. В., Неретин В. А., Шарафутдинов Р. Б. Системный подход при финансировании мероприятий по выводу из эксплуатации ЯРОО, классифицируемых в зависимости от категории их ЯРО. Препринт МИФИ 005-2007. — М. : МИФИ, 2007. 23 с.
3. Емец П. Е., Крянев А. В. Схема системных оценок оптимального объема финансирования, направляемого на обеспечение ядерной и радиационной безопасности выводимых из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов // Аудит и финансовый анализ. 2010. № 3. С. 124–126.

4. Емец П. Е., Крянев А. В. Инвестиционная эффективность вывода из эксплуатации ядерно и радиационно-опасных объектов // Ядерная и радиационная безопасность. 2011. № 1 (59). С. 9–19.

5. Бочкарев В. В., Крянев А. В., Ханбикова Д. Т. Ранжирование ядерно и радиационно опасных объектов, эксплуатация которых прекращена // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем». Москва, РУДН, 22–25 апреля 2014, с. 195–197.

6. Bochkaev V. V., Kryanev A. V., Smirnov D. S. Mathematical decision support model for the decommissioning of nuclear power facilities. 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2018. Pp. 453–458.

7. Абакумова А. С., Бочкарев В. В., Крянев А. В. Обоснование выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2018. № 2 (88). С. 24–28.

8. Бочкарев В. В., Бриллиантов Б. Д., Крянев А. В., Бацулин А. А., Климанов С. Г., Литвиненко О. Ю., Мамай Д. В., Слива Д. Е., Смирнов Д. С., Стряпушкин П. А., Терешкин В. И., Ханбикова Д. Т. Структура системы поддержки принятия оптимальных решений при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Вестник НИЯУ МИФИ. 2020. Т. 9. № 3. С. 256–261.

Информация об авторах

Бочкарев Валерий Вячеславович, начальник отдела радиационной безопасности, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: bochkarev@secnrgs.ru; ведущий инженер, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31).

Бриллиантов Борис Дмитриевич, младший научный сотрудник, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: brilliantov@secnrs.ru; инженер, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31).

Климанов Сергей Геннадиевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: s.klimanov@mephi.ru.

Крянев Александр Витальевич, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: avkryanov@mephi.ru.

Смирнов Дмитрий Сергеевич, кандидат экономических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31), e-mail: dssmirnov@mephi.ru.

Библиографическое описание статьи

Бочкарев В. В., Бриллиантов Б. Д., Климанов С. Г., Крянев А. В., Смирнов Д. С. Обоснование оптимальных технических и организационных решений при выводе из эксплуатации ОИАЭ с учетом обеспечения ЯРБ // Радиоактивные отходы. 2021. № 4 (17). С. 60—64. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-60-64.

FEASIBILITY STUDY OF ENGINEERING AND ORGANIZATIONAL SOLUTIONS FOR NUCLEAR FACILITY DECOMMISSIONING WITH NRS PROVISIONS BEING ACCOUNTED FOR

Bochkarev V. V.^{1,2}, Brilliantov B. D.^{1,2}, Klimanov S. G.², Kryanov A. V.², Smirnov D. S.²

¹Scientific and Engineering Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

Article received on October 26, 2021

Prepared on materials of the Report for the Third International Scientific and Practical Conference on the Environmental Protection and the Management of Radioactive Waste from Scientific and Industrial Centers, FSUE RADON, September 22—23, 2021.

The report presents a flowchart and an algorithm allowing the selection of optimal process operations for the decommissioning of nuclear facilities. It also allows to evaluate the sustainability of the selected option considering the uncertainties associated with the initial data for the comprehensive engineering and radiation survey, which also generates uncertainties in the indicators available under the selected options. The choice of the optimal option is based on a complex indicator integrating particular indicators in the form of a linear superposition for each considered decommissioning option. The optimal option is selected by repeated implementation of particular indicators for each considered option using the Monte Carlo method. Then the options are ranked according to the complex indicator in a descending order with the total number of positions calculated for each option. The best option is the one with the minimum total number of positions.

Keywords: radioactive waste, nuclear facilities (NF), decommissioning (DE), process operations, optimal option, particular indicators, complex indicator, the Monte Carlo method, sustainability of the selected option.

References

1. NP-091-14. Obespechenie bezopasnosti pri vyvode iz ehkspluatatsii ob'ektov ispol'zovaniya atomnoi ehnergii. Obshchie polozheniya [Safety in the Decommissioning of Nuclear Facilities. General Provisions].

2. Emets P. E., Kovalevich O. M., Kryanov A. V., Nere-tin V. A., Sharafutdinov R. B. *Sistemnyy podkhod pri finansirovani meropriyatiy po vyvodu iz ekspluatatsii YAROO, klassifitsiruyemykh v zavisimosti ot kategorii ikh YARO* [Systematic Funding Approach to the Decommissioning of Nuclear Facilities Categorized Based on

their Nuclear and Radiation Hazard Level]. Preprint MEPhI No. 005-2007. Moscow, MEPhI Publ., 2007. 23 p.

3. Emets P. E., Kryanev A. V. Skhema sistemnykh otsenok optimal'nogo ob'yema finansirovaniya, napravlyayemogo na obespecheniye yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti vyvodimykh iz ekspluatatsii yaderno i radiatsionno opasnykh ob'yektov [Algorithm of Optimized Financing System Estimation for Provision of the Nuclear and Radiation Safety of the Nuclear and Radiation Dangerous Sites While Its Decommissioning]. *Audit i finansovyy analiz — Audit and Financial Analysis*, 2010, no. 3, pp. 124—126.

4. Emets P. E., Kryanev A. V. Investitsionnaya effektivnost' vyvoda iz ekspluatatsii yaderno i radiatsionno-opasnykh ob'yektov [Economic Efficiency in the Decommissioning of Nuclear and Radiation Hazardous Facilities]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2011, no. 1 (59), pp. 9—19.

5. Bochkarev V. V., Kryanev A. V., Khanbikova D. T. Ranzhirovaniye yaderno i radiatsionno opasnykh ob'yektov, ekspluatatsiya kotorykh prekrashchena [Ranking of the Shutdown Nuclear and Radiation Hazardous Facilities]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem "Informatsionno-telekommunikatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye vysokotekhnologichnykh sistem"* [Proceedings of the All-Russian Conference

Involving International Delegates Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems]. Moscow, RUDN Publ., 2014 April 22—25. Pp. 195—197.

6. Bochkarev V. V., Kryanev A. V., Smirnov D. S. Mathematical decision support model for the decommissioning of nuclear power facilities. 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2018. Pp. 453—458.

7. Abakumova A. S., Bochkarev V. V., Kryanev A. V. Obosnovaniye vybora varianta vyvoda iz ekspluatatsii ob'yektov ispol'zovaniya atomnoy energii [Justification of the Choice of Decommissioning Option for Nuclear Facilities], *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2018, no. 2 (88), pp. 24—28.

8. Bochkarev V. V., Brilliantov B. D., Kryanev A. V., Batsulin A. A., Klimanov S. G., Litvinenko O. Yu., Mamai D. V., Sliva D. E., Smirnov D. S., Stryapushkin P. A., Tereshkin V. I., Khanbikova D. T. Struktura sistemy podderzhki prinyatiya optimal'nykh resheniy pri vyvode iz ekspluatatsii ob'yektov ispol'zovaniya atomnoy energii [Structure of the Support System for Making Optimal Decisions During the Decommissioning of Nuclear Facilities]. *Vestnik NIYAU MIFI — NRNU MEPhI Bulletin*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 256—261.

Information about the authors

Bochkarev Valery Vyacheslavovich, head of the department of radiation safety, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russia), e-mail: bochkarev@secnrs.ru; leading engineer, National Research Nuclear University “MEPhI” (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia).

Brilliantov Boris Dmitrievich, jr. n., Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russia), e-mail: brilliantov@secnrs.ru; engineer, National Research Nuclear University “MEPhI” (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia).

Klimanov Sergey Gennadievich, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, National Research Nuclear University “MEPhI” (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: s.klimanov@mephi.ru.

Kryanev Alexander Vitalievich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, National Research Nuclear University “MEPhI” (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: avkryanev@mephi.ru.

Smirnov Dmitry Sergeevich, candidate of economic sciences, associate professor, National Research Nuclear University “MEPhI” (31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia), e-mail: dssmirnov@mephi.ru.

Bibliographic description

Bochkarev V. V., Brilliantov B. D., Klimanov S. G., Kryanev A. V., Smirnov D. S. Feasibility Study of Engineering and Organizational Solutions for Nuclear Facility Decommissioning with NRS Provisions Being Accounted for. *Radioactive Waste*, 2021, no. 4 (17), pp. 60—64. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-60-64. (In Russian).