

УДК 621.039

ВЫБОР И УСТОЙЧИВОСТЬ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

© 2020 г. А. В. Крянев^{1,3,*}, В. В. Бочкарев^{1,2}, Б. Д. Бриллиантов^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

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

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

*e-mail: avkryanev@mephi.ru

Поступила в редакцию 20.09.2020 г.

После доработки 10.10.2020 г.

Принята к публикации 10.11.2020 г.

В статье приведены схемы и алгоритмы выбора оптимального варианта технологического процесса вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии, а также определение степени устойчивости выбранного варианта в условиях неопределенности исходных данных. Неопределенности экспертных оценок и расчетных значений части этих данных порождают неопределенности значений показателей для вариантов технологического процесса вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Рассматривается схема выбора оптимального варианта технологического процесса и определения его устойчивости в условиях неопределенности показателей, характеризующих каждый рассматриваемый вариант ВЭ (перечень возможных показателей представлен ниже). Выбор оптимального варианта технологического процесса производится на основе комплексного показателя, объединяющего частные показатели в виде линейной суперпозиции для каждого рассматриваемого варианта технологического процесса вывода из эксплуатации. Согласно предложенной схеме выбор оптимального варианта технологического процесса осуществляется по максимальному для всех рассматриваемых вариантов вывода из эксплуатации среднему ожидаемому значению комплексных показателей для этих вариантов, а устойчивость оптимального варианта технологического процесса тестируется относительно значения комплексного показателя для оптимального варианта технологического процесса для минимально возможного значения по каждому частному показателю.

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

DOI: 10.1134/S2304487X20050065

1. ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике при определении варианта вывода из эксплуатации, как правило, используется многофакторный анализ параметров, которые влияют на выбор того или иного варианта [1–11]. Следовательно, задачу по выбору и обоснованию варианта технологического процесса вывода из эксплуатации можно представить как задачу поиска оптимального решения в многокритериальном пространстве и условно разбить на следующие этапы:

1. Определение показателей (факторов), которые необходимо учитывать, и которые влияют на выбор того или иного варианта вывода из эксплуатации;

2. Проведение многофакторного анализа, решение задачи оптимизации;

3. Сравнительная оценка вариантов технологического процесса вывода из эксплуатации по полученным результатам многофакторного анализа;

4. Выбор оптимального варианта технологического процесса ВЭ ОИАЭ;

5. Исследование устойчивости выбранного варианта технологического процесса ВЭ;

6. Принятие обоснованного решения о выборе оптимального варианта технологического процесса ВЭ.

В настоящей работе предлагается следующий подход к выбору и обоснованию оптимального

варианта ВЭ ОИАЭ: при сопоставлении рассматриваемых возможных вариантов ВЭ рекомендуется опираться на методы многофакторного выбора на конечном множестве альтернатив (вариантов ВЭ ОИАЭ).

Например, в качестве минимального набора показателей каждого из рассматриваемых вариантов ВЭ ОИАЭ можно взять:

– стоимость реализации варианта технологического процесса ВЭ;

– длительность реализации варианта технологического процесса ВЭ;

– дозовая нагрузка на персонал, реализующий технологический процесс ВЭ;

– дозовая нагрузка на окружающую среду.

На этапе идентификации вариантов ВЭ ОИАЭ для каждого варианта технологического процесса ВЭ ОИАЭ определяются количественные значения каждого показателя.

Таким образом, задача выбора оптимального варианта технологического процесса ВЭ ОИАЭ для дальнейшей его реализации является задачей многокритериального выбора на конечном множестве альтернатив, осложненная: неопределенными значениями оценок объемов производимых работ; размытостью используемых оценок экспертов; необходимостью учета возможных рисков и неопределенностей; многовариантными подходами к обращению с РАО, образующимися при демонтаже и дезактивации основного технологического оборудования и инженерной инфраструктуры (оборудование, помещения, вентиляция, спецканализация, транспортеры, промплощадки и так далее).

2. ВЫБОР И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЭ ОИАЭ

В этом разделе приведена схема выбора оптимального варианта технологического процесса ВЭ ОИАЭ и анализа его устойчивости на основе комплексного показателя, объединяющего частные показатели в виде линейной суперпозиции для каждого рассматриваемого варианта вывода из эксплуатации. Согласно предложенной схеме выбор оптимального варианта осуществляется по максимальному для всех рассматриваемых вариантов вывода из эксплуатации среднему ожидаемому значению комплексных показателей для этих вариантов, а устойчивость оптимального варианта тестируется относительно значения комплексного показателя для оптимального варианта для минимально возможного значения по каждому частному показателю.

Для расчета частных показателей каждого варианта технологического процесса ВЭ ОИАЭ необходимо знать физические характеристики кон-

струкций и систем, образующих выводимый из эксплуатации объект.

Ниже представлен некоторый перечень типовых основных физических характеристик конструкций выводимого из эксплуатации объекта:

1) Каждая конструкция (элемент) имеет неопределенные числовые значения показателей (P_{cp} , σ_P);

2) Материальный объем (вес, площадь, длина с указанием качественной характеристики материалов, учитываемой в расчетах показателей технологических операций по демонтажу, дезактивации, переработке, транспортировке, захоронению и другие);

3) Характеристика (показатели) радиационного заражения (объем РАО, его тип и другие);

4) Каждой конструкции (элемента) соответствует набор нескольких возможных технологических операций по ВЭ этой конструкции (минимальное число – одна операция, максимальное – 5).

Для каждой пары конструкция – технологическая операция рассчитаны характеристики (с погрешностями, описываемые СКО – σ).

В качестве базовых частных показателей, характеризующих, как пару конструкция–технологическая операция, так и вариант 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 – $ДНП_i$, $\sigma_{ДНi}$;

Объем и вид (жидкий, твердый) материала с РАО с количеством РАО в каждом виде, на основе которых подсчитываются две характеристики (с неопределенностями):

4) Дозовые нагрузки на окружающую среду – $ДНО_i$, $\sigma_{ДНОi}$;

5) Дозовые нагрузки на население – $ДНН_i$, $\sigma_{ДННi}$.

Здесь CP_i , $ДЛ_i$, $ДНП_i$, $ДНО_i$, $ДНН_i$ – средние значения частных показателей; σ_{CPi} , $\sigma_{ДЛi}$, $\sigma_{ДНi}$, $\sigma_{ДНОi}$, $\sigma_{ДННi}$ – СКО этих показателей.

Замечание. Для некоторых объектов часть характеристик может отсутствовать, например, дозовые нагрузки ДНО и ДНН.

Для каждой конструкции ВЭ с несколькими возможными технологическими операциями ($i = 1, \dots, n$), подсчитывается комплексный показатель приоритета K_i по ВЭ с технологической операцией i :

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

где $\alpha_j, j = 1, 5$ – введенные (принятые) коэффициенты приоритета частных показателей $0 \leq \alpha_j \leq 1$,

$\sum_{j=1}^5 \alpha_j = 1$, CP_{Hi} , $ДЛ_{Hi}$, $ДНП_{Hi}$, $ДНО_{Hi}$, $ДНН_{Hi}$ – нормированные значения частных показателей, подсчитываемых, например, для показателя CP_{Hi} согласно формуле:

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

где:

$$\begin{aligned} CP_{\max} &= \max(CP_1, \dots, CP_n); \\ CP_{\min} &= \min(CP_1, \dots, CP_n). \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогично производится нормирование остальных показателей.

Оптимальным вариантом считается тот, у которого комплексный показатель имеет максимальное значение.

Влияние степени неопределенности показателей операций и, как следствие, неопределенности частных показателей для выводимого из эксплуатации ОИАЭ можно учитывать с помощью ниже приведенной схемы.

Подсчитываются комплексные показатели неопределенности для каждого технологического процесса – пары “конструкция–технологическая операция”:

$$K_{i\sigma} = \alpha_1 CP_{Hi\sigma} + \alpha_2 ДЛ_{Hi\sigma} + \alpha_3 ДНП_{Hi\sigma} + \alpha_4 ДНО_{Hi\sigma} + \alpha_5 ДНН_{Hi\sigma}, \quad (4)$$

где α_i – прежние (смотри (1)), а

$$CP_{Hi\sigma} = \frac{CP_{\sigma\max} - CP_{i\sigma}}{CP_{\sigma\max} - CP_{\sigma\min}}, \quad (5)$$

где:

$$\begin{aligned} CP_{\sigma\max} &= \max(CP_{1\sigma}, \dots, CP_{n\sigma}); \\ CP_{\sigma\min} &= \min(CP_{1\sigma}, \dots, CP_{n\sigma}); \\ CP_{i\sigma} &= \sigma CP_i, \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (6)$$

Нормированные значения других показателей неопределенности подсчитываются аналогично (6).

Подставляются предельные значения показателей и предельные значения комплексного показателя $K_{i\sigma}$ для каждого технологического процесса.

Подсчитываются значения интегральных комплексных показателей технологического процесса с учетом неопределенности

$$K_{i\text{int}} = (1 - \beta)K_i + \beta K_{i\sigma}, \quad (7)$$

где $\beta \in [0, 1]$ – коэффициент значимости учета неопределенности в значении комплексного показателя K_i .

Технологический процесс с номером $i^* = \max\{K_{i\text{int}}, i = 1, \dots, n\}$ выбирается как оптимальный и подлежащий реализации.

В частности, если $i^* = \max\{i : K_{i\text{int}}, i = 1, n\}$ и одновременно $i^* = \max\{i : K_{i\sigma}, i = 1, n\}$, то технологический процесс с номером i^* называется устойчивым. В противном случае такой вариант выбора технологического процесса называется условно устойчивым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена схема выбора оптимального варианта технологического процесса при ВЭ ОИАЭ и определение его устойчивости. Предлагается схема выбора оптимального варианта технологического процесса на основе значений частных показателей для каждого рассматриваемого варианта технологического процесса ВЭ. Итоговый выбор оптимального варианта технологического процесса при ВЭ ОИАЭ принимается согласно значению комплексного показателя, рассчитываемого по средним значениям частных показателей и их СКО, объединяемых в комплексный показатель с помощью коэффициентов приоритета частных показателей и коэффициента значимости учета неопределенности в значении комплексного показателя.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А.А., Дорофеев А.Н., Комаров Е.А., Линге Ин.И., Абалкина И.Л., Ведерникова М.В., Бирюков Д.В., Иорданов А.С., Линге И.И., Ковальчук Д.В., Крючков Д.В., Уткин С.С., Алексахин Р.М., Хамаза А.А., Бочкарев В.В., Супатаева О.А., Кононов В.В., Тихоновский В.Л., Иванов О.П., Павленко В.И., Семенов С.Г., Чесноков А.В.* Заключительный том трехтомной монографии “Проблемы ядерного наследия и пути их решения”, посвященный завершающему этапу жизненного цикла объекта использования атомной энергии – выводу из эксплуатации. “Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации” / Под общей редакцией академика РАН Л.А. Большова, Н.П. Лаврова, чл.-кор. РАН И.И. Линге. М., 2015, 316 с.
2. International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, IAEA, 2012, 195 p.
3. Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants. IAEA, 2016. 260 p.
4. Financing the Decommissioning of Nuclear Facilities. IAEA, 2016. 23 p.
5. Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities. IAEA, 2017. 68 p.
6. Федеральная целевая программа “Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года”.
7. *Емец П.Е., Крянев А.В.* Методика оценки экономической эффективности вывода из эксплуатации

- ядерно и радиационно опасных объектов // Бюллетень по атомной энергии. 2008. № 11. С. 4–7.
8. 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.
 9. 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.
 10. Крянев А.В., Лукин Г.В. Математические методы обработки неопределенных данных. М.: Физматлит, 2006.
 11. 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. 5, pp. 470–474

Selection and Stability of the Optimal Variant of the Technological Process during the Decommissioning of Nuclear Facilities under Conditions of Uncertainty in the Initial Data

A. V. Kryanev^{a,c,#}, V. V. Bochkarev^{a,b}, and B. D. Brilliantov^{a,b}

^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, 141980 Russia

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

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

Abstract—Diagrams and algorithms for choosing the optimal variant of the technological process for decommissioning of nuclear facilities, as well as for determining the degree of stability of the chosen variant in conditions of uncertainty of the initial data, have been presented. Uncertainties of expert assessments and calculated values of some of these data give rise to uncertainties in the values of indicators for options for the technological process of decommissioning nuclear facilities. A scheme for selecting the optimal variant of the technological process and determining its stability in conditions of uncertainty of the indicators characterizing each considered variant of decommissioning (the list of possible indicators is presented below) is considered. The optimal variant of the technological process is chosen on the basis of a complex indicator that combines particular indicators in the form of a linear superposition for each considered variant of the technological decommissioning process. According to the proposed scheme, the optimal variant of the technological process is chosen according to the maximum for all considered decommissioning options, the average expected value of the complex indicators for these options, and the stability of the optimal variant of the technological process is tested against the complex indicator for the optimal variant of the technological process for the minimum possible value for each particular indicator.

Keywords: decommissioning, nuclear facilities, nuclear and radiation safety, technological process, best option, indicators, stability, uncertainty

DOI: 10.1134/S2304487X20050065

REFERENCES

1. Abramov A.A., Dorofeev A.N., Komarov E.A., Linge In.I., Abalkina I.L., Vedernikova M.V., Birukov D.V., Iordanov A.S., Linge I.I., Kovalchuk D.V., Kruchkov D.V., Utkin S.S., Aliksahin R.M., Hamaza A.A., Bochkarev V.V., Supataeva O.A., Kononov V.V., Tikhonovsky V.L., Ivanov O.P., Pavlenko V.I., Semenov S.G., Chesnokov A.V. *Zakluchitel'noi tom trehtomnoi monografii “Problemi yadernogo naslediya I puti ih resheniya”*, posvyashenni zavershaemomu etapu jiznennogo cikla obekta ispolzovaniya atomnoi energii – vivodu iz ekspluatatsii, “Problemi yadernogo naslediya i puti ih resheniya, Vivod iz ekspluatatsii”, Pod obshei redakciei akademika RAN L.A. Bolshova, N.P. Laverova, chl.-kor. RAN I.I. Lingue (The final volume of the three-volume monograph “Problems of Nuclear Legacy and the Ways of Their Solution”, dedicated to the final stage of the life cycle of an atomic energy use facility – decom-

- missioning, “The problems of nuclear legacy and ways to solve them. Removal from service”, Under the general editorship of the academician of the RAS L.A. Bolshova, N.P. Laverova, Corr. RAS I.I. Linge), M., 2015, 316 p.
2. International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, IAEA, 2012, 195 p.
 3. Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants, IAEA, 2016, 260 pp.
 4. Financing the Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA, 2016, 23 pp.
 5. Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities, IAEA, 2017, 68 p.
 6. *Federalnaya tselevaya programma “Obespechenie yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti na 2016–2020 godi i na period do 2030 goda”* (Federal Target Program “Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016–2020 and for the Period until 2030”).
 7. Emets P.E., Kryanev A.V., *Metodika otsenki ekonomichskoi effektivnosti vivoda iz ekspluatatsii yadernoi i radiatsionno opasnykh obektov* (Methodology for Assessing the Economic Efficiency of Decommissioning of Nuclear and Radiation Hazardous Facilities), *Atomic Energy Bulletin*, 2008, no. 11, pp. 4–7.
 8. Emets P.E., Kryanev A.V., *Investitsionnaya effektivnost vivoda iz ekspluatatsii yadernoi radiatsionno opasnykh obektov (YaROO)* (Investment Efficiency of Decommissioning of Nuclear and Radiation Hazardous Facilities (NROO)), *Nuclear and radiation safety*, 2011, no. 1 (59), pp. 10–19.
 9. Bochkarev V.V., Kryanev A.V., Hanbikova D.T., *Ranjirovanie yadernoi i radiatsionno opasnykh obektov, ekspluatatsiya kotorih prekrashena*, “*Informatsionno – telekommunikatsionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie vicokotekhnologicheskikh 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), M.: PFUR, 2014, pp. 195–197 (in Russian).
 10. Kryanev A.V., Lukin G.V., *Matematicheskie metody obrabotki neopredelennykh dannykh* (Mathematical Methods for Processing Uncertain Data), M.: Fizmatlit, 2006.
 11. RB-153-18 “*Rekomendatsii po obosnovaniu vibora variant vivoda iz ekspluatatsii obektov ispolzovaniya atomnoi energii*”, *Utverjdeno prikazom Federalnoi sluzhbi po ekologicheskomu 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.