

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ВЫВОДА АЭС ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.Л. Ташлыков*, А.Н. Сесекин*, С.Е. Щеклеин*, А.Г. Ченцов**

** Уральский государственный технический университет-УПИ, г. Екатеринбург*

*** Институт математики и механики УрО РАН*



Определен необходимый объем первичной информации по радиационной обстановке в помещениях энергоблока для разработки систем оптимального планирования работ по выводу АЭС из эксплуатации.

Предложены пути повышения эффективности использования полученной информации по радиационной обстановке для оптимизации последовательности демонтажа радиоактивного оборудования путем математического моделирования с целью минимизации дозовых и материальных затрат.

Ключевые слова: алгоритм, вывод из эксплуатации, информация, обеспечение безопасности, оптимизация.

Key words: algorithm, decommissioning, information, safety provisions, optimization.

Атомная электростанция (АЭС), как и любой технический объект, имеет свой жизненный цикл, включающий в себя этапы проектирования, изготовления оборудования, строительства, ввода в эксплуатацию, эксплуатации и вывода из эксплуатации.

Вывод АЭС из эксплуатации – процесс многолетний, включающий в себя прохождение энергоблоком ряда этапов демонтажа. Специфика АЭС требует тщательной организационной, научной и технологической проработки и подготовки к выполнению работ, а также заблаговременного накопления финансовых и технических ресурсов на эти цели.

В соответствии с ОПБ-88/97 [1] выводу из эксплуатации должно предшествовать комплексное обследование блока АЭС, на основе материалов которого разрабатывается проект вывода блока АЭС из эксплуатации и подготавливается отчет по обоснованию безопасности при выводе блока АЭС из эксплуатации для получения в Госатомнадзоре России лицензии на вывод из эксплуатации.

В настоящее время вышел ряд нормативных документов, обязывающих вести сбор, систематизацию и хранение информации об истории эксплуатации, производить комплексное инженерное и радиационное обследование (КИРО – комплекс

мероприятий, необходимых для разработки проекта вывода из эксплуатации блока АЭС и направленных на получение информации об инженерно-техническом состоянии зданий, сооружений, строительных конструкций и оборудования, а также о радиационной обстановке в помещениях и на площадке блока АЭС, объемном и поверхностном загрязнении радиоактивными веществами помещений, оборудования и площадки блока АЭС, качественном и количественном составе радиоактивных отходов на блоке АЭС). Эти документы предписывают создавать базы данных (БД) по выводу из эксплуатации блока АЭС, представляющие собой совокупность документально подтвержденных и упорядоченных сведений об эксплуатации блока, инженерных и радиационных обследованиях, результатах расчетных исследований, проектных данных, необходимых для планирования и проведения работ по выводу из эксплуатации, а также о результатах выполнения работ на всех этапах вывода из эксплуатации.

Базы данных по выводу из эксплуатации блока АЭС должны содержать сведения, необходимые для проведения оценок наведенной активности оборудования и строительных конструкций, загрязнения радиоактивными веществами технологического оборудования, помещений и строительных конструкций, для проведения расчетов наведенной и поверхностной активности оборудования и его элементов (о заменах оборудования, облучаемого нейтронами или работающего в контакте с радиоактивными средами, о радионуклидном составе отложений на внутренних поверхностях трубопроводов и оборудования и т.д.).

В настоящее время в стадии вывода из эксплуатации находятся энергоблоки № 1, 2 Белоярской (остановлены в 1983 и 1989 гг.) и Нововоронежской (остановлены в 1984 и 1990 гг.) АЭС. В недалеком будущем будут выводиться из эксплуатации энергоблоки АЭС, пущенные в эксплуатацию в 1970–80-е гг. с учетом продления их проектного срока эксплуатации (рис. 1).

В рамках реализации КИРО коллективом авторов Белоярской АЭС в сотрудничестве с кафедрой «Атомная энергетика» УГТУ-УПИ разработана организационная структура хранения и обработки информации по энергоблокам №1 и №2. Она представляет собой многоуровневую, многосвязную иерархическую систему хра-

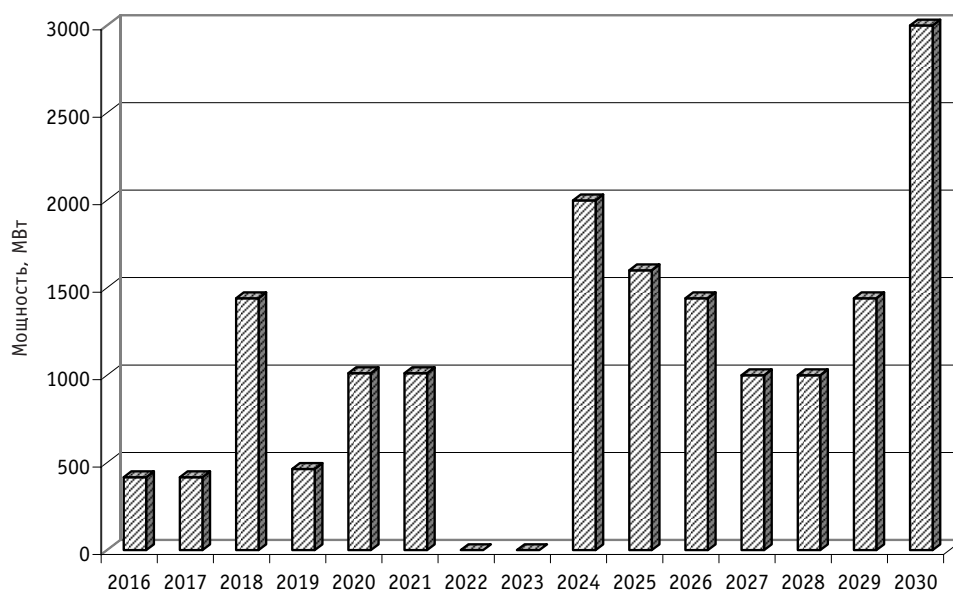


Рис. 1. Мощность энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации

нения и обработки массивов информации по состоянию зданий, сооружений, оборудования и трубопроводов [2].

Эта система позволяет обращаться с информацией, организованной слоями. Информационное содержание слоев может быть разделено по конструктивным элементам (геометрические размеры элементов помещения, характеристики покрытий, расположение штатных и монтажных проемов, оборудования, трубопроводов и т.п.), а также по изменению радиационной обстановки на элементах помещения во времени. Для этого БД содержит общие характеристики, сборочные и детализированные чертежи для расчета поверхностей загрязнения, изометрические схемы трубопроводов, состав оборудования и т.п.

Собираемая информация предназначена для расчета объема отходов от демонтажа и оценки активности, содержащейся в элементах помещения. Объем информации позволяет оценивать активность, находящуюся как в отдельных элементах оборудования, трубопроводов, системах в целом, так и в отдельно взятом помещении. Эти данные могут служить основой для оптимизации радиационных нагрузок персонала, участвующего в демонтажных работах.

В соответствии с [3] вывод из эксплуатации блока АЭС удовлетворяет требованиям безопасности на всех этапах выполнения работ, если его радиационное воздействие на работников (персонал), население и окружающую среду не приводит к превышению действующих на момент выполнения работ, пределов доз облучения работников (персонала) и населения, а также нормативов по выбросам, сбросам и концентрациям радиоактивных веществ в различных природных средах (воздухе, поверхностных и подземных водах, почве).

Вывод из эксплуатации блока АЭС должен осуществляться в соответствии со следующими основными принципами обеспечения безопасности:

- должно обеспечиваться не превышение основных дозовых пределов и других нормативов облучения людей;
- радиационное воздействие на работников (персонал), население и окружающую природную среду должно быть снижено до минимальных разумных значений с учетом социальных и экономических факторов;
- должны выполняться работы, при которых полученная для человека и общества польза превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным к основным дозовым пределам облучением.

Снижение дозовых нагрузок может быть обеспечено за счет мер, требующих значительных затрат (внедрение автоматизированных и роботизированных демонтажных комплексов, проведение дезактивации) и за счет оптимизации последовательности выполнения работ и сроков их проведения.

В Уральском государственном техническом университете-УПИ кафедрами «Прикладная математика» и «Атомная энергетика» в сотрудничестве с Институтом математики и механики УрО РАН разработан ряд расчетных программ, позволяющих минимизировать дозовые затраты персонала объектов использования атомной энергии (например, оптимизация траектории перемещения работника в радиационных полях и последовательности демонтажа радиоактивного оборудования).

В основе разработанных программ лежит одна из наиболее известных задач дискретной оптимизации – задача коммивояжера (ЗК), в которой торговец, начиная с некоторого города, хочет посетить каждый из $(n-1)$ других городов один и только один раз. В каком порядке должен он посещать города, чтобы минимизировать суммарное пройденное расстояние? Под «расстоянием» можно подразумевать время, издержки или другой измеритель (например, в рассматриваемых задачах – это доза облучения).

В этой задаче исследуются вопросы оптимизации перемещений между заданными пунктами, обычно именуемыми «городами». Задача сочетает простоту постановки и трудности решения, которые имеют чисто вычислительный характер, т.к. существование решения очевидно. Имеется $N!$ возможных маршрутов, один из которых или несколько дают минимальные издержки, в данном случае коллективную дозу облучения.

В последние годы было предложено много методов решения задачи. Одни из них неэффективны, другие не гарантируют оптимального решения, некоторые требуют принятия интуитивных решений, а это затрудняет программирование для ЭВМ.

Среди методов такого типа наиболее эффективными (в вычислительном отношении) оказались основанные на идеях метода динамического программирования (МДП), поскольку гарантируют оптимальность, обеспечивают удобство программирования решения, а также являются универсальными, т.е. приспособлены для задач различного типа. Речь идет о конкретизации МДП с целью решения ЗК в постановках «обычной» замкнутой и незамкнутой задач. Логика такого использования МДП традиционна: сначала происходит построение функции Беллмана (в обратном «времени»), а затем конструируется маршрут, т.е. некоторая перестановка α , задающая последовательность выполнения работы, исходя из решения (на каждом шаге) уравнения Беллмана. В результате конечного числа шагов формируется оптимальный маршрут [5].

В работе [6] подробно рассмотрено теоретическое обоснование использования метода динамического программирования для оптимизации перемещения работников в радиационных полях и реализация разработанного алгоритма.

Объекты технического обслуживания и ремонта (ТОиР), рассматриваемые в данной расчетной схеме, могут располагаться в различных помещениях (боксах) и на различных высотных отметках. Путь между объектами в расчетной схеме выражается в виде эффективной дозы облучения E_{a-b} , получаемой в процессе движения между обслуживаемыми объектами $a-b$:

$$E_{a-b} = \sum P_i \cdot k \cdot t_i, \quad (1)$$

где P_i – радиационный параметр i -й зоны (мощность дозы, мощность воздушной кермы и т.д.); k – коэффициент перехода от радиационного параметра P_i к эффективной дозе; t_i – время, за которое работник пересечет i -ю зону с радиационным параметром P_i

$$t_i = \frac{S_i}{v_i}, \quad (2)$$

где S_i – ширина i -й зоны, м; v_i – скорость движения работника в i -й зоне, м/с.

В этой задаче используется так называемое уравнение Беллмана, модифицированное для рассматриваемой ЗК. Решение включает в себя рекуррентное построение слоев функции Беллмана, т.е. V_1, V_2, \dots, V_N , и на этой основе построение оптимального маршрута обхода «городов» (обслуживаемых объектов) $\alpha = (\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(N))$, где α – перестановка целых чисел $1, 2, \dots, N$, задающих маршрут (последовательность выполнения работ).

Для оценки эффективности оптимизации пути перемещения были просчитаны несколько реальных вариантов движения работников в зоне контролируемого доступа. Были рассмотрены варианты задач замкнутого (работник должен войти и выйти через один вход) и незамкнутого (вход в одном, выход в другом месте) типов. Результаты показали, что оптимизация пути перемещения персонала позволяет сократить «транзитную» дозу облучения примерно на 20% [6].

Разработанный алгоритм стал базовым для расширения диапазона использования МДП, в частности для решения такой важной задачи как минимизация облучения при проведении масштабных работ по демонтажу оборудования энергобло-

ков АЭС, выводимых из эксплуатации. Задача имеет важное социальное значение с точки зрения минимизации коллективной дозы облучения. Так, по данным концерна «Энергоатом» ориентировочные дозозатраты на работы по демонтажу оборудования одного энергоблока с РБМК-1000 составляют более 100 чел.·Зв при трудозатратах примерно 1,5 млн. чел.·ч.

В отдельных помещениях и боксах выводимых из эксплуатации энергоблоков находятся объекты (трубопроводы, оборудование и т.д.) с различной степенью радиоактивности. Одновременно с этим трудозатраты на демонтаж каждого из этих объектов различны. Общая доза облучения, получаемая работниками при демонтажных работах в помещении или на площадке, будет зависеть от времени их пребывания в радиационных полях, создаваемых радиоактивными объектами.

Формулировкой этой задачи является определение оптимальной последовательности демонтажа радиоактивных объектов с целью минимизации облучения персонала [7]. Особенностью, осложняющей решение задачи, является зависимость уровня радиационного фона в помещении при выполнении очередной работы от «невывключенных» (недемонтированных) объектов. Например, при демонтаже N объектов в последовательности $\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(N)$ эффективная доза облучения

$$E = k \cdot t_{\alpha(1)}(P_{\alpha(1)} + P_{\alpha(2)} \dots P_{\alpha(N)}) + k \cdot t_{\alpha(2)}(P_{\alpha(2)} + P_{\alpha(3)} \dots P_{\alpha(N)}) + \dots + k \cdot t_{\alpha(N)} P_{\alpha(N)}, \quad (3)$$

где $P_{\alpha(i)}$ – радиационный параметр, создаваемый i -м элементом; k – коэффициент перехода от радиационного параметра к эффективной дозе; $t_{\alpha(i)}$ – время демонтажа i -го элемента (в данной задаче $t_{\alpha(i)}$ не зависит от номера последующего демонтируемого объекта), т.е. при демонтаже i -го элемента исключается дальнейшее его влияние на облучение в виде радиационного параметра $P_{\alpha(i)}$.

Для этой задачи, которая отличается от стандартной задачи коммивояжера тем, что затраты на переход от объекта к объекту зависят не только от этих двух объектов, но и от множества еще не обойденных объектов, разработана процедура метода динамического программирования, получено уравнение Беллмана, разработан алгоритм построения функции Беллмана и осуществлена его программная реализация для ряда примеров. В качестве примера проведем оценку дозозатрат персонала при демонтаже 12 объектов в различной последовательности на основании исходных данных, приведенных в табл. 1.

Результаты расчетов по разработанной программе максимальной и минимальной доз облучения при демонтаже объектов в различной последовательности приведены в табл. 2.

Как видно из результатов расчета, существует значительный потенциал в снижении дозовых нагрузок путем оптимизации последовательности демонтажа радиоактивного оборудования (например, в рассмотренном примере более, чем в два раза).

Таблица 1

| Номер объекта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|
| Мощность дозы, мЗв/ч | 0,86 | 0,65 | 0,72 | 1,12 | 1,15 | 1,08 | 0,61 | 0,4 | 0,47 | 0,36 | 0,58 | 0,9 |
| Время демонтажа объекта, чел.ч | 1,6 | 1,9 | 1,2 | 2,1 | 3,3 | 0,9 | 4,2 | 2,8 | 3,5 | 4,7 | 3,2 | 2,4 |

Таблица 2

| Последовательность демонтажа объектов | Доза, мЗв |
|--|-----------|
| 10 → 9 → 8 → 7 → 11 → 2 → 5 → 12 → 4 → 1 → 3 → 6 | 207 |
| 6 → 3 → 1 → 4 → 12 → 5 → 2 → 11 → 7 → 8 → 9 → 10 | 97 |

Однако в реальных условиях на дозу облучения дополнительное влияние будет оказывать фактор расстояния. Кроме того демонтаж радиоактивного оборудования не может проводиться в любой последовательности. Возникают ограничения, связанные с порядком демонтажа некоторых объектов (например, расположенных на различных высотных отметках, связанных конструкционно). Отсюда возникает задача оптимизации с учетом фактора расстояния и ограничениями в виде условий предшествования. Это в определенной мере сокращает количество переборов при решении, но требует разработки специального подхода, при котором сокращается число возможных вариантов «обхода». Для этой задачи также разработана процедура метода динамического программирования, получено уравнение Беллмана, разработан алгоритм и выполняются работы по осуществлению его программной реализации [8].

ВЫВОДЫ

1. Только комплексное радиационное и инженерное обследование дает возможность построить сценарий вывода объекта использования атомной энергии из эксплуатации и решить задачу оптимизации радиационных нагрузок на персонал.

2. Одним из эффективных расчетных путей оптимизации радиационных нагрузок персонала, участвующего в демонтажных работах, является метод динамического программирования.

3. Для более точной оценки влияния оптимизации последовательности демонтажа радиоактивного оборудования на минимизацию облучения персонала необходимо провести программную реализацию алгоритма решения поставленной задачи с учетом влияния фактора расстояния и условия предшествования отдельных операций при демонтаже.

Литература

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97 (ПНАЭ Г-01-011-97). – М.: Госатомнадзор России, 1997.
2. Киреев Л.Г., Щеклеин С.Е. Разработка и внедрение компьютерных баз данных по состоянию помещений и оборудования 1 очереди Белоярской АЭС в пределах главного корпуса/Сб. трудов VII научно-технической конференции «40 лет работы Белоярской АЭС» (Заречный, 2004). – Заречный: Издательский дом «Пятница», 2004. – Т. 3. – С. 195-209.
3. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции (НП-012-99). – М.: Госатомнадзор России, 2000
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Маркелов Н.И. Оптимизация ремонтных работ с учетом дозовых затрат персонала/Сб. пленарных и секционных докладов V Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Москва, 19-21 апреля 2006 г.). – М.: Росэнергоатом, 2006. – С. 251-254.
5. Ченцов А.Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2008. – 240 с.
6. Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Ку克林 М.Ю., Ченцов А.Г., Кадников А.А. Использование метода динамического программирования для оптимизации траектории перемещения работников в радиационно опасных зонах с целью минимизации облучения// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 2. – С. 41-48.
7. Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Ченцов А.Г., Щеклеин С.Е. О проблеме снижения облучаемости персонала при демонтаже радиоактивного оборудования снимаемых с эксплуатации объектов использования атомной энергии/Безопасность критических инфраструктур и территорий: Тез. докладов II Всероссийской конференции и XII Школы молодых ученых (Екатеринбург, 9-12 декабря 2008 г.). – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – С. 218-220.
8. Ченцов А.А., Ченцов А.Г. Метод динамического программирования в обобщенной задаче курьера// Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 3. – С. 143-153.

Поступила в редакцию 30.03.2009

УДК 621.039

Implementation of the Decommissioning Programmes of Beloyarsk NPP Power Units 1 and 2/N.N. Oshkanov, V.F. Roslyakov, B.I. Chubarov, V.A. Makhov, E.A. Vinivitin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.

The article overviews the generalized list of the work presently in hand under the programmes of the decommissioning of Beloyarsk NPP power units 1 and 2.

УДК 621.039:519.7

Development of the optimal algorithms of the NPP decommissioning using the methods of mathematical simulation/O.L. Tashlykov, A.N. Seseikin, S.E. Shcheklein, A.G. Chechentsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 8 titles.

The required scope of the source information on the radiation background in the power unit premises for the development of the systems of the optimal NPP decommissioning planning is determined.

The ways are proposed to increase the efficiency of utilization of the obtained information on the radiation background for optimization of the sequence of the dismantling of the radioactive equipment by means of the mathematical simulation in order to minimize exposure and material costs.

УДК 621.039.526

Research into the Temperature Behaviour of the Irradiated Fuel Sub-Assemblies of the First Phase of the Beloyarsk NPP under the conditions of the «Dry» Storage/S.V. Bogatov, V.P. Zabegaev, A.I. Karpenko, E.L. Rozenbaum; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

The article presents the computational and the experimental investigations of the temperature behaviour of the standard cask holding thirty five irradiated fuel sub-assemblies under the dry storage in the process pit. Research showed that the heat-up due to the residual heat did not cause the excessive growth of temperature even under the conditions of the complete absence of the heat removal by ventilation.

УДК 621.039.548

Methodology and Results of the Operational Calculation of the Temperature of the Fuel in the Fuel Pins of the BN-600 Reactor Fuel Sub-Assemblies/S.V. Bogatov, M.G. Kireev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 9 titles.

The article presents the methodology of the determination of the peak fuel temperature and computational investigations of the temperature behaviour of the fuel in the fuel pins of the fuel sub-assemblies of various types during the BN600 reactor operation. The effect of the sodium uranate in the gap between fuel and cladding of the fuel pin on the heat transfer processes is considered.

УДК 621.311.25:621.039

Features of the Vibration Conditions of the Pumping Units of the Primary Sodium Pumps of the BN-600 Power Unit under the conditions of Two-Loop Operation/E.Yu. Badanin, P.P. Govorov, V.A. Drozdenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 4 pages, 2 illustrations. – References, 5 titles.

The article presents the results of the investigation of the vibration conditions of the pumping components of the primary sodium pumps under the two-loop operation of the power unit. The comparative analysis has been conducted, and the distinctive features of the conditions of the pumping component operation under these circumstances have been found.