

УДК 621.039.56

О.Л. Ташлыков, канд. техн. наук, доц.,
С.Е. Щеклеин, д-р техн. наук, проф.,
А.Н. Сесекин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Урал. федерал. ун-т, г. Екатеринбург, Россия

МАРШРУТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ РАБОТ

О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин, А.Н. Сесекин. Маршрутна оптимізація радіаційно небезпечних робіт. Показано основні напрямки досліджень щодо розв'язання завдань дискретної оптимізації, орієнтованих на застосування в прикладних завданнях, пов'язаних з мінімізацією дозових затрат персоналу об'єктів використання атомної енергії. Обґрунтовано актуальність розв'язання завдань маршрутної оптимізації радіаційно небезпечних робіт, що мають значний потенціал в мінімізації опромінення персоналу. Приведено результат оцінюючих розрахунків оптимальних маршрутів руху і скорочення транзитних доз опромінення. Розглянуто особливості розв'язання завдання оптимізації послідовності делонтажу радіоактивного обладнання при виведенні енергоблока АЕС з експлуатації, в тому числі при дотриманні обмежень у вигляді умов передування. Виконано оцінку зниження опромінюваності персоналу при оптимізації послідовності демонтажу радіоактивного обладнання.

Ключові слова: мінімізація дозових витрат, рівень радіаційного фону, демонтаж радіоактивного обладнання, ефективна доза опромінювання.

О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин, А.Н. Сесекин. Маршрутная оптимизация радиационно опасных работ. Показаны основные направления исследований по решению задач дискретной оптимизации, ориентированных на применение в прикладных задачах, связанных с минимизацией дозовых затрат персонала объектов использования атомной энергии. Обоснована актуальность решения задач маршрутной оптимизации радиационно опасных работ, имеющих значительный потенциал в минимизации облучения персонала. Приведены результаты оценочных расчетов оптимальных маршрутов движения и сокращения транзитных доз облучения. Рассмотрены особенности решения задачи оптимизации последовательности демонтажа радиоактивного оборудования при выводе энергоблока АЭС из эксплуатации, в том числе при соблюдении ограничений в виде условий предшествования. Выполнена оценка снижения облучаемости персонала при оптимизации последовательности демонтажа радиоактивного оборудования.

Ключевые слова: минимизация дозовых затрат, уровень радиационного фона, демонтаж радиоактивного оборудования, эффективна доза облучения.

O.L. Tashlykov, S.Ye. Shcheklein, A.N. Seseikin. The route optimization of radiation-dangerous works. Main directions of the investigations of solving the discrete optimization tasks oriented to the applied problems connected with the minimization of dosimetric costs of nuclear objects staff are shown. The urgency of solving the problems of the route optimization is proved for radiation-dangerous works which have great potential in the minimization of personnel irradiation. The results of estimating calculation of optimal movement routes in the radioactive fields and the reduction of transit exposure doses are given. The solution peculiarities of the problem of optimization of the radioactive equipment dismantling sequence in case of NPP unit decommissioning are considered, adherence to the restrictions of precedence conditions included. The estimation of personnel irradiation reduction due to the optimization of the radioactive equipment dismantling sequence is made.

Keywords: minimizing the dose costs, background radiation level, dismantling of radioactive equipment, effective radiation dose.

В общем случае уменьшить дозозатраты при проведении радиационно опасных работ можно снижением параметров радиационной обстановки, увеличением расстояния от источника ионизирующего излучения до работающего, сокращением времени нахождения в зоне действия ионизирующего излучения.

Первый способ предполагает варианты снижения уровня излучения от оборудования и трубопроводов, начиная с масштабных (например, снижение содержания легко активируемых

элементов в конструкционных материалах), и заканчивая дезактивацией оборудования, трубопроводов, использованием экранирования источников ионизирующего излучения и др.

Второй способ предполагает использование дистанционных приспособлений, автоматов для сварки и контроля, робототехники. Методы дистанционного обслуживания и автоматизации имеют основной потенциал в снижении радиационной нагрузки на персонал, так как обеспечивают наиболее существенное снижение дозовых затрат, но требуют значительных материальных затрат.

Уменьшение времени пребывания персонала в радиационных полях может быть достигнуто тщательным планированием, эффективным управлением работами, тренировками на макетах и компьютерных моделях оборудования в чистой зоне, применением высокопроизводительного оборудования и т.д.

Одним из способов уменьшения времени пребывания в радиационных полях, не требующим значительных материальных затрат, является маршрутная оптимизация при выполнении комплекса операций в зоне контролируемого доступа.

Работы по построению методов и алгоритмов решения задач маршрутной оптимизации, ориентированных на применение в прикладных задачах атомной энергетики, ведутся на протяжении ряда лет специалистами Уральского федерального университета в тесном сотрудничестве с Институтом математики и механики УрО РАН.

В качестве базовой использована классическая *задача коммивояжера* (ЗК), в которой торговец, начиная с некоторой базы, должен посетить каждый из N других городов только один раз. Это одна из наиболее известных задач дискретной оптимизации, сочетающая простоту постановки и трудности вычислительного характера, т.к. имеется $N!$ возможных маршрутов, один или несколько из которых дают минимальные издержки (в рассматриваемых задачах — это эффективная доза облучения). Первоначально данная задача была адаптирована для определения оптимальной траектории перемещения работника в радиационных полях с целью минимизации “транзитной” дозы облучения [1].

В дальнейшем исследования переключились на так называемую *задачу курьера* (ЗК с условиями предшествования), а также на *обобщенную задачу курьера*. В этих исследованиях первоначально доминировал метод динамического программирования (МДП) с предварительной редукцией ограничений, что было оригинальным элементом. Затем были построены варианты метода итераций, использующие перестраиваемые модели ЗК и задачи курьера и реализующие систему улучшающихся двусторонних оценок глобального экстремума. Наконец, в связи с применением МДП был построен метод, не использующий насчитывание всего массива значений функции Беллмана и, что очень важно, не проигрывающий в качестве. Далее, в связи с постановкой задач, связанных с демонтажем радиационно-загрязненного оборудования энергоблоков АЭС, выведенных из эксплуатации, были получены теоретические результаты, касающиеся точных и приближенных методов решения маршрутных задач с усложненным критерием, включающим внутренние работы и явные зависимости от списка невыполненных на текущий момент заданий.

Оптимизация перемещения персонала в радиационных полях с целью минимизации облучения.

Доза, получаемая во время выполнении работ в радиационноопасных зонах, накапливается по пути к рабочей площадке и обратно, при перемещении между обслуживаемыми объектами, при подготовке, выполнении и завершении работ.

Среди рассмотренных составляющих дозы облучения, подлежащих оптимизации, несомненный интерес представляет оптимизация дозовых затрат, получаемых персоналом при перемещении от объекта к объекту, поскольку данный вопрос практически не рассматривался в отечественной и зарубежной практике.

Снижение “транзитных доз”, полученных в пути на рабочее место и от рабочего места до выхода из зоны контролируемого доступа, представляет собой важную задачу в общем процессе оптимизации облучения персонала. Для сокращения доз, получаемых при перемещении, на ряде зарубежных станций используются подробные карты, которые можно получить при входе

в реакторное здание и на различные отметки внутри здания. Это помогает сократить время перемещения работников, которые могут “потеряться” и поэтому получить ненужную дозу во время поиска их рабочего места. В частности, этот случай относится к работе на арматуре малого диаметра, которую часто трудно найти. Эти карты могут быть включены в рабочие процедуры, выдаваемые работникам (например, на АЭС Paluel EDF выдаваемая работнику рабочая процедура содержит фотографии участка, где показано расположение клапана и указаны оцененные или измеренные значения мощности дозы).

При выполнении ремонтных работ выбор маршрута перемещения с минимальной дозой облучения не представляет сложности, так как количество обслуживаемых объектов ограничено одним-двумя. При обслуживании значительного количества объектов в радиационно-опасных зонах требуется использование эффективных вычислительных программ, так как число возможных маршрутов перемещения, как указано выше, составляет $N!$ (например, при количестве обслуживаемых объектов $N=6$ существует 720 вариантов возможных маршрутов перемещений).

Обслуживаемые объекты, 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 $a-b$,

$$E_{a-b} = \sum P_i k t_i,$$

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 .

Теоретическое обоснование использования МДП для нахождения оптимального маршрута перемещения в радиационных полях с целью минимизации облучения подробно рассмотрено ранее [2].

В этом случае МДП конкретизирован для решения ЗК в постановках “обычной” замкнутой (работник должен войти и выйти через один вход) и незамкнутой (вход и выход различны) задач: сначала происходит построение функции Беллмана (в обратном “времени”), а затем конструируется оптимальный маршрут обхода обслуживаемых объектов, задающий последовательность выполнения работ, исходя из решения уравнения Беллмана на каждом шаге.

Объекты ТООР, 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 $a-b$

$$E_{a-b} = \sum P_i \cdot k \cdot t_i.$$

В этом выражении время t_i , за которое работник пересечет i -ю зону с радиационным параметром P_i , будет определяться по формуле

$$t_i = \frac{S_i}{v_i},$$

где S_i — ширина i -й зоны, м;

v_i — скорость движения работника в i -й зоне, м/с.

Для оценки эффективности оптимизации пути перемещения персонала при техническом обслуживании просчитаны реальные варианты движения работников в зоне контролируемого доступа. Для решения подобных задач разработано специальное программное обеспечение.

Как показали результаты вычислительного эксперимента, оптимизация пути перемещения персонала позволяет сократить “транзитную” дозу облучения на 16...21 % [1, 2].

Разработанный алгоритм решения данной задачи представляет значительный интерес для определения оптимальной траектории перемещения людей в условиях ликвидации последствий аварии на загрязненной территории на основании данных радиационной разведки.

Основой для оптимизации перемещений в радиационных полях могут служить данные, полученные в результате либо моделирования радиационных полей с помощью разработанных специальных программ, либо результаты радиационного обследования территории.

Перспективным способом оперативного получения информации о радиационной обстановке является использование измерительных комплексов получения изображения объектов, излучающих фотонное излучение, с помощью мобильных измерительных систем (гаммавизоров). В настоящее время в ведущих ядерных центрах мира, таких как Saclay и Marculle (Франция), BNFL (Великобритания), РИЦ “Курчатовский институт” (Россия), Hanford (США) и многих других, проводятся исследования по разработке средств визуализации источников фотонного ионизирующего излучения и методов измерения уровней радиоактивного загрязнения объектов и территорий.

Оптимизация последовательности демонтажа радиационно загрязненного оборудования.

Атомная электростанция (АЭС), как и любой технический объект, имеет свой жизненный цикл, включающий 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.

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

— обеспечение непревышения 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.

— не должны выполняться работы, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным к основным дозовым пределам облучением.

В России на стадии вывода из эксплуатации находятся энергоблоки № 1, 2 Белоярской (остановлены в 1983 и 1989 гг.) и Нововоронежской (остановлены в 1984 и 1990 гг.) АЭС. Вывод из эксплуатации в ближайшем будущем энергоблоков АЭС, пущенных в эксплуатацию в 1970..80-е годы, учитывая продление их проектного срока эксплуатации, актуализирует проблему минимизации облучаемости при их демонтаже.

Для решения задачи минимизация облучения при проведении работ по демонтажу оборудования энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации, потребовались разработка оригинального алгоритма построения функции Беллмана и программная реализация процедуры МПД [3]. Формулировкой этой задачи является определение оптимальной последовательности демонтажа радиоактивных объектов с целью минимизации облучения персонала.

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 радиационно-опасными объектами.

Особенностью, осложняющей решение задачи в отличие от предыдущей, является зависимость уровня радиационного фона в помещении при выполнении очередной работы от наличия

недемонтированных объектов. Например, при демонтаже N объектов в последовательности $\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(N)$ эффективная доза облучения

$$E = kt_{\alpha(1)}(P_{\alpha(1)} + P_{\alpha(2)} + \dots + P_{\alpha(N)}) + kt_{\alpha(2)}(P_{\alpha(2)} + P_{\alpha(3)} + \dots + P_{\alpha(N)}) + \dots + kt_{\alpha(N)}P_{\alpha(N)},$$

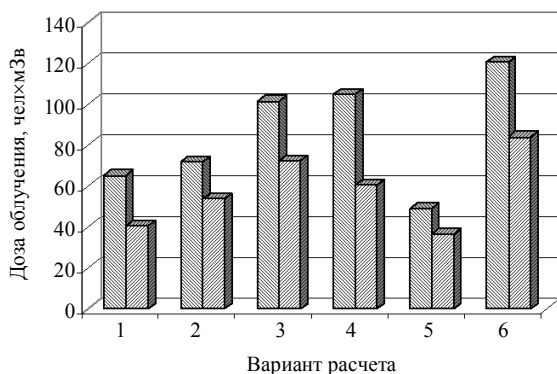
где $P_{\alpha(i)}$ — радиационный параметр, создаваемый i -м элементом;

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).

При демонтаже элемента №1 исключается его дальнейшее влияние на облучение в виде радиационного параметра $P_{\alpha(1)}$, при демонтаже элемента №2 исключается его дальнейшее влияние на облучение в виде радиационного параметра $P_{\alpha(2)}$ и т.д. То есть, при демонтаже i -го элемента исключается дальнейшее его влияние на облучение в виде радиационного параметра $P_{\alpha(i)}$.

Для учета влияния расстояния от источника излучения до работающего на алгоритм решения поставленной задачи в исходные данные, помимо времени демонтажа $t_{\alpha(i)}$ и радиационного параметра $P_{\alpha(i)}$, создаваемого каждым из N демонтируемых объектов, вводятся расстояния между объектами, которые задаются матрицей $X = \{x_{ij}\}$, где x_{ij} — расстояние между i -м и j -м объектом.



Максимальное и минимальное значение доз облучения при различных последовательностях демонтажа оборудования

Программная реализация нескольких десятков примеров для различных радиационно-загрязненных технологических систем показала вычислительную эффективность разработанной методики [4]. Оптимизация последовательности демонтажа позволяет снизить дозы облучения персонала на 25...40 % (см. рисунок).

В реальных условиях демонтаж радиационно-загрязненного оборудования не может проводиться в любой последовательности. Возникают ограничения, связанные с порядком демонтажа некоторых объектов (например, расположенных на различных высотных отметках, связанных конструктивно). Отсюда возникает задача оптимизации последовательности демонтажа с ограничениями в виде условий предшествования. Это в определенной мере сокращает количество

переборов при решении, но потребовало разработки специального подхода, при котором сокращается число возможных вариантов “обхода” [5].

В ближайшее время планируется рассмотрение фундаментальной задачи, посвященной построению теоретических методов решения задач маршрутизации перемещений с выполнением комплекса работ по пунктам следования при наличии ограничений в виде условий предшествования, разработка на этой же основе точных и приближенных алгоритмов, конструирование гибридных схем решения, сочетающих элементы маршрутизации и распределения заданий.

Теоретические конструкции предполагаемого к реализации проекта базируются на использовании нетрадиционных версий МДП. Будут рассматриваться варианты обобщенной задачи курьера с внутренними работами (и при отсутствии таковых), ориентированные потенциально на применение в задачах ядерной энергетики. В этих постановках будут использоваться усложненные версии критерия [6].

Предполагается также исследовать варианты общей постановки, включающие наряду с маршрутизацией элементы задачи распределения между участниками, что соответствует обобщению

задачи нескольких коммивояжеров. Такая задача возникает при необходимости параллельного выполнения ряда аналогичных работ, каждая из которых включает определенное количество операций, последовательность которых может быть изменена в определенных рамках ограничений.

К таким работам можно отнести технологический процесс замены технологических каналов реактора РБМК-1000, включающий более 50 операций, требующих специальных приспособлений. В работе одновременно могут находиться от 150 до 400 ячеек реактора, что приводит к взаимозависимости для соседних ячеек, а также к вариантности последовательности технологических операций для разных ячеек.

Выводы:

Оптимизация траектории движения персонала в радиационных полях и последовательности демонтажа радиационно загрязненного оборудования имеют значительный потенциал в минимизации облучения персонала.

Оптимизация с использованием методов, основанных на идеях динамического программирования, гарантирует оптимальность, обеспечивает удобство программирования решения, универсальность, т.е. приспособленность для задач различного типа.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 10-01-96020 and no. 10-08-00484.

Литература

1. Ташлыков, О.Л. Возможности математических методов моделирования в решении проблемы снижения облучаемости персонала / О.Л. Ташлыков, А.Н. Сесекин, С.Е. Щеклеин, // Вопрос радиацион. безопасности. — 2009. — № 4. — С. 47 — 57.
2. Сесекин, А.Н. Использование метода динамического программирования для оптимизации траектории перемещения работников в радиационно опасных зонах с целью минимизации облучения / А.Н. Сесекин, О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин и др.// Изв. вузов. Ядер. энергетика. — 2006. — № 2. — С. 41 — 48.
3. Ташлыков, О.Л. Разработка оптимальных алгоритмов вывода АЭС из эксплуатации с использованием методов математического моделирования / О.Л. Ташлыков, А.Н. Сесекин, С.Е. Щеклеин, А.Г. Ченцов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. — 2009. — № 2. — С. 115 — 120.
4. Ташлыков, О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация монограф./ О.Л.Ташлыков. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG, — 2011. — 232 с.
5. Методы маршрутной оптимизации радиационно опасных работ / О.Л.Ташлыков, А.Н. Сесекин, С.Е. Щеклеин, А.Г. Ченцов // Безопасность, эффективность и экономика атомн. энергетике: Сб. докл. седьмой междунар. науч.-техн. конференции 26 — 27 мая 2010 г. — Москва, — 2010. — С. 153 — 156.
6. On One Modification of Traveling Salesman Problem Oriented on Application in Atomic Engineering / A.G. Chentsov, A.N. Seseikin, S.Y. Shcheklein, O.L. Tashlykov // American Institute of Physics. Conference Proceeding 2010. pp. — Vol. 1293. 197 — 202.

References

1. Tashlykov O.L. Vozmozhnosti matematicheskikh metodov modelirovaniya v reshenii problem snizheniya obluchaemosti personala [Mathematical Simulation Methods Capability for Solution of the Personnel Exposure Reduction Problem] / O.L.Tashlykov, A.N.Seseikin, S.Y.Shcheklein, F.A.Balushkin, A.G. Chentsov, A.P. Khomyakov // Radiation Safety Problems. — 2009, # 4 (56). — pp. 47 — 57.
2. Seseikin A.N. Ispol'zovanie metoda dinamicheskogo programmirovaniya dlya optimizatsii traektorii peremeshcheniya rabotnikov v radiatsionno opasnykh zonakh s tsel'yu minimizatsii oblucheniya [Using the Method of Dynamic Programming to Optimize Movement Trajectory of Workers in Radioactive Areas to Minimize Exposure] / A.N. Seseikin O.L. Tashlykov, S.Ye. Sheklein, M.J. Kuklin, A.G. Chentsov, A.A. Kadnikov // News of Higher Schools. Nuclear Power Engineering — 2006, # 2. — pp. 41 — 48.

3. Tashlykov O.L. Pazrabotka optimal'nykh algoritmov vyvoda AES iz ekspluatatsii s ispol'zovaniem metodov matematicheskogo modelirovaniya [Development of NPP Decommissioning Optimal Algorithms Using the Methods of Mathematical Modeling] / O.L. Tashlykov, A.N. Seseikin, S.Ye. Sheklein, A.G. Chentsov // News of Higher Schools. Nuclear Power Engineering — 2009, # 2. — pp. 115 — 120.
4. Tashlykov O.L. Dozovye zatraty personala v atomnoy energetike. Analiz. Puti snizheniya. Optimizatsiya. Monograf. [Dosimetric Costs of the Nuclear Energy Personnel. Analysis, Reduction Ways and Optimization] / O.L. Tashlykov: monograph. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG. 2011. — 232 p.
5. Tashlykov O.L. Metody marshrutnoy optimizatsii radiatsionno opasnykh rabot [Route Optimization Methods for Radiation-Hazardous Works] / O.L. Tashlykov, A.N. Seseikin, S.Y. Shcheklein, A.G. Chentsov // Collected papers of the Seventh International Scientific and Technical Conference “Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Industry” (MNTK-2010), May 26-27, 2010. Moscow. — 2010. — pp. 153 — 156.
6. Chentsov A.G. On One Modification of Traveling Salesman Problem Oriented on Application in Atomic Engineering / A.G. Chentsov, A.N. Seseikin, S.Y. Shcheklein, O.L. Tashlykov // American Institute of Physics. Conference Proceeding, Vol. 1293, 2010. — pp. 197 — 202.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Маслов О.В.

Поступила в редакцию 1 февраля 2012 г.