

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МАРШРУТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В МИНИМИЗАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ И ЛИКВИДАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ)**

Ташлыков О.Л.<sup>1</sup>, Щеклеин С.Е.<sup>1</sup>, Сесекин А.Н.<sup>1</sup>, Кокорин В.В.<sup>1</sup>, А.Г.Ченцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,

<sup>2</sup> ИММ УрО РАН,

Екатеринбург, Россия

Подчеркнута специфическая опасность использования атомной энергии. Показаны способы снижения облучаемости персонала при проведении работ в радиационно опасных зонах. Рассмотрены особенности решения задач оптимизации маршрута перемещений персонала в неоднородных радиационных полях и последовательности демонтажа радиоактивного оборудования при выводе объектов использования атомной энергии из эксплуатации. Приведены результаты вычислительных экспериментов по оценке снижения облучаемости персонала при маршрутной оптимизации работ в радиационно опасных условиях.

Любая энергетическая технология обладает определенной опасностью, т.е. возможностью вредного воздействия на человека и окружающую среду, несет в себе угрозы здоровью и жизни эксплуатационного персонала и населения. Наряду с опасностями других технологий, ядерная технология обладает специфической опасностью, обуславливающей особый подход к обеспечению безопасности ее использования.

Специфической особенностью использования атомной энергии (ядерной технологии) являются ядерное излучение различных видов (гамма, бета, альфа, нейтронов) и возможность большого неуправляемого выделения энергии в ядерных установках, применяющих делящиеся ядерные материалы.

В современном виде основополагающие принципы безопасности, включающие обеспечение радиационной безопасности, детально изложены в «Требованиях и рекомендациях МАГАТЭ. Основы безопасности» №SF-1, 2007 г. (всего 10 принципов).

Принципы радиационной безопасности (обоснования, нормирования, оптимизации, защиты будущих поколений и окружающей среды) наиболее широко известны, поскольку касаются всех граждан, а не только профессионалов.

К основным положениям Рекомендаций Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) от 2007 года (Публикация 103) относятся дальнейшее использование фундаментальных принципов обоснования и оптимизации защиты от всех контролируемых ситуаций облучения, которые характеризуются, как ситуации планируемого облучения, аварийные ситуации и ситуации существующего облучения, исходя из ранее предложенного процесса обеспечения радиационной защиты на основе подходов практики и вмешательства и переходя к подходам, основанным на ситуационном анализе. Кроме того подчеркивается усиление принципа оптимизации радиационной защиты, который должен равно применяться ко всем ситуациям облучения при условии ограничений индивидуальных доз и радиационных рисков, а именно: введение граничных доз и рисков для ситуаций планируемого облучения и референтных уровней для ситуаций аварийного облучения и существующего облучения [1].

Среди возможных способов минимизации планируемого облучения, облучения в аварийных ситуациях и ситуации существующего облучения специалистов, проводящих работы в условиях воздействия неоднородных радиационных полей особое место занимает маршрутная оптимизация, поскольку при минимальных материальных затратах оптимизация дает значительный эффект.

Работы по построению методов и алгоритмов решения задач маршрутной оптимизации,

ориентированных на применение в прикладных задачах атомной энергетики, ведутся на протяжении ряда лет в Уральском федеральном университете кафедрами «Прикладная математика» и «Атомные станции и ВИЭ» в 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. Эта одна из наиболее известных задач дискретной оптимизации сочетает простоту постановки и трудности вычислительного характера, т.к. имеется  $N!$  возможных маршрутов, один из которых или несколько дают минимальные издержки (в рассматриваемых задачах – это коллективная доза облучения). Данная задача была адаптирована для определения оптимальной траектории перемещения работника в радиационных полях с целью минимизации «транзитной» дозы облучения.

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.

В последнее время был сделан важный шаг: комплекс ограничений в виде условий предшествования (традиционно считавшихся трудными для методов оптимизации) был использован «в положительном направлении»: для преодоления трудностей вычислительного характера, поскольку на этой основе удалось добиться фактического снижения размерности без потери качества.

**Оптимизация перемещения персонала в радиационных полях с целью минимизации облучения.** Как правило, радиационная обстановка (мощность дозы излучения) неравномерна на площадке (в помещении), где персонал должен перемещаться, выполняя работы в определенных точках. Поэтому при перемещении персонал подвергается воздействию излучения различной интенсивности различное время, и от выбранной траектории перемещения будет зависеть суммарная доза облучения.

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.

При выполнении ремонтных работ выбор маршрута перемещения с минимальной дозой облучения не представляет сложности, так как количество обслуживаемых объектов ограничено одним-двумя. При техническом обслуживании значительного количества объектов в радиационно-опасных зонах требуется использование эффективных вычислительных программ, так как число возможных маршрутов перемещения, как указано выше, составляет  $N!$ .

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  $a-b$ :

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

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  $P_i$

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

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

Теоретическое обоснование использования МДП для решения данной задачи нахождения оптимального маршрута перемещения работников в радиационных полях с целью минимизации облучения подробно рассмотрено в работе [2]. В этом случае МДП конкретизирован для решения ЗК в постановках «обычной» замкнутой и незамкнутой задач: сначала происходит построение функции Беллмана (в обратном «времени»), а затем конструируется оптимальный маршрут обхода обслуживаемых объектов («городов»), задающий последовательность выполнения работ, исходя из решения уравнения Беллмана на каждом шаге.

Для решения подобных задач было специально разработано программное обеспечение на языке программирования DELPHI. Для оценки эффективности оптимизации пути перемещения были просчитаны различные варианты движения работников в зоне контролируемого доступа. Рассмотрены варианты задач замкнутого (работник должен войти и выйти через один вход) и незамкнутого (вход в одном, выход в другом месте) типов. Как показывают результаты, оптимизация траектории перемещения работника в радиационных полях позволяет сократить «транзитную» дозу облучения на величину до 20% [3].

Особый интерес разработанный алгоритм решения данной задачи представляет для определения оптимальной траектории перемещения людей в условиях ликвидации последствий аварии на радиационно-загрязненной территории. Исходными для оптимизации перемещений в радиационных полях могут служить данные, полученные в результате радиационного обследования территории, либо моделирования радиационных полей с помощью специализированных программ.

Проведение радиационного обследования с целью получения достоверной информации о радиационной обстановке как внутри объекта, так и на прилегающих территориях является основной задачей на начальном этапе работ по ликвидации последствий аварии на радиационно опасном объекте или территории. Существуют различные способы получения информации о радиационных полях, наличии «горячих» точек и т.д. На основании этих данных возможно получение картограммы радиационной обстановки в виде изодозных линий с выбранной дискретностью.

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 данный момент 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.

Исследованиями в области создания экспресс-методов и средств измерения распределения полей интенсивности ионизирующих излучений занимаются крупнейшие лаборатории и фирмы мира.

**Оптимизация последовательности демонтажа радиационно-загрязненного оборудования с целью минимизации облучения персонала.** Задача имеет важное социальное значение с точки зрения минимизации коллективной дозы облучения. Так, 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 [4].

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.

При выполнении демонтажных работ в помещении радиационные поля формируются отдельными элементами радиоактивного оборудования и систем, поэтому при удалении (демонтаже) какого-либо объекта (элемента оборудования или системы) параметры радиационного поля изменяются. Эта особенность, заключающаяся в зависимости уровня радиационного фона в помещении при выполнении очередной работы от наличия недемонтированных объектов, значительно осложняет решение задачи в отличие от предыдущей.

Для решения задачи минимизация облучения при проведении работ по демонтажу оборудования АЭС, выводимых из эксплуатации, потребовались разработка оригинального алгоритма построения функции Беллмана и программная реализация процедуры МПД [5]. Формулировкой этой задачи является определение оптимальной последовательности демонтажа радиоактивных объектов с целью минимизации облучения персонала.

Рассмотрим в качестве примера нахождение оптимальной последовательности демонтажа для простейшего варианта – четырех радиоактивных объектов, расположенных в помещении АЭС. Для упрощения не будем учитывать влияние на мощность дозы расстояния от источника излучения до работающего.

В общем случае при демонтаже  $N$  объектов в последовательности  $\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(N)$ , доза облучения:

$$E = t_{\alpha(1)}(\dot{H}_{\alpha(1)} + \dot{H}_{\alpha(2)} + \dots + \dot{H}_{\alpha(N)}) + t_{\alpha(2)}(\dot{H}_{\alpha(2)} + \dot{H}_{\alpha(3)} + \dots + \dot{H}_{\alpha(N)}) + \dots + t_{\alpha(N)}\dot{H}_{\alpha(N)},$$

где  $\dot{H}_{\alpha(i)}$  – мощность дозы излучения, создаваемый  $i$ -м элементом;  $t_{\alpha(i)}$  – время демонтажа  $i$ -го элемента (в данной задаче  $t_{\alpha(i)}$  не зависит от номера последующего демонтируемого объекта, т.к. временем перемещения между объектами пренебрегаем). При демонтаже объекта №1 исключается его дальнейшее влияние на облучение персонала в виде мощности дозы излучения  $\dot{H}_{\alpha(1)}$ , при демонтаже объекта №2 – исключается его дальнейшее влияние на облучение в виде мощности дозы излучения  $\dot{H}_{\alpha(2)}$  и т.д. При демонтаже  $i$ -го объекта исключается дальнейшее его влияние на облучение в виде мощности дозы излучения  $\dot{H}_{\alpha(i)}$ .

Рассмотрим в качестве иллюстрации простейший пример. В табл.1. приведены данные для расчета.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Номер объекта	1	2	3	4
Мощность дозы излучения, создаваемая объектом в помещении, отн.ед/час	2	3	1,5	1,5
Время демонтажа объекта, час	0,2	0,3	0,7	0,5

Как было сказано выше, существует  $N!$  вариантов решения задачи маршрутной оптимизации, т.е. для данного простейшего примера (четыре объекта в помещении) существует 24 варианта решений (рис.1).



Рис.1. Доза облучения персонала при возможных вариантах последовательности демонтажа четырех радиоактивных объектов в помещении.

В результате расчетов найдены две оптимальные последовательности демонтажа, соответствующие минимальной дозе облучения ( $E=5,95$  отн.ед): 2–1–4–3 и 1–2–4–3

На рис.2 графически показано воздействие радиационных полей, создаваемых объектами в процессе демонтажа, по варианту 2–1–4–3.

Максимальная доза облучения (при самом неблагоприятном варианте) составляет 11,45 отн.ед при последовательности демонтажа 4–3–1–2.

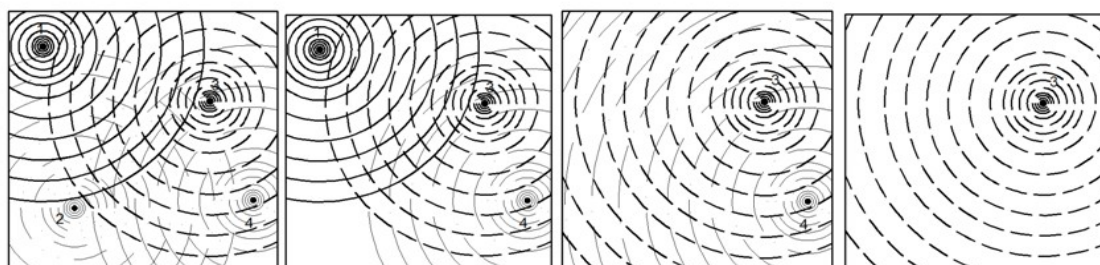


Рис.2. Схема воздействия радиационных полей, создаваемых объектами, в помещении в процессе демонтажа.

Программная реализация нескольких десятков примеров для различных радиационно-загрязненных технологических систем, состоящих из 10-20 элементов, показала вычислительную эффективность разработанной методики. Оптимизация последовательности

демонтажа позволяет снизить дозы облучения персонала на 25...40% (рис.3).

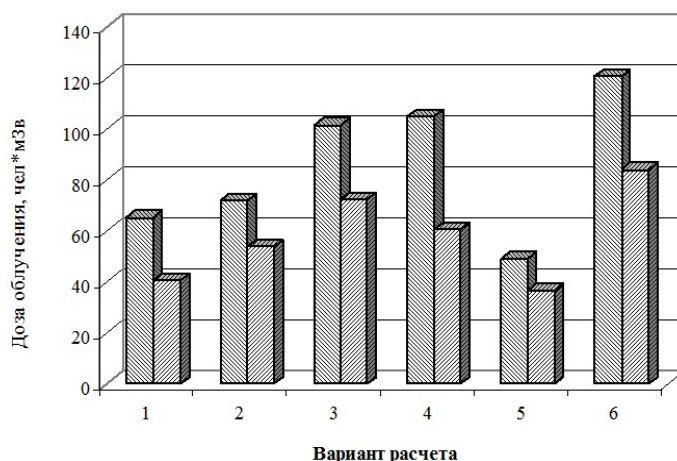


Рис. 3. Максимальное и минимальное значение доз облучения при различных последовательностях демонтажа оборудования.

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 конструкционно). 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» [6].

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 [7].

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.

В условиях ликвидации последствий радиационных аварий помимо задачи определения оптимального маршрута перемещения возникает необходимость решения комбинированной задачи, объединяющей как нахождение оптимальной траектории движения, так и определение оптимальной последовательности «выключения» (удаления или экранирования) наиболее «значимых» с точки зрения формирования радиационных полей) источников излучения. Основной целью такой комбинированной задачи в условиях ликвидации радиационных аварий является минимизация коллективной дозы персонала или соблюдение

(непревышение) установленного дозового бюджета (предела) для аварийно спасательных формирований.

### **Выводы**

Специфической особенностью использования атомной энергии являются ядерное излучение различных видов (гамма, бета, альфа, нейтронов) и возможность большого неуправляемого выделения энергии в ядерных установках, применяющих делящиеся ядерные материалы.

Необходимо усиление принципа оптимизации радиационной защиты, который должен равно применяться ко всем ситуациям облучения (планируемого, аварийного и существующего) при условии ограничений индивидуальных доз и радиационных рисков.

Одним из эффективных способов минимизации последствий техногенных радиационных аварий в виде несанкционированного высвобождения энергии является маршрутная оптимизация выполнения работ в зоне радиоактивного загрязнения с использованием методов, основанных на идеях динамического программирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 10-01-96020 и 10-08-00484)

### Список литературы

1. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
2. Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Куклин 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.
3. Ташлыков О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация: монография. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG. 2011. 232 с.
4. Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Балускин Ф.А., Ченцов А.Г., Хомяков А.П. Возможности математических методов моделирования в решении проблемы снижения облучаемости персонала // Вопросы радиационной безопасности. 2009. № 4. С. 47–57.
5. Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Ченцов А.Г. Разработка оптимальных алгоритмов вывода АЭС из эксплуатации с использованием методов математического моделирования // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009. № 2. С. 115–120.
6. Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Ченцов А.Г. Методы маршрутной оптимизации радиационно опасных работ // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетике: Сб. докладов седьмой международной научно-технической конференции 26-27 мая 2010 г. Москва, 2010. С. 153–156.
7. Chentsov A.G., Sesekin A.N., Shcheklein S.Y., Tashlykov O.L. On One Modification of Traveling Salesman Problem Oriented on Application in Atomic Engineering // American Institute of Physics. Conference Proceeding, Vol. 1293. 2010. pp. 197–202.