

**В.В. КОРОБКИН, А.Н. СЕСЕКИН,
О.Л. ТАШЛЫКОВ, А.Г. ЧЕНЦОВ**

**МЕТОДЫ МАРШРУТИЗАЦИИ
И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ**

**в задачах повышения безопасности и эффективности
эксплуатации атомных станций**

Под общей редакцией член-корр. РАН И.А. Каляева

“Новые технологии”, Москва

2012

УДК 621.039

ББК 31.47

К66

Издание осуществлено при поддержке РФФИ (проекты 10-01-96020 и 10-08-00484), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН "Математическая теория управления" и Программы развития инновационной инфраструктуры Южного федерального университета на 2010-2013 г. (210-219-001.147).

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор В. В. Козляков,

д-р техн. наук С. Г. Капустян,

И. В. Малахов,

А. О. Шмидт.

В. В. Коробкин, А. Н. Сесекин, О. Л. Ташлыков, А. Г. Ченцов.

К66 Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения эффективности и безопасности эксплуатации атомных станций / Под общ. ред. член-корр.РАН И.А. Каляева. – М.: Новые технологии, 2012. 233 с.: ил.

ISBN 978-5-94694-027-6

Монография посвящена теоретическим задачам маршрутной оптимизации и их практическим приложениям в целях повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций. Рассматриваются задачи оптимизации перегрузки ядерного топлива, перемещения персонала и оптимизации демонтажа радиационно-загрязненного оборудования. Решения этих задач осуществляются путем маршрутной оптимизации перемещений, что обеспечивает сокращение времени перегрузки ядерного топлива и снижение дозовых нагрузок на оперативный персонал. Исследуются различные математические постановки задач маршрутной оптимизации, особенно, где функция затрат зависит от списка невыполненных заданий. Предложены оригинальные подходы к решению этой задачи, основанные на модификациях метода динамического программирования. Результаты теоретических исследований подтверждаются результатами вычислительных экспериментов и имеют практическую направленность.

Для научных сотрудников, аспирантов, студентов и инженерно-технического персонала, специализирующихся в области проектирования и эксплуатации атомных станций.

ISBN 978-5-94694-027-6

УДК 621.039

ББК 31.47

© Коробкин В.В., Сесекин А.Н.,
Ташлыков О.Л., Ченцов А.Г., 2012

© ООО "Издательство "Новые
технологии", 2012

Оглавление

Список сокращений	6
Введение	8
I ИНЖЕНЕРНЫЕ ЗАДАЧИ	13
1. Оптимизация перемещений ТВС при перегрузке топлива в активной зоне реактора типа ВВЭР	14
1.1. Общие сведения	14
1.2. Ядерное топливо в реакторах типа ВВЭР	19
1.3. Топливные циклы на АЭС с реактором типа ВВЭР	22
1.4. Перегрузка ядерного топлива реактора ВВЭР-1000	26
1.5. Оптимизация перегрузки ТВС реактора ВВЭР-1000	39
1.5.1. Общие условия	39
1.5.2. Постановка задачи	42
1.5.3. Параметры задачи	51
1.5.4. Алгоритм решения задачи	53
1.5.5. Вычислительный эксперимент	55
2. Оптимизация перемещения персонала в радиационных полях с целью минимизации облучения	57
2.1. Общие сведения	57
2.2. Особенности постановки задачи оптимизации перемещения персонала в радиационных полях с целью минимизации облучения	60
2.3. Моделирование нестационарного во времени поля гамма-излучения	62
2.4. Применение метода динамического программирования для оптимизации траектории движения работника с целью минимизации облучения при перемещении	67

3. Оптимизация последовательности демонтажа радиационно загрязненного оборудования	76
3.1. Общие требования к выводу АЭС из эксплуатации	76
3.2. Особенности постановки и решения задачи оптимизации последовательности демонтажа радиоактивного оборудования	86
Заключение к первой части монографии	92
II МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ	93
4. Задачи маршрутизации с ограничениями, ориентированные на применение в атомной энергетике	94
4.1. Математические модели. Введение	94
4.2. Экстремальные задачи маршрутизации с ограничениями и явной зависимостью функций стоимости от списка заданий	95
4.3. Задача коммивояжера (простейший вариант)	98
4.4. Обобщение задачи коммивояжера, ориентированное на решение проблемы радиационной безопасности при выполнении комплекса работ	106
4.5. Динамическое программирование в задаче маршрутизации, ориентированной на использование для целей минимизации дозовой нагрузки	120
4.6. Динамическое программирование в задаче маршрутизации, ориентированной на проблему демонтажа энергоблока, выведенного из эксплуатации	136
4.7. Основная и вспомогательная задачи маршрутизации (метод итераций с элементами декомпозиции маршрутной задачи о посещении мегаполисов)	147
4.8. Связь основной и вспомогательной задач маршрутизации	158
4.9. Метод итераций для решения модельного варианта задачи оптимизации дозовой нагрузки	162
4.10. Регулярный этап итерационной процедуры	176
4.11. Задача оптимизации трассы	183
5. Вычислительный эксперимент: решение модельных задач	197
5.1. Введение	197
5.2. Пример, моделирующий решение задачи минимизации дозовой нагрузки	198

5.3. Пример, моделирующий решение задачи минимизации дозой загрузки (вычислительный эксперимент)	207
5.4. Пример, моделирующий на идейном уровне решение задачи демонтажа энергоблока	215
Заключение ко второй части монографии	221
Приложение	222
Литература	228

Литература

- [1] Альбом специального оборудования АЭС с серийными блоками ВВЭР-1000. М.: МХО Ин-тератомэнерго. 1989. 472 с.
- [2] Алгоритм для решения задачи о коммивояжере / Дж. Литл [и др.] // Экономика и математические методы. 1965. №1. С. 94–107.
- [3] **Авдеев А.А., Кобелев А.М., Коробкин В.В., Жильников Д.В., Ефремов С.М., Пинчук М.Э., Марченко С.А.** Машины перегрузки ядерного топлива нового поколения для энергоблоков проекта АЭС-2006 с ВВЭР-1200 // Интеграл. - Москва:-2010.- № 1(51). Стр. 28-33.
- [4] **Андрушечко С.А. и др.** АЭС с реактором типа ВВЭР. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрушечко, А.М. Афров, В.Ю. Васильев. В.Н.Генералов, К.В. Кососуров, Ю.М. Семченков, В.Ф. Украинцев. - М.: Логос, 2010. 603 с.
- [5] **Валушкин Ф.А., Сесекин А.Н., Фрейберг Ю.А., Ченцов А.Г.** Об одном варианте задачи коммивояжера // Вестник компьютерных и информационных технологий. № 12, 2009, С. 45–50.
- [6] **Валушкин Ф.А., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Чеблоков И.Б., Ченцов А.Г.** Использование метода динамического программирования для оптимизации демонтажа оборудования энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации, с целью минимизации облучения // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. № 4. 2009. С. 169-176.
- [7] **Баюклин В., Славягин П.** Герметичность под контролем // Росэнергоатом. 2004. №12. С. 36-38.
- [8] **Беллман Р.** Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере /Р. Беллман // Кибернетический сборник. М.: Мир, 1964. Т.9. С. 219–228.
- [9] **Беллман Р.** Динамическое программирование. / Р. Беллман. М.: Мир, 1960. 200 с.
- [10] **Беллман Р.** Динамическое программирование и основы современной теории управления. / Р. Беллман, Р. Калаба. М.: Наука, 1969. 118 с.
- [11] **Буслаева Л.Т.** К вопросу декомпозиции процесса последовательного выбора вариантов / Л.Т. Буслаева, А.Г. Ченцов // Математическое моделирование. 1991. Т. 3, №4. С. 103–113.
- [12] **Варга Дж.** Оптимальное управление дифференциальными и функциональными уравнениями. М.: Наука, 1977. 624 с.
- [13] **Васильев Ф.П.** Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1988. 549 с.
- [14] **Гэри М., Джонсон Д.** Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. 416 с.

- [15] **Зобнин Б.В.** Об одной задаче маршрутной оптимизации и ее приложениях / Б.В. Зобнин, Л.Н. Коротаева, А.Г. Ченцов // Проблемы передачи информации. 1997. Т. 33, №4. С. 1–18.
- [16] **Каляев И.А., Коробкин В.В., Баюклин В.Ф., Шкаровский А.Н.** Повышение безопасности АЭС за счет внедрения новых технологий Атомные электрические станции. Двадцать лет после аварии на Чернобыльской АЭС // Сборник статей под общей редакцией д.э.н. С.А. Обозова. - М.: концерн "Росэнергоатом 2006. С. 246-250.
- [17] **Каляев И.А., Коробкин В.В., Кухаренко А.П., Макеев В.В., Поваров В.П., Румянцев К.Е.** Инновационные разработки ЮНЦ РАН в области создания систем управления для атомной энергетики / Инновации. - СПб.-2006.- № 10(97). Стр. 65-68.
- [18] **Кесслер Р.** Ядерная энергетика. М.: Энергшаотомиздат. 1986.286 с.
- [19] **Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р.** Алгоритмы: построение и анализ. М.: МЦНМО, 2002. 960 с.
- [20] **Коробкин В.В., Ченцов П.А.** Оптимизация перемещения и замены тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора типа ВВЭР / Мехатроника, автоматизация, управление МАУ-2009 // Материалы Международной научно-технической конференции. - Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2009. С. 347-349
- [21] **Коробкин В.В., Макеев В.В., Поваров В.П., Лебедев О.В.** Система бесконтактного определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.- Новочеркасск, 2006. Прил. № 16. С.37-41.
- [22] **Красовский Н.Н.** Игровые задачи о встрече движений. М.: Наука. 1970. 420 с.
- [23] **Красовский Н.Н., Субботин А.И.** Позиционные дифференциальные игры. М.: Наука. 1974. 456 с.
- [24] **Кузнецов А.** Корпорация "ТВЭЛ": первые десять // Росэнергоатом. 2006. №9. С. 8-11.
- [25] **Куратовский К., Мостовский А.** Теория множеств. М.: Мир. 1970. 416 с.
- [26] **Малахов И.В., Коватев С.В., Коробкин В.В.** Модернизация системы управления перегрузочной машины // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.- Новочеркасск, 2006. Прил. № 16. С.20-23.
- [27] **Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х.** Задача коммивояжера. Вопросы теории // Автоматика и телемеханика. 1989. №9. С. 3–34.
- [28] **Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х.** Задача коммивояжера. Точные алгоритмы // Автоматика и телемеханика. 1989. №10. С.3–29.
- [29] **Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х.** Задача коммивояжера. Приближенные алгоритмы // Автоматика и телемеханика. 1989. №11. С. 3–26.
- [30] **Мину М.** Математическое программирование. М.: Наука. 1990. 486 с.
- [31] **Новиков А.Н., Духовенский А.С., Павловичев А.М. и др.** Развитие топливных циклов реакторов ВВЭР // Международная научно-практическая конференция "45 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом". Нововоронеж, 23-25 сентября 2009 г.
- [32] **Новый отчет времени** // Росэнергоатом. 2004. №10. С. 2-3.

- [33] **Петров П.А.** Ядерные энергетические установки. М.: Госэнергоиздат. 1958. 256 с.
- [34] **Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С.** Профилирование ядерного реактора. М.: Энергоатомиздат. 1988. 240 с.
- [35] **Рыжов С.Б., Мохов В.А., Васильченко И.Н., Кушманов С.А., Куракин К.Ю., Медведев В.С.** Опыт эксплуатации новых топливных сборок и перспективы развития топливных циклов для АЭС с ВВЭР / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Сборник докладов седьмой международной научно-технической конференции 26-27 мая 2010 г. М.: ОАО "Концерн Росэнергоатом 2010. С.36-42.
- [36] **Самойлов А.Г.** Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
- [37] **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. 41-48.
- [38] **Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г.** Об одной задаче маршрутизации на "узкие места" // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2010. Т. 16, №1. С. 153-170.
- [39] **Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г.** Обобщенная задача курьера с функцией затрат, зависящей от списка заданий // Изв. РАН. ТиСУ. 2010. №2. С. 68-77.
- [40] **Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г.** Маршрутизация с абстрактной функцией агрегирования перемещений // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2010. Т. 16, №3. С. 241-264.
- [41] **Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г.** Задачи маршрутизации перемещений. Электронно-библиотечная система "Издательства "Лань". С-Птб. 2011. 240 с.
- [42] **Сигал И.Х., Иванова А.П.** Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. М.: Наука. 2007. 304 с.
- [43] **Троянов В.М., Ватулин А.В., Новиков В.В., Шкабура И.А.** Разработка новых видов топлива и конструкционных материалов для крупномасштабной ядерно-энергетической системы России // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Сборник докладов седьмой международной научно-технической конференции 26-27 мая 2010 г. М.: ОАО "Концерн Росэнергоатом 2010. С.14-18. .
- [44] **Ташлыков О.Л.** Ремонт оборудования атомных станций. Екатеринбург. УГТУ-УПИ. 2003. 319 с.
- [45] **Ташлыков О.Л.** Методы оценки и снижения дозовых нагрузок при ремонте АЭС: учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 118 с.
- [46] **Ташлыков О.Л.** Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация. Saarbruecken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG, 2011. 232 с.
- [47] **Ташлыков О.Л., Кузнецов А.Г., Арефьев О.Н.** Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1995. Кн. 1. 256 с.

- [48] **Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Ченцов А.Г.** О проблеме снижения облучаемости персонала при демонтаже радиоактивного оборудования снимаемых с эксплуатации объектов использования атомной энергии / Безопасность критических инфраструктур и территорий: Тезисы докладов II Всероссийской конференции и XII Школы молодых ученых. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. с.218-220.
- [49] **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. № 2. 2009. С. 115-120.
- [50] **Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Ченцов А.Г.** Методы маршрутной оптимизации радиационно опасных работ / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Сборник докладов седьмой международной научно-технической конференции 26-27 мая 2010 г. - Москва, 2010. С.153-156.
- [51] **Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Балушкин Ф.А., Ченцов А.Г., Хомяков А.П.** Возможности математических методов моделирования в решении проблемы снижения облучаемости персонала // Вопросы радиационной безопасности. № 4, 2009. С. 39-49.
- [52] **Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Климова В.Л., Наумов А.А.** Моделирование виртуальных радиационных полей // Дистанционное и виртуальное обучение. 2011. №8. С. 24-34.
- [53] **Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Маркелов Н.И.** Математическое моделирование дозовых полей при планировании облучения ремонтного персонала // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2004. - №1. -С.39-44.
- [54] **Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Маркелов Н.И.** Оптимизация ремонтных работ с учетом дозовых затрат персонала / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Пленарные и секционные доклады пятой международной научно-технической конференции 19-21 апреля 2006 г. - Москва, 2006. с.251-254.
- [55] **Хелд М., Карп Р.М.** Применение динамического программирования к задачам упорядочивания // Кибернетический сборник. М.: Мир. 1964. Т. 9. С. 202-218.
- [56] **Ченцов А.Г.** Метод динамического программирования в экстремальных задачах маршрутизации с ограничениями // Изв. РАН. ТиСУ. 2010. №3. С. 52-66.
- [57] **Ченцов А.Г.** Об оптимальной маршрутизации в условиях ограничений // ДАН, 2008, Т. 423, №3, С. 303-307.
- [58] **Ченцов А.А., Ченцов А.Г.** О реализации метода динамического программирования в обобщенной задаче курьера // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2007. Т. 13. №3. С.136-160.
- [59] **Ченцов А.А.** Экстремальная задача маршрутизации "на узкие места" с ограничениями в виде условий предшествования / А.А. Ченцов, А.Г. Ченцов // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2008. Т. 14. №2. С.129-142.
- [60] **Ченцов А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Экстремальная задача маршрутизации с внутренними потерями // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2008. Т. 14, №3. С. 183-201.
- [61] **Ченцов А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Метод итераций в задаче маршрутизации с внутренними потерями // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2009. Т. 15, №4. С. 270-289.

- [62] **Ченцов А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Условия предшествования в одной задаче экстремальной маршрутизации с ограничениями // Алгоритмы и программы средства параллельных вычислений. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. Вып. 10. С. 60-76.
- [63] **Ченцов А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А.** Экстремальные задачи маршрутизации перемещений с ограничениями и внутренними работами // Известия ВУЗов. Математика. 2010. №6. С. 64-81.
- [64] **Ченцов А.Г.** Динамическое программирование в экстремальных задачах маршрутизации с ограничениями. Материалы конференции “Дискретная оптимизация и исследование операций” Республика Алтай. 27 июня — 3 июля 2010 г. Новосибирск, Институт математики. С. 70-74.
- [65] **Ченцов А.Г.** Задачи маршрутизации с ограничениями на внутренние работы // Пленарные доклады международной конференции “Параллельные вычисления и задачи управления”. Институт проблем мехвники им. В.А. Трапезникова РАН. 2010. с. 47-59.
- [66] **Ченцов А.Г.** Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. Москва – Ижевск.: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика” Ижевск.: Институт компьютерных исследований. 2008. 240 с.
- [67] **Ченцов А.Г.** Множества, события, вероятность (основные структуры). Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. 200 с.
- [68] **Шиянов А.И. и др.** Системы управления перегрузочных манипуляторов атомных электростанций с ВВЭР / А.И. Шиянов, М.И. Герасимов, И.В. Муравьев. - М.: Энергоатомиздат, 1987. 176 с.
- [69] **Шкаровский А., Рябинин Ю.** Высокая надежность. Внедрение новых видов топлива на АЭС с ВВЭР // Росэнергоатом. 2010. №7. С. 30-33.
- [70] **Chentsov A.G., Sesekin A.N., Shcheklein S.E., 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. P. 197-202.