УДК 519.7:621.039

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДЕМОНТАЖА ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС, ВЫВОДИМЫХ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ, С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ОБЛУЧЕНИЯ

Ф.А. Балушкин*, А.Н. Сесекин*, О.Л. Ташлыков*, И.Б. Чеблоков*, С.Е. Щеклеин*, А.Г. Ченцов**

***УГТУ-УПИ, г.Екатеринбург**

****Институт математики и механики УрО РАН, г.Екатеринбург**

Обоснована актуальность решения задачи оптимизации демонтажа радиоактивного оборудования при выводе из эксплуатации энергоблоков АЭС. Проведен математический анализ возможности использования и преимущества метода динамического программирования в решении данной задачи. Выполнены оценочные расчеты оптимальной последовательности демонтажа радиоактивного оборудования, в том числе при наличии условий предшествования, и сокращения облучаемости персонала по сравнению с исходным вариантом.

Жизненный цикл атомных электростанций (АЭС), а также других радиационно опасных объектов включает в себя этап вывода из эксплуатации. В настоящее время в России на стадии снятия с эксплуатации находятся энергоблоки №1, 2 Белоярской и №1, 2 Нововоронежской АЭС. Через 10–15 лет количество выводимых из эксплуатации блоков АЭС значительно возрастет.

Технологическая последовательность работ по выводу из эксплуатации энергоблоков АЭС включает в себя несколько стадий, из которых наиболее трудо- и дозозатратной является демонтаж радиоактивного оборудования.

При выводе из эксплуатации необходимо, чтобы на всех этапах выполнения работ радиационное воздействие на работников, население и окружающую среду не приводило к превышению действующих на момент выполнения работ пределов доз облучения работников и населения, а также нормативов по выбросам, сбросам и концентрациям радиоактивных веществ в различных природных средах [1].

Помимо использования традиционных средств (дистанционно управляемых демонтажных комплексов, проведения дезактивации), требующих значительных затрат, снижение дозовых нагрузок работников может быть достигнуто оптимизацией последовательности демонтажа радиоактивного оборудования [2].

Рассмотрим возможность решения этой задачи с использованием расчетных программ, разработанных в Уральском государственном техническом университете – УПИ кафедрами «Прикладная математика» и «Атомная энергетика» в сотрудничестве с Институтом математики и механики УрО РАН. Поставленная задача может быть интерпретирована как модификация задачи коммивояжера (ЗК), в которой исследуются вопросы оптимизации перемещений между заданными пунктами, обычно именуемыми «городами». Это одна из наиболее известных задач дискретной оптимизации (торговец, начиная с некоторой базы, хочет посетить каждый из N других городов только один раз), сочетающая простоту постановки и трудности вычислительного характера, т.к. имеется $N!$ возможных маршрутов, один из которых или несколько дают минимальные издержки, в данном случае коллективную дозу облучения.

В данном случае в качестве математического «инструмента» для решения ЗК используется метод динамического программирования (МДП), являющийся наиболее эффективным в качественном отношении, поскольку гарантирует оптимальность, обеспечивает удобство программирования решения, а также является универсальным, т.е. приспособленным для задач различного типа.

Использование МДП для нахождения оптимального маршрута перемещения работников в радиационных полях с целью минимизации облучения подробно рассмотрено в работе [3]. 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. В этой связи отметим конструкцию МДП в [4,5], ориентированную на решение классической ЗК.

Следующими шагами стали разработка теоретического обоснования, алгоритма построения функции Беллмана и программная реализация процедуры МДП для решения задачи минимизации облучения персонала при демонтаже радиоактивного оборудования энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации.

Рассмотрим радиоактивную систему в отдельном помещении, имеющую в своем составе N элементов, каждый из которых создает излучение с определенной мощностью дозы. Одновременно с этим трудозатраты на демонтаж каждого элемента различны. Эффективная доза облучения E (без учета влияния расстояния), получаемая работниками при демонтаже, будет зависеть от времени их пребывания в радиационных полях, создаваемых элементами радиоактивной системы:

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

где $P_{\alpha(i)}$ – радиационный параметр (мощность дозы, мощность воздушной кермы и т.д.), создаваемый i-м элементом; k – коэффициент перехода от радиационного параметра $P_{\alpha(i)}$ к эффективной дозе; $t_{\alpha(i)}$ – время демонтажа i-го элемента.

Если рассмотреть последовательность демонтажа в порядке возрастания номеров элементов системы (1, 2, ..., N), то 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. Таким образом, при демонтаже i-го элемента исключается дальнейшее его влияние на облучение в виде радиационного параметра $P_{\alpha(i)}$.

Оптимизация последовательности демонтажа элементов радиоактивной системы позволяет минимизировать дозы облучения работников.

Решение этой задачи усложняется тем, что затраты на переход от объекта к объекту зависят не только от этих двух объектов, как в классическом варианте ЗК, но и от множества еще не обойденных объектов (уровень радиационного фона при выполнении очередной работы зависит от наличия недемонтированных элементов в помещении).

Математическая формализация задачи. Полагаем в дальнейшем, что задано некоторое натуральное число $N > 2$, отображение

$$(i,j,K) \to c_{i,j}[K] : \overline{0,N} \times \overline{1,N} \times \hbar \to [0,\infty[, \tag{1}$$

где $\hbar$ – семейство всех непустых подмножеств (п/м) «промежутка» $\overline{1,N} = \{1;\ldots;N\}$ натурального ряда N:={1; 2; ...} (здесь и ниже := есть равенство по определению); соответственно $\overline{0,N} = \{0;1;\ldots;N\}$. Заметим, что с практической точки зрения область определения отображения (1) можно было бы «сократить», а именно, в рассматриваемой ниже задаче существенны только значения $c_{ij}[K]$ для случаев, когда

$$K \in \hbar, i \in \overline{0,N} \setminus K, \quad j \in K. \tag{2}$$

Мы будем, однако, доопределять упомянутые значения, соответствующие случаю (2), произвольным образом. Для определенности будем полагать, что для триплетов $(i,j,K) \in \overline{0,N} \times \overline{1,N} \times \hbar$, не удовлетворяющих (2), $c_{ij}[K] := 0$. Как обычно в ЗК, мы рассматриваем в качестве маршрутов всевозможные перестановки α чисел из $\overline{1,N}$; эти числа-индексы, следуя традиции, называем «городами»; число 0 соответствует базе, из которой развертывается тот или иной маршрут α; последний оценивается затратами вида

$$\begin{aligned} & c_{0,\alpha(1)}\left[\overline{1,N}\right] + \sum_{i=2}^{N} c_{\alpha(i-1),\alpha(i)}\left[\left\{\alpha(j) : j \in \overline{i,N}\right\}\right] = \\ & = c_{0,\alpha(1)}[1,N] + \sum_{i=2}^{N} c_{\alpha(i-1),\alpha(i)}\left[\overline{1,N} \setminus \left\{\alpha(j) : j \in \overline{1,i-1}\right\}\right]. \end{aligned} \tag{3}$$

Содержательный смысл (3) состоит в следующем. По мере развития маршрута мы «выключаем» из активного режима некоторые «источники» (в данной задаче – это источники излучения), что учитывается слагаемыми в (3) в терминах заданной априори зависимости (1). Из (3) видно, что значимыми для оценки маршрута могут быть только значения (1), соответствующие случаю (2). Мы рассматриваем далее задачу минимизации значений (3) в классе всех маршрутов, т.е. в классе всевозможных перестановок чисел из $\overline{1,N}$. Уточним постановку задачи.

Через P условимся обозначать множество всех перестановок в $\overline{1,N}$, т.е. множество всевозможных маршрутов. Через π обозначаем отображение из P в $[0, \infty[$, сопоставляющее каждому маршруту $\alpha \in \mathrm{P}$ значение (3): $\pi: \mathrm{P} \to [0, \infty[$.

Рассматриваемая ниже задача имеет вид

$$\pi(\alpha) \to \min, \alpha \in \mathrm{P}. \tag{4}$$

Через V обозначаем значение задачи (4), т.е.

$$V := \min_{\alpha \in \mathrm{P}} \pi(\alpha) \in [0,\infty[. \tag{5}$$

Оптимальным называем всякий маршрут a_0 0 R, для которого $p(a_0) = V$. Данная постановка традиционна для ЗК; ее особенности связаны только с характером платежной матрицы (см. (1)), что проявляется, в частности, в (3).

Метод динамического программирования. Рассмотрим укороченные маршрутные задачи, определяемые как задачи на экстремум, подобные (4), но касающиеся посещение не всех, вообще говоря, «городов» из $\overline{1,N}$. Условимся в этой связи о некоторых обозначениях.

Если $K \in \hbar$, то через $|K|$ обозначаем количество элементов K; $|K| \in \overline{1,N}$. Кроме того, полагаем $|\varnothing| := 0$. Пусть $\mathrm{N} := \hbar \cup \{\varnothing\}$ (семейство всех п/м $\overline{1,N}$). Если $K \in \hbar$, то через $(bi)[K]$ обозначаем множество всех биекций [8] «отрезка» $\overline{1,|K|}$ на K. Ясно, что $\mathrm{P} = (bi)[\overline{1,N}]; (bi)[K] \neq \varnothing \quad \forall K \in \hbar$. Условимся о следующем соглашении. Если $K \in \hbar$ и $i \in \overline{0,N}$, то при $|K| \geq 2$ $\pi_K^{(i)} := (bi)[K] \to [0,\infty[$ определяем посредством правила: при $\alpha \in (bi)[K]$

$$\pi_K^{(i)}(\alpha) := c_{i,\alpha(1)}[K] + \sum_{j=2}^{|K|} c_{\alpha(j-1),\alpha(j)}\left[\left\{\alpha(\ell) : \ell \in \overline{j,|K|}\right\}\right] = \\ = c_{i,\alpha(1)}[K] + \sum_{j=1}^{|K|-1} c_{\alpha(j-1),\alpha(j)}\left[\left\{\alpha(\ell) : \ell \in \overline{j+1,|K|}\right\}\right]. \tag{6}$$

Если же $K \in \hbar$ таково, что $|K| = 1$ и $i \in \overline{0,N}$, то и при $\alpha \in (bi)[K]$

$$\pi_K^{(i)}(\alpha) := c_{i,m}[K], \tag{7}$$

где $m \in \overline{1,N}$ таково, что $K = \{m\}$.

Рассматриваем в качестве укороченной всякую задачу

$$\pi_K^{(i)}(\alpha) \to \min, \alpha \in (bi)[K], \tag{8}$$

где $K \in \hbar$ и $i \in \overline{0,N}$. Разумеется, задача (8) определена для каждых $i \in \overline{0,N}$ и $K \in \hbar$, т.е. мы имеем целый набор укороченных задач. В частности, в (6), (8) можно полагать $K = \overline{1,N}$ и $i = 0$. Полезно иметь в виду, что

$$\pi_{\overline{1,N}}^{(0)} = \pi, \tag{9}$$

а тогда основная задача (4) «превращается» в вариант (7). Учитывая это обстоятельство, мы, подобно (5), введем экстремумы (значения) укороченных задач (8): если $K \in \hbar$ и $i \in \overline{0,N}$, то

$$\upsilon(i,K) := \min_{\alpha \in (bi)[K]} \pi_K^{(i)}(\alpha). \tag{10}$$

Из (10) следует, в частности, что

$$V = \upsilon\left(0,\overline{1,N}\right). \tag{11}$$

Наконец, полагаем по определению, что $\upsilon(i,\varnothing) := 0 \ \forall i \in \overline{0,N}$.

Таким образом, определена функция Беллмана задачи (4)

$$(i,K) \to \upsilon(i,K) : \overline{0,N} \times \mathrm{N} \to [0,\infty[; \tag{12}$$

равенство (11) характеризует естественное согласование основной задачи (4) и серии укороченных задач (8). Полезно, однако, ввести одно несущественное преобразование задач (8).

Предложение. Если $K \in \hbar$ и $i \in \overline{0,N} \setminus K$, то

$$\upsilon(i,K) = \min_{i \in K}\left[c_{i,j}[K] + \upsilon\left(j, K \setminus \{j\}\right)\right]. \tag{13}$$

Обсудим (13) (уравнение Беллмана): в позиции (i, K) значение укороченной задачи, стартующей из объекта i (города i в терминологии ЗК) и характеризуемой заданиями из множества K, выражается в терминах текущих затрат, связанных с очередным заданием $k \in K$, и перспективных затрат в укороченной задаче, стартующей уже из объекта k при наличии заданий из множества $K \backslash \{k\}$. На основе (13) можно построить функцию Беллмана, после чего по информации о массиве значений этой функции – оптимальный маршрут (см. [6, гл. 3]).

Программная реализация рассмотренного алгоритма расчета облучаемости персонала без учета фактора расстояния показывает (рис. 1), что оптимальная последовательность демонтажа снижает дозы облучения на 30–50%.

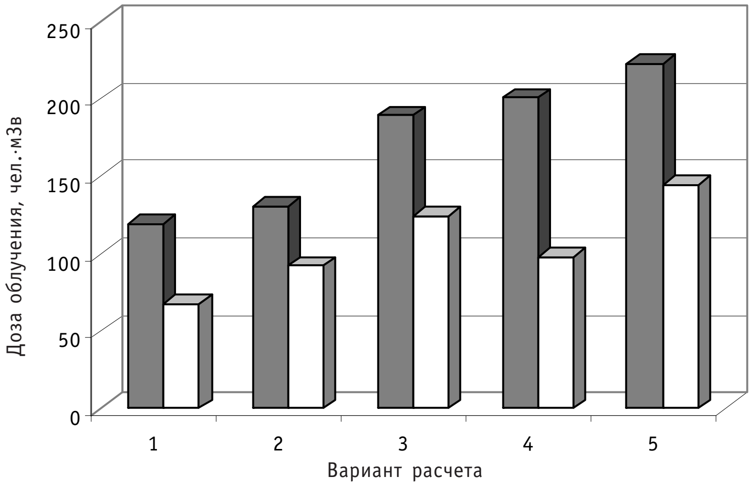

Рис. 1. Облучаемость персонала без учета фактора расстояния: ■ – максимальное значение; □ – минимальное значение

Как известно, мощность дозы излучения (воздушной кермы) обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника излучения до точки детектирования x_{ij}^2 [7]. Следовательно, при значительных размерах помещения (зоны демонтажа) необходимо учитывать влияние расстояния на мощность дозы излучения в точке детектирования, создаваемой различными элементами радиоактивной системы.

Рассмотрим влияние расстояния от источника излучения до работающего на алгоритм решения поставленной задачи. Для этого в исходные данные помимо времени демонтажа $t_{\alpha(i)}$ и радиационного параметра $P_{\alpha(i)}$, создаваемого каждым из N демонтируемых объектов, введем расстояния между объектами, которые задаются матрицей $X = \{x_{ij}\}$, где x_{ij} – расстояние между i-ым и j-ым объектами (рис 2).

Программная реализация около тридцати примеров для различных радиоактивных систем показала вычислительную эффективность разработанной методики.

Рассмотрим в качестве примера один из выполненных вариантов расчета облучаемости персонала с учетом расстояний между источниками излучения и точкой детектирования. В таблицах 1, 2 приведены исходные данные для расчета.

Таблица 1

Характеристики демонтируемых объектов

Номер объекта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Мощность дозы, мЗв/ч	2,75	2,09	2,1	1,45	2,42	1,21	0,54	2,03	0,98	1,58
Время демонтажа объекта, ч	1,72	0,81	0,7	1,45	1,29	0,49	1,33	1,0	1,24	0,52

Таблица 2

Расстояние между объектами x_{ij}, м

Номер объекта	Номер объекта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	2,5	4,1	4,5	3,5	1,8	2,34	1,5	2,92	4,74
2	2,5	–	2	3,5	4,3	4,5	4,74	2,92	1,5	3,81
3	4,1	2	–	2,3	4	5	5,22	4,37	2,5	2,75
4	4,5	3,5	2,3	–	2,5	4,2	4,46	4,74	3,81	1,5
5	3,5	4,3	4	2,5	–	2	2,5	3,81	4,55	2,92
6	1,8	4,5	5	4,2	2	–	1,5	2,34	4,74	4,46
7	2,34	4,74	5,22	4,46	2,5	1,5	–	1,8	4,5	4,2
8	1,5	2,92	4,37	4,74	3,81	2,34	1,8	–	2,5	4,5
9	2,92	1,5	2,5	3,81	4,55	4,74	4,5	2,5	–	3,5
10	4,74	3,81	2,75	1,5	2,92	4,46	4,2	4,5	3,5	–

Таблица 3

Последовательность демонтажа объектов	Доза, мЗв
7→9→4→5→1→8→6→2→3→10	31,6
10→3→2→6→8→1→5→4→9→7	24

В таблице 3 приведены результаты расчетов по разработанной программе максимальной и минимальной доз облучения при демонтаже объектов в различной последовательности.

Из представленных на рис. 2 вариантов расчета (вариант № 1 соответствует данным, приведенным в табл. 1–3) следует, что оптимизация последовательности демонтажа радиоактивного оборудования позволяет снизить дозы облучения персонала на 25–40%.

В реальных условиях на последовательность демонтажа элементов систем АЭС накладываются определенные ограничения, связанные с конструкционными особенностями, размещением и т.д. Поэтому в заключение статьи кратко обсудим один более общий подход, учитывающий условия предшествования, ориентируясь на конструкции [6] и [8].

Полагаем сейчас, что имеется N, $N \geq 2$ множеств $M_1, \ldots, M_N$, являющихся каждое непустым конечным подмножеством множества X. Рассматриваем перемещения

$$(x_0 = x^0) \to (x_1 \in M_{\alpha(1)}) \to \ldots \to (x_N \in M_{\alpha(N)}), \tag{14}$$

где $x^0 \in X$ фиксированно, α – перестановка в $\overline{1,N} = \{1;\ldots;N\}$. Предполагаем, что перемещения в (14) сопровождаются затратами, понимаемыми здесь как величина, оценивающая воздействие радиоактивного излучения; в связи с (14) см. [8], [6, §2.1]. Эти затраты выражаем посредством функции

$$\mathbf{c}: X \times X \times \mathbf{N} \to [0, \infty[, \tag{15}$$

где $\mathbf{N}$ – семейство всех непустых п/м $\overline{1,N}$, именуемых далее списками заданий. Мы полагаем, что значения $\mathbf{c}(x_1, x_2, K)$, где $K \in \mathbf{N}$, определены не только для $x_i = x^0$ и $x_i \in M_j$, $j \in \overline{1,N}$; в противном случае продолжаем исходную содержательную за-

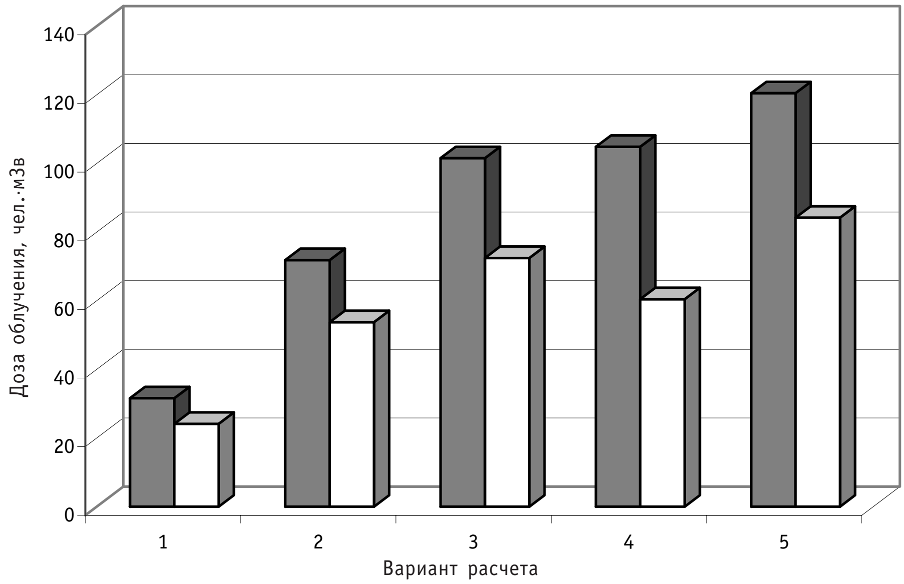

Рис. 2. Облучаемость персонала с учетом фактора расстояния: ■ – максимальное значение; □ – минимальное значение

висимость произвольным образом (например, нулем). Аргумент K соответствует по смыслу списку оставшихся заданий.

В нашем распоряжении находится маршрут α (т.е. перестановка индексов) и кортеж (x_0, x_1,…x_N) точек посещения целевых множеств M_j, исполняющих роль помещений АЭС, в которых производятся работы по демонтажу оборудования. Выбор перестановки α стеснен ограничениями технологического характера, формализуемыми в виде условий предшествования [6, 8]: полагаем заданным множество **К** индексных пар (p, q), где $p\in\overline{1,N}$ и $q\in\overline{1,N}$; итак, $\mathbf{K}\subset\overline{1,N}\times\overline{1,N}$. Мы полагаем, что перестановка α в $\overline{1,N}$ допустима (маршрут α допустим) в том и только в том случае, когда при всяком выборе упорядоченной пары $(p,\ q)\in\mathbf{K}$ для «моментов времени» $t_1\in\overline{1,N}$ и $t_2\in\overline{1,N}$, удовлетворяющих условиям $(\alpha(t_1)=p\&(\alpha(t_2)=q)$, имеет место $t_1<t_2$ (множество M_p посещается раньше, чем M_q; см.(14)).

Мы постулируем, как и в [6, 8], что при всяком выборе непустого множества S, $S\subset\mathbf{K}$, найдется такая упорядоченная пара $(p, q)\in S$, что для любых пар $(p', q')\in S$ выполнено $p\neq q'$. Пусть **A** – множество всех допустимых маршрутов (допустимых перестановок в $\overline{1,N}$); оно непусто (см. [6, §2. 2]). Для наглядного представления **A** введем правило вычеркивания **I** [6, с.32] в виде отображения, действующего в **N**: при $K\in\mathbf{N}$ полагаем, что $\mathbf{I}(K)$ есть часть множества оставшихся заданий после процедуры вычеркивания. Само правило вычеркивания состоит в следующем: если $K\in\mathbf{N}$, то следует определить множество $\sum[K]$ всех пар $(p,\ q)\in\mathbf{K}$, для которых $p\in K$, и $q\in K$; тогда $\mathbf{I}(K)$ есть множество всех $k\in K$ таких, что $k\neq q'$ $\forall(p', q')\in\Sigma[\mathbf{K}]$. Тогда [8], [6, с.33] **A** совпадает с множеством всех перестановок α в $\overline{1,N}$, для каждой из которых $\alpha(k)\in\mathbf{I}\alpha(k)\in I\left(\left\{\alpha(l):l\in\overline{k,N}\right\}\right)\quad\forall k\in\overline{1,N}$.

На основе этого представления множества **A** конструируется расширение задачи оптимизации перемещений в (14) в виде системы специальных укороченных экстремальных задач [6, §2.4], причем эволюция функции Беллмана

$$(x', K') \to \upsilon(x', K'): X \times (\mathbf{N} \cup \{\varnothing\}) \to [0, \infty[, \tag{16}$$

удовлетворяющей очевидному краевому условию $\upsilon(x, \varnothing) = 0 \;\; \forall \; x \in X$, характеризуется уравнением

$$\upsilon(x, K) = \min_{k \in I(K)} \min_{y \in M_k} [\mathbf{c}(x, y, K) + \upsilon(y, K \setminus \{k\}], \tag{17}$$

где $x \in X$ и $K \in \mathbf{N}$ Заметим, что при построении массива значений функции (16) на основе (17) можно воспользоваться усеченной версией процедуры динамического программирования, приведенной в [8] и [6, §4.9]. Упомянутая версия была реализована в виде стандартной программы для ПЭВМ А.А.Ченцовым; проведен соответствующий вычислительный эксперимент.

ВЫВОДЫ

1. Расчетные методы оптимизации последовательности демонтажа радиоактивного оборудования выводимых из эксплуатации энергоблоков АЭС имеют значительный потенциал в решении проблемы минимизации облучения персонала.

2. Для решения поставленной задачи оптимизации наиболее эффективен в вычислительном отношении метод динамического программирования, гарантирующий оптимальность и удобство программирования решения.

3. Рассмотренный вариант метода динамического программирования для задачи коммивояжера, отличающейся от стандартной тем, что элементы матрицы переходов зависят от списка еще не обойденных «городов» (недемонтированных объектов), позволяет минимизировать дозовые нагрузки персонала АЭС, занятого в демонтаже выводимых из эксплуатации блоков АЭС.

4. Оптимизация последовательности демонтажа радиоактивных объектов позволяет сократить дозы облучения на 25–40%.

Литература

1. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции (НП-012-99). – М.: Госатомнадзор России, 2000.

2. *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 критичных инфраструктур и территорий: Тезисы докладов II Всероссийской конференции и XII Школы молодых ученых. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. с.218-220.

3. *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.

4. *Беллман Р.* Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере//Кибернет. сб. – М.: Мир, 1964. – Т. 9. – С.219-228.

5. *Хелд М., Карп Р.М.* Применение динамического программирования к задачам упорядочения/Кибернет. сб. – М.: Мир, 1964. – Т. 9. – С.202-218.

6. *Ченцов А.Г.* Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2008. -240 с.

7. *Козлов В.Ф.* Справочник по радиационной безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. -192 с.

8. *Ченцов А.А., Ченцов А.Г.* О реализации метода динамического программирования в обобщенной задаче курьера//Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 3. – С. 143-153.

Поступила в редакцию 8.04.2009

УДК 621.039.534.6:536.24

Experimental Researches of Advanced Mass Exchanger with Solid-Shase Oxygen Source in RESPECT to Tecnology of 44,5%Pb-55,5%Bi\P.N. Martynov, R.Sh. Askhadyllin, A.Yu. Legkikh, A.A. Simakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8pages, 7 illustrations. – References, 6 titles.

Technical implementation of solid-phase method for adjustment of oxygen content in lead alloys coolants, developed by IPPE, is realized by means of specially designed devices – mass exchangers which are a significant component of heavy liquid-metal coolant technology. To date different kinds of the devices had been developed and tested by specialists of SSC RF- IPPE. The paper present results of experimental researches of advanced mass exchanger, an air-operated device, for adjustment of oxygen content in lead-bismuth coolant. Mass exchanger was tested as part of automatic forecast and control system of lead-bismuth coolant state. Tests were carried out on circulating isothermal facility TT-2M (SSC RF-IPPE). The aim of the experiments was to define working efficiency and major features of the developed mass exchanger.

УДК 519.7:621.039

The Dynamic Programming Method Use for the Decommissioning NPP Equipment Dismantling for the Purpose of Irradiation Minimization\F.A. Balushkin, A.N. Sesekin, O.L. Tashlykov, I.B. Tcheblokov, S.Ye. Sheklein, A.G. Chentsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 17 titles.

The relevance of solving the problem of radioactive equipment dismantling optimization when NPP decomissionning is substantiated. The mathematical analysis of the opportunity to use the dynamic programming method and its advantages for the given problem solving is carried out. The evaluating calculations of the radioactive equipment dismantling optimal sequence, under the precedence conditions too, and the stuff irradiation decrease in comparison with the initial variant are carried out.

УДК 621.039.51

The Macro-Subgroup Simulation of the Fast Reactor Plant\ A.A. Bezborodov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 3 illustrations. – References, 16 titles.

The aim of the paper is considering of the application of the macro-subgroup method for description of neutron cross-sections interactions with media nuclides nuclei in resonance part of energy for physical simulation of the fast reactor plants with non-fertile reflectors.

УДК 621.039.51

Vessel Model with Incondensible Gas\A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 2 illustrations. – References, 12 titles.

For calculations in real time the dynamics of NPP it is necessary to have the point vessel model. The model is executed without use of derivative thermodynamic properties. The presented model describes all operating modes, possesses the raised stability and meets the requirements for calculations as model of real time.

УДК 621.039

Training on fundamentals of protection of the public from threats of radiological emergency\V.A. Kutkov, I.A. Saksaganskiy, V.V. Tkachenko, T.B. Melnitskaya, E.K. Ochkin, V.S. Pirskiy, V.I. Vaiser, M.Yu. Orlov, N.P. Tkachenko, Yu.S. Trafimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 2 tables. – References, 35 titles.

Department of Emercom of Russia in Kaluga region and Obninsk University of nuclear power engineering provided training course «Fundamentals of protection of the public from threats of radiological emergency» in 2008. It was the first training course for Russian professionals who are first responders for radiological emergency. The course was conducted with support of International Atomic Energy Agency and uses materials of the Agency in area of emergency preparedness and response for radiological emergencies. This course gives the up-to-date information for organization