

УДК 614.876

ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РАБОТНИКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Крюк Ю.Е.

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –
«Сосны» НАН Беларуси

e-mail: yu.kruk@gmail.com

Проведен анализ современных подходов к реализации основных принципов радиационной защиты и безопасности работников в нормальной и аварийной ситуации обращения с источником. Показана необходимость поиска экономически выгодных методов снижения вероятной дозы облучения аварийного персонала. Рассмотрена возможность использования математического метода моделирования для проведения маршрутной оптимизации радиационной защиты. Показано, что использование предложенного метода позволяет снизить предполагаемую дозу облучения до 20 % без существенных экономических затрат.

The analysis of modern approaches to the implementation of the basic principles of radiation protection and safety of employees in the normal and emergency management of the source was done. The necessity of finding cost-effective methods to reduce the likely doses of emergency personnel was shown. The possibility of using mathematical modeling method for routing optimization of radiation protection was examined. It was shown that the proposed method allows reducing the estimated radiation dose to 20 % without significant economic costs.

(Поступила в редакцию 30 мая 2011 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Использование источников ионизирующего излучения на практике всегда сопряжено с риском возникновения аварийных ситуаций. Ситуации аварийного облучения – это непредвиденные обстоятельства, которые могут потребовать проведения неотложных защитных мероприятий, и, возможно, долгосрочных мер защиты. В таких ситуациях может произойти облучение лиц из населения или персонала, а также загрязнение окружающей среды. Само облучение может носить сложный характер и формироваться одновременно по нескольким независимым путям. Вероятные аварийные ситуации можно проанализировать заблаговременно с большей или меньшей точностью. Созданные на основе такого анализа в зависимости от типа рассматриваемого оборудования или обстоятельств действия по аварийному реагированию должны будут иметь плановый характер. Таким образом, в ситуации аварии неизбежно возникает проблема обеспечения радиационной защиты и безопасности человека и окружающей среды, что требует разработки детальных планов проведения аварийного реагирования [1].

В большинстве аварий последствия проявятся главным образом на площадке. В этих случаях в планах реагирования существенное внимание должно уделяться реализации принципов радиационной защиты и безопасности персонала в ситуации аварии. Защита работников, участвующих в ликвидации аварии, основывается на тех же принципах радиационной защиты, что и практическая деятельность в нормальных условиях: обоснования, оптимизации и ограничения доз. Однако реализация данных принципов в ситуации аварийного облучения имеет свои особенности.

Существенное отличие от ситуации нормального облучения представляет собой ограничение доз персонала в аварийной ситуации. В соответствии с международными нормами для работников, осуществляющих аварийное реагирование, если это выполнимо, дозы необходимо сохранить ниже максимального предела дозы в нормальных условиях за один год,

который для эффективной дозы составляет 50 мЗв. Однако в случаях, когда предпринимаются действия по спасению жизни, могут быть оправданы значительно более высокие уровни дозы. При этом существует требование принимать все возможные меры для сохранения дозы ниже десятикратного значения максимального предела дозы за один год для исключения детерминированных последствий для здоровья (т. е. ниже поглощенной дозы для всего организма в 500 мГр или поглощенной дозы на кожу в 5 Гр) [1]. Действия, при которых получаемые дозы работников могут приблизиться к десятикратному значению максимального предела дозы за один год или превысить его, допустимы только в тех случаях, когда польза для других людей явно перевешивает риск для профессионалов. Выполнение таких работ допускается только с их добровольного согласия. Если в таких действиях участвуют военнослужащие, то и эти требования могут не применяться [2].

В нашей стране планируемое облучение допускается для мужчин старше 30 лет лишь при их добровольном письменном согласии после информирования о возможных дозах облучения и риске для здоровья. Максимальная эффективная доза в этом случае может составить до 200 мЗв в год. Облучение свыше данной величины в течение года рассматривается как потенциально опасное [3].

Еще более сложной и менее определенной является реализация требований оправданности и оптимизации радиационной защиты персонала в аварийной ситуации. Формально принцип обоснования предполагает оправданность проведения тех защитных мероприятий, ущерб от которых меньше чем получаемая выгода, при этом принцип оптимизации требует, чтобы в процессе проведения этих мероприятий гарантировалась столь высокая безопасность, насколько это разумно достижимо [2]. В отношении персонала, ликвидирующего последствия аварии, это означает, что количество привлекаемых человек, их дозы и риски здоровью должны оправдываться спасением других жизней или предотвращением ущерба окружающей среде и быть настолько низкими, насколько это достижимо с учетом сложившихся обстоятельств. Принцип оптимизации защиты, устанавливающий определенные ограничения на величину индивидуальной дозы или риска, является центральным принципом системы защиты и применяется во всех ситуациях облучения. Ключевым параметром оптимизации защиты персонала была и остается коллективная эффективная доза [1].

В нормальных условиях для реализации принципов обоснования и оптимизации рекомендованы специальные инструменты и методики, основанные на применении методов оценки затрат на дополнительную защиту и денежном выражении ущерба здоровью персонала [3, 4]. Для ситуации аварии, когда не существует возможности финансовой оценки эффективности какого-то одного мероприятия, постулируется лишь обобщенная концепция необходимости обоснования и оптимизации вмешательства – «сделано ли все разумное в данных обстоятельствах для уменьшения дозы облучения?» [5].

Целью данной работы являлось исследование возможности использования математических методов моделирования в решении проблемы оптимизации облучения персонала в ходе проведения аварийных работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Доза, получаемая аварийными рабочими, является суммой трех составляющих:

- дозы, получаемой по пути к объекту ликвидации и обратно, при перемещении между объектами;
- дозы, при выполнении работ;
- дозы, при подготовке к работе и завершении работ.

Все приведенные выше составляющие дозы облучения подлежат оптимизации – снижению величины облучения.

Как известно, облучение можно уменьшить, увеличивая расстояние от источника до человека, улучшая параметры радиационной обстановки или за счет уменьшения времени пребывания в радиационных полях. Для второй и третьей составляющей дозы облучения

в ситуации аварии разработаны и эффективно применяются на практике различные методы. Например, для сокращения времени выполнения работ персонал регулярно проходит тренировки по повышению аварийной готовности, для снижения параметров облучения используется защитное оборудование. Поэтому наибольший интерес в плане оптимизации получаемых доз аварийными работниками, не требующий значительных материальных затрат, представляется оптимизация транзитных или маршрутных доз облучения.

Оптимизация траектории движения аварийных работников даст возможность минимизировать их облучение при перемещении в радиационно-опасной зоне как в помещении, так и на загрязненной территории.

В качестве решения поставленной задачи можно рассматривать решение известной в математике задачи коммивояжера, в которой торговец, начиная с некоторого города, хочет посетить фиксированное число городов, не побывав нигде дважды. Основным вопросом задачи является: «В каком порядке должен он посещать города, чтобы минимизировать издержки (начальный и конечный города фиксированы)?» [6]. Для целей данной работы под издержками будем понимать дозу облучения, которую необходимо оптимизировать так, чтобы, посетив все отмеченные в маршрутном листе объекты, аварийный работник получил минимальное облучение. Следовательно, оценочной функцией в данной задаче будет являться суммарная «транзитная» доза работника, а ограничениями будут служить наличие и отсутствие возможности проходов к рассматриваемому списку объектов, а также необходимость посещения всех объектов маршрута.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сформулируем исходную задачу в форме оптимизации на графах. С этой целью рассмотрим связный ориентированный граф: $G = (V, E, h)$, в котором $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – конечное множество вершин, т. е. необходимых для посещения объектов, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – конечное множество дуг (маршрутов), $h: E \rightarrow Z_+$ – весовая функция дуг в единицах доз облучения. Для математической постановки задачи удобно обозначить отдельные значения весовой функции дуг через $c_{ij} = h(e_k)$, где дуга $e_k \in E$ соответствует упорядоченной паре вершин (v_i, v_j) . Согласно содержательной постановке рассматриваемой задачи отдельные значения: $c_{ij} = h(v_i, v_j)$ интерпретируются как величина дозы на участке (i, j) исходного графа.

Длина любого подмножества дуг $E_k \subset E$ в графе G равна сумме весов дуг, входящих в это подмножество. Требуется определить такое подмножество дуг, которое образует в графе G замкнутый путь, проходит через каждую вершину ровно один раз и обладает минимальной длиной.

Для формальной записи условий задачи коммивояжера в виде модели булева программирования следует отметить следующие особенности искомого маршрута в графе:

1. Каждая из вершин исходного графа должна иметь в искомом маршруте ровно одну инцидентную ей дугу, которая является входящей для этой вершины, и ровно одну инцидентную ей дугу, которая является выходящей для этой вершины. В противном случае такие вершины окажутся изолированными или тупиковыми и, следовательно, путь не будет проходить через все вершины исходного графа.

2. Общее количество дуг в искомом пути должно быть в точности равно n , где n – общее количество вершин исходного графа. Действительно, если некоторый путь содержит меньше n дуг, то он не будет проходить через все вершины или являться циклическим. Если же искомый путь содержит больше n дуг, то он не будет удовлетворять условию прохождения каждой вершины ровно один раз.

3. Искомый путь должен представлять собой единственный цикл и не должен распадаться на отдельные циклы с количеством дуг меньше n , где n – общее количество вершин исходного графа. Это условие имеет комбинаторный характер.

Введем в рассмотрение следующие булевы переменные x_{ij} , которые интерпретируем следующим образом. Переменная $x_{ij} = 1$, если дуга (v_i, v_j) входит в искомый маршрут минимальной длины, т. е. аварийный работник непосредственно перемещается от i -ой точки маршрута в j -ю точку, и $x_{ij} = 0$, если дуга (v_i, v_j) не входит в оптимальный маршрут, т. е. если аварийный работник непосредственно не перемещается из i -ой точки в j -ю.

Тогда в общем случае математическая постановка задачи может быть сформулирована следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_{x \in \Delta\beta} \quad (1)$$

где множество допустимых альтернатив $\Delta\beta$ формируется следующей системой ограничений типа равенств и неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}); \quad (2) \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 (\forall j \in \{1, 2, \dots, n\}); \quad (3) \\ u_i - u_j + n \times x_{ij} \leq n - 1 (\forall i, j \in \{2, 3, \dots, n\}, i \neq j); \quad (4) \\ x_{ij} \in \{0, 1\}, (\forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}); \quad (5) \\ u_i \in R^1, (\forall i \in \{2, 3, \dots, n\}). \quad (6) \end{array} \right.$$

В данной математической модели задачи коммивояжера используются также вспомогательные переменные: $u_i (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})$, которые могут принимать любые действительные значения. При этом ограничения (2) и (3) обеспечивают выполнение первых двух указанных ранее условий: искомый путь должен проходить через каждую вершину графа ровно один раз. Ограничения (4) обеспечивают выполнение третьего из указанных ранее условий – искомый путь не должен распадаться на отдельные циклы. Ограничения (5) обеспечивают выполнение условия: переменные x_{ij} должны принимать булевы значения, а ограничения (6) обеспечивают выполнение условия: переменные u_i должны принимать вещественные значения.

Применение модели для оптимизации траектории движения работника. Траектория перемещения людей в условиях ликвидации последствий аварии на радиационно-опасных объектах основывается на данных радиационной разведки. Эффективная доза облучения, получаемая в процессе движения между двумя объектами a и b , в этом случае оценивается следующим образом:

$$E_{a-b} = \sum P_i k t_i, \quad (7)$$

где P_i – радиационный параметр в i -ой зоне объекта (мощность дозы, мощность воздушной кермы и т. д.);

k – коэффициент перехода от радиационного параметра к эффективной дозе;

t_i – время, за которое работник пересечет i -ю зону.

Для оценки возможности применения метода динамического программирования для оптимизации пути перемещения аварийного работника рассмотрим гипотетический пример необходимости устранения последствий радиационной аварии на одном из энергоблоков

АЭС. В качестве исходных данных используем информацию по состоянию помещений Белярской АЭС Российской Федерации [7].

Пусть работнику необходимо посетить 12 различных объектов станции. Такой маршрут может быть представлен в виде связанного ориентированного графа с 12-ю вершинами и с возможными входами-выходами a , b и c (рис.).

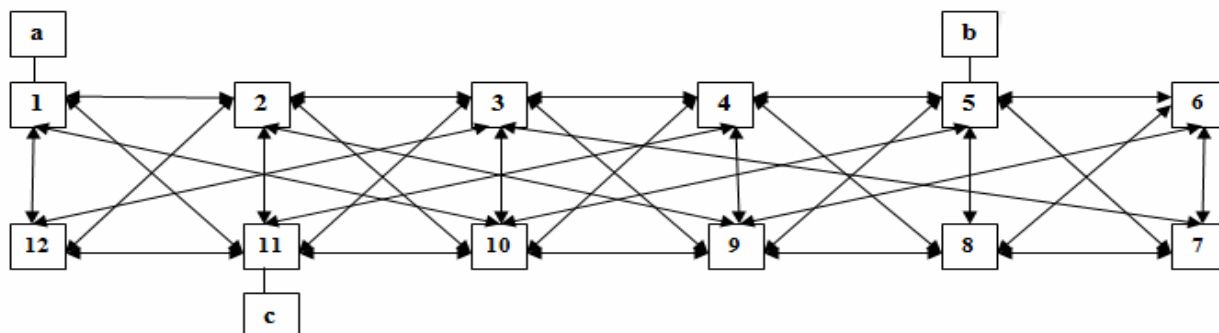


Рисунок – Схема возможных маршрутов в аварийной ситуации

Стрелками на рисунке отмечены возможные пути перемещения.

Предполагаемые дозы облучения при прохождении участков между объектами приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Гипотетические дозы облучения работника при перемещении между объектами в аварийной ситуации, мЗв

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		10,66								29,9	7,28	9,75
2	10,66		14,3						28,6	17,16	12,74	14,3
3		14,3		29,9					22,75	28,6	14,95	40,3
4			29,9		10,14			27,95	14,3	17,16	31,2	
5				10,14		14,3	24,7	10,14	21,45	25,74		
6					14,3		24,7	26	35,75			
7			22,75		24,7	24,7		27,3				
8			0	27,95	10,14	26	27,3	0	19,5			
9		28,6	22,75	14,3	21,45	35,75		19,5		16,9		
10	29,9	17,16	28,6	17,16	25,74				16,9		13	
11	7,28	12,74	14,95	31,2						13		28,6
12	9,75	14,3	40,3								28,6	

Отсутствие данных в таблице означает отсутствие возможного прохода.

В качестве исходного пути рассматривается последовательное посещение объектов от 1 до 12, с входом-выходом в точке a .

С использованием данной таблицы в качестве значений c_{ij} для выражения (1) и с учетом наличия возможного прохода и его отсутствия для булевых переменных x_{ij} в системе уравнений (2) – (6) был определен оптимальный путь перемещения (табл. 2).

Следовательно, использование оптимизации перемещения работника по территории радиационно-загрязненного объекта без дополнительных финансово-материальных затрат может обеспечить снижение накопленной аварийной дозы облучения работников до 20 %.

Таблица 2 – Накопленная доза облучения при последовательном и оптимальном пути перемещения

Путь перемещения	Вход	Выход	Маршрут посещений объектов	Доза, мЗв
исходный	<i>a</i>	<i>a</i>	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-1	219
оптимальный	<i>c</i>	<i>a</i>	11-10-4-9-8-5-6-7-3-2-12-1	174

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе научного исследования решалась задача определения возможности использования математического метода, основанного на идеях динамического программирования, для оптимизации радиационной защиты персонала в аварийных условиях. Показано, что применение известного математического аппарата для задач комбинаторной оптимизации позволяет поставить и решить задачу маршрутной оптимизации траектории движения работника в процессе ликвидации аварийной ситуации. Снижение доз облучения за счет оптимизации по радиационному параметру траектории движения работника может достигать 20 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection / Annals of the ICRP Publication 103; ed. J. Valentin [et al.]. – Oxford : Elsevier, 2007. – № 103. – 332 p.
2. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками: нормы безопасности № 115. – Вена : МАГАТЭ, 1997. – 387 с.
3. Нормы радиационной безопасности : НРБ-2000. – Минск, 2000. – 115 с.
4. The optimisation of radiological protection: Broadening the process / Annals of the ICRP Publication 101 part 2; ed. J. Valentin [et al.]. – Oxford : Elsevier, 2005. – № 101. – P. 64–104.
5. Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations / Annals of the ICRP Publication 109; ed. J. Valentin [et al.]. – Oxford : Elsevier, 2009. – № 109. – 74 p.
6. Галкина, В.А. Дискретная математика. Комбинаторная оптимизация на графах / В.А. Галкина // Гелиос АРБ. – 2003. – 232 с.
7. Ташлыков, О.Л. Разработка оптимальных алгоритмов вывода АЭС из эксплуатации с использованием методов математического моделирования / О.Л. Ташлыков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – Обнинск, 2009. – С. 115–120.