

УДК 519.854.33: 331.435

Ю.Е. КРЮК, к.б.н., докторант ОИЭЯИ-"Сосны", г. Минск,
И.Е. КУНЕЦ, ГУО "Кадры индустрии", г. Минск

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОПТИМИЗАЦИИ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Рассмотрена возможность использования метода многокритериальной оптимизации с булевыми переменными при организации радиационной защиты персонала. Показано, что применение известного математического аппарата позволяет поставить и решить задачу минимизации облучения работников без дополнительных финансовых затрат. Табл.: 3. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: метод многокритериальной оптимизации, радиационная защита персонала, минимизации облучения.

Постановка проблемы. Профессиональное облучение может произойти на целом ряде предприятий, использующих источники ионизирующего излучения. Для безопасного и приемлемого использования ионизирующего излучения в процессе работы необходима организация адекватной радиационной защиты персонала, в основе которой лежат три принципа: нормирование, обоснование и оптимизация [1].

Согласно современным подходам, принцип оптимизации должен определять такой уровень безопасности использования источников, при котором индивидуальные дозы облучения и число облучаемых лиц настолько малы, насколько это достижимо с учетом существующих экономических и социальных факторов. Требование к проведению оптимизации является одной из наиболее важных составляющих системы ограничения вредного воздействия радиации, вне зависимости от того, каков тип источника, какова ситуация облучения или характеристики облученного индивидуума [2]. Однако непосредственное применение данного принципа на практике вызывает затруднение в виду сложности установления зависимости величины облучения от экономических и социальных факторов.

Анализ литературы. В период становления радиационной защиты основные требования к ограничению облучения гласили, что если индивидуальная доза не превысит определенного порогового уровня, то вреда здоровью человека не будет [3]. В дальнейшем исследования в области воздействия источников привели к признанию факта, что никакое облучение не может быть абсолютно безопасным [1]. Начиная с этого момента принцип оптимизации, устанавливающий определенные ограничения на величину индивидуальной дозы или риска, является центральным принципом системы защиты и должен применяться для

всех ситуаций облучения [2]. Тем не менее, реализация данного подхода на практике продолжает вызывать затруднения [4, 5, 6]. Главный вопрос, на который согласно международным рекомендациям необходимо дать ответ в процессе проведения оптимизации – "сделано ли все разумное в данных обстоятельствах для уменьшения дозы облучения?". При этом необходимо учесть как технические, так и социальные факторы и экономические возможности, и требуется вынесение как качественных, так и количественных суждений. Несмотря на существующие методики проведения оптимизации радиационной защиты, окончательное решение по ее результатам носит субъективный характер. Основным инструментом, предлагаемым в помощь лицу, принимающему решения, является анализ "затраты – польза" [5, 6]. Данный метод призван соотнести экономические затраты на организацию защиты и экономический ущерб от возможного вреда, наносимого облучением. На практике в силу необходимости учета большого количества параметров такой подход находит применение далеко не всегда. Его используют чаще всего для обоснования крупных первоначальных вложений в организацию защиты, когда реализация требований к безопасности определяет будущие дозы облучения. В условиях уже установившейся практики дополнительные существенные экономические затраты на снижение существующего облучения, не превышающего установленные пределы доз, не признаются "разумными" и процесс оптимизации начинает носить формальный характер. Следовательно, в этих условиях необходим поиск других методов, позволяющих проводить оптимизацию доз облучения без существенных экономических вложений. При этом ключевым параметром оптимизации должна оставаться коллективная доза [2].

Цель статьи – исследование возможности использования математических методов моделирования в решении проблемы проведения оптимизации радиационной защиты персонала без существенных экономических затрат.

Построение математической модели задачи. В реальных рабочих условиях нормальной практики использования источников n -ое число работников находится в m -м количестве радиационных полей четко определенное время. Оценка эффективной дозы, получаемой работниками в конкретных неизменных условиях облучения, описывается следующей формулой:

$$D_i = R_j \times k \times t_{ij}, \quad (1)$$

где D_i – величина эффективной дозы i -го работника; R_j – радиационный

параметр в j -ой зоне работ (мощность дозы, мощность воздушной кермы и т.д.); k – коэффициент перехода от радиационного параметра к эффективной дозе; t_{ij} – время, которое i -ый работник находится j -ой зоне.

Коллективная доза D_n определяется как сумма индивидуальных доз работников:

$$D_n = \sum_{i=1}^n D_i. \quad (2)$$

В соответствии с формулой (1) влиять на величину получаемой работниками дозы можно улучшая параметры радиационной обстановки или за счет уменьшения времени пребывания в радиационных полях. При этом нужно понимать, что снижение параметров облучения для всех рабочих зон – дорогая и часто невыполнимая задача, а сокращение рабочего времени не должно негативно отражаться на качестве. Следовательно, в ходе оптимизации должна ставиться задача минимизации суммарной дозы и времени выполнения работ без лишних затрат.

В качестве решения поставленной задачи можно рассматривать решение известной в математике задачи двухкритериальной булевой оптимизации – задачи о назначениях, в которой требуется распределить n -ое количество кандидатов по m типам работ с соблюдением условий минимизации или максимизации двух критериев [7]. В случае, когда число работников равно количеству мест ($n = m$), задача является симметричной. Формулировка такой задачи включает две целевые функции, а переменные принимают булевы значения. Если обозначить c_{ij} и d_{ij} – как критерии эффективности распределения работников и ввести булевы переменные $x_{ij} = 1$, если i -го работника назначают на j -ое рабочее место и $x_{ij} = 0$, если не назначают, то математическая постановка задачи будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} &\rightarrow \min(\max)_{x \in \Delta_p}, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} &\rightarrow \min(\max)_{x \in \Delta_p}, \end{aligned} \quad (3)$$

где множество допустимых альтернатив Δ_p формируется следующей системой ограничений (4):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij}=1, (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}); \\ \sum_{i=1}^n x_{ij}=1, (\forall j \in \{1, 2, \dots, n\}); \\ x_{ij} \in \{0,1\}, (\forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}). \end{cases} \quad (4)$$

Первое ограничение в системе соответствует требованию назначения каждого кандидата на выполнение только одной работы, а второе – выполнение работы в данный момент только одним работником.

Применение модели в оптимизации радиационной защиты. Рассмотрим ситуацию облучения группы из пяти работников (1-й, 2-й и т.д.) лаборатории радиоизотопной техники и радиационной безопасности, обеспечивающих техническое обслуживание источника одного из промышленных предприятий. Все пять сотрудников имеют одинаковое образование и могут выполнять одинаковые задания, но имеют разный стаж работы и разную интенсивность труда. В качестве мест выполнения заданий рассмотрим пять рабочих зон вокруг источника (А, В, С, D, Е), отличающиеся по радиационным параметрам. При этом в качестве первого критерия c_{ij} будем понимать усредненные дозы облучения, формируемые у работников в различных зонах (табл. 1) при выполнении одинаковых заданий, в качестве d_{ij} – средние временные затраты работников на работы в различных зонах (табл. 2).

Таблица 1

Дозы облучения работников при выполнении заданий в разных зонах, мкЗв

	1-й	2-ой	3-й	4-й	5-й
А	1,07	0,75	1,39	1,81	0,85
В	0,53	0,57	0,41	0,37	0,78
С	1,6	1,3	1,8	2,2	1,6
D	1,2	1,3	1,4	1,2	1,4
Е	0,6	0,7	0,8	0,6	0,8

Таблица 2

Время выполнения заданий в разных зонах работниками, мин

	1-й	2-ой	3-й	4-й	5-й
А	100	70	130	170	80
В	130	140	100	90	190
С	80	100	80	50	40
D	90	110	90	70	70
Е	120	90	100	80	90

Временные и дозовые различия могут объясняться как разным опытом работы и, следовательно, навыками выполнения заданий, так

расположенностью сотрудников выполнять определенный вид работ. Можем предположить, что одна из проблем обеспечения радиационной безопасности на рабочем месте связана непосредственно с компетентностью и психологической предрасположенностью работников к выполнению заданий в особо опасных условиях.

Согласно поставленной цели оптимизации радиационной защиты минимизации подлежат как суммарная доза облучения работников, так и общее время выполнения заданий. Следовательно, целевые функции (3) для рассматриваемого случая можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_{x \in \Delta_B}, \quad \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 d_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_{x \in \Delta_B}. \quad (5)$$

Для решения такого класса задач разработаны различные методы [7, 8]. В данном исследовании был применен базовый метод для решения задач многокритериальной оптимизации с булевыми переменными – метод уступок. С использованием данного метода был выполнен анализ оптимального распределения заданий между работниками в разных зонах с целью минимизации дозовых и временных затрат. Для сравнения был также выполнен анализ распределения сотрудников, дающий максимальный вклад в суммарную дозу. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение максимального вклада сотрудников

	Минимум	Максимум	% экономии
Коллективная доза, мкЗв	4,36	6,29	31
Суммарное время, мин	450	650	

Таким образом, только использование оптимизации распределения сотрудников по заданиям может обеспечить снижение коллективной дозы облучения до 30%. Однако предложенное решение является эффективным методом минимизации суммарного облучения работников только в краткосрочном периоде. С учетом проблемы старения персонала в отрасли без проведения систематического обучения и формирования профессиональной компетенции у молодых сотрудников по безопасным способам выполнения работы добиться необходимого снижения доз облучения будет затруднительно.

Выводы. В ходе научной работы решалась задача многокритериальной оптимизации с булевыми переменными при организации радиационной защиты персонала. Показано, что применение

известного математического аппарата позволяет решать задачу минимизации облучения работников и снижать коллективную дозу и время выполнения работ до 30% без дополнительных финансовых затрат. Вместе с тем, сделан вывод о необходимости специальных программ по подготовке и обучению молодых сотрудников для сохранения потенциала проведения такого рода оптимизации.

Список литературы: 1. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection / Annals of the ICRP Publication 60; ed. J. Valentin. – Oxford: Elsevier, 1991. – № 60. – P. 201. 2. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection / Annals of the ICRP Publication; ed. J. Valentin. – Oxford: Elsevier, 2007. – № 103. – P. 332. 3. The 1971 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection/ Annals of the ICRP Publication 26; ed. J. Valentin. – Oxford: Pergamon Press, 1971. – № 26. – P. 53. 4. Optimization and Decision Making in Radiological Protection / Annals of the ICRP Publication 55; ed. J. Valentin. – Oxford: Pergamon Press, 1980. – № 55. – P. 60. 5. The optimization of radiological protection: Broadening the process / Annals of the ICRP Publication 101, part2; ed. J. Valentin – Oxford: Elsevier, 2005. – № 101. – P. 64 – 104. 6. Оптимизация радиационной защиты при контроле облучения персонала / Серия докладов по безопасности МАГАТЭ. – Вена: МАГАТЭ, 2003. – № 21. – P. 81. 7. Лотов В.А. Многокритериальные задачи принятия решений / В.А. Лотов, И.И. Поспелова – М.: МАКСПресс, 2008. – 197 с. 8. Ковалев М.М. Дискретная оптимизация / М.М. Ковалев. – Едиториал УРСС, 1977. – 191 с.

Статья представлена д.т.н. доц. ОИЭЯИ-"Сосны" Трифоновым А.Г.

УДК 519.854.33:331.435

Математичні методи моделювання в оптимізації радіаційного захисту / Крюк Ю.Е., Кунец І.Е. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 36. – С. 95 – 100.

Розглянуто можливість використання методу багатокритеріальної оптимізації при організації радіаційного захисту персоналу. Показано, що застосування відомого математичного апарату дозволяє поставити і вирішити задачу мінімізації опромінення працівників без додаткових фінансових витрат. Табл.: 3. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: метод багатокритеріальної оптимізації, радіаційний захист персоналу, мінімізації опромінення.

UDC 519.854.33:331.435

Mathematical simulation methods in the optimization of radiation protection / Kruk Y.E., Kunec I.E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2011. – № 36. – P. 95 – 100.

The possibility of using the multi-objective optimization method in the organization of radiation protection is considered. It is shown that the use of well-known mathematical tool allows solving the problem of minimizing the exposure of workers without any additional financial costs. Tabl.: 3. Refs.: 8 titles.

Keywords: multi-objective optimization method, radiation protection of personnel, to minimize exposure.

Поступила в редакцию 07.06.2011