

УДК 331.101

А.Н. Рева<sup>1</sup>, В.М. Стрелец<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный авиационный университет, Киев*<sup>2</sup> *Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков*

## ИМИТАЦИОННАЯ ЭРГОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «СПАСАТЕЛЬ – СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ЛИЧНОГО СОСТАВА И ЛИКВИДАЦИИ АВАРИИ – ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ»

*Показано, что имитационную эргономическую оценку процесса проведения аварийно-спасательных работ целесообразно проводить на основе анализа многофакторных полиномиальных моделей, полученных в результате реализации традиционного плана технико-экономических экспериментов 3×3×3. Это позволит получить количественные нелинейные оценки как весов отдельных факторов, влияющих на эффективность функционирования системы «спасатель – средства защиты личного состава и ликвидации аварии – чрезвычайная ситуация», так и весов их взаимного влияния. При этом конкретные рекомендации целесообразно разрабатывать по максимальному перепаду в однофакторных моделях, полученных при стабилизации остальных факторов не только для центра факторного пространства, но и для уровней, соответствующих координатам экстремумов рассматриваемого показателя эффективности системы.*

**Ключевые слова:** эргономическая оценка, система «спасатель – средства защиты личного состава и ликвидации аварии – чрезвычайная ситуация», имитационное моделирование, многофакторные модели.

### Введение

**Постановка проблемы.** Для разработки и принятия обоснованных решений, которые имеют целью снижение не только уровня пожарной и техногенной безопасности, но и ослабление действия опасных факторов чрезвычайных ситуаций на потерпевших и личный состав оперативно-спасательных подразделений, необходима объективная оценка деятельности пожарных-спасателей в рамках функционирования системы «спасатель – средства защиты личного состава и ликвидации аварии – чрезвычайная ситуация».

**Анализ последних достижений и публикаций** показал, что для этого могут использоваться результаты имитационного моделирования. В частности, в [1] рассмотрена модель боевых действий пожарных подразделений, разработанная для случая тушения пожара вагона, который находится в метрополитене на платформе. В то же время, там не рассматриваются вопросы спасения пассажиров и сотрудников метрополитена, события в ней не носят вероятностный характер. Кроме этого, в модели не предусматривается учет особенностей, присущих деятельности спасателей, которые имеют разный уровень подготовленности или оснащены разными типами одного и того же пожарно-технического вооружения.

Научно-методический аппарат, использующий сети Петри, который В.Ф. Бондарев и В.В. Семенов [2] применили для имитационного моделирования боевых действий по тушению звеном ГДЗС пожара на электроподстанции, не подходит для большин-

ства других аварийных и чрезвычайных ситуаций, которые носят вероятностный характер развития ситуации.

Как для рассмотренных выше моделей, так и для других имитационных моделей, описывающих деятельность персонала в аварийных ситуациях [3, 4], характерным в настоящее время является то, что модели используются только для анализа конкретной ситуации.

При том, что в [5] отмечена целесообразность их применения для сравнительной оценки.

**Постановка задачи.** Исходя из этого, были сформулированы следующие цели:

– используя разработанные имитационные модели [6 – 8], выбрать такой план машинного эксперимента, чтобы по полученным результатам можно было получить закономерности, характеризующие проведение аварийно-спасательных работ как функционирование системы «спасатель – средства защиты личного состава и ликвидации аварии – чрезвычайная ситуация»;

– определить порядок эргономического анализа полученных закономерностей;

– на основе использования закономерностей обосновать практические рекомендации

### Основная часть

При выборе плана имитационного эксперимента и отборе основных факторов целесообразно учесть пожелания экспертов не рассматривать одновременно более трех факторов. Это они объясняли тем, что влияние большего количества факторов,

воздействующих на функционирование рассматриваемой системы оценить достаточно сложно, поскольку ее состояние постоянно и достаточно быстро меняется.

Кроме этого, эксперты указали на целесообразность оценки влияния выбранных факторов в том случае, когда они меняются, на двух равных интервалах. Это связано с незначительной продолжительностью (как правило, до одной минуты) большинства операций.

Для анализа имитационных моделей выделены следующие значимые факторы:

- для модели, описывающей работу звена газодымозащитной службы (ГДЗС) в подвальных помещениях:  
 $x_1$  – специальная выносливость газодымозащитников;  
 $x_2$  – способность ориентироваться в пространстве;  
 $x_3$  – слаженность личного состава звена;
- для модели, описывающей спасение пострадавшего первым отделением ГДЗС в случае пожара на станции метрополитена:  
 $z_1$  – подготовленность личного состава пожарно-спасательной службы;  
 $z_2$  – подготовленность персонала метрополитена;  
 $z_3$  – степень реализации существующих нормативно-технических требований;
- для модели, описывающей работу спасателей в процессе локализации чрезвычайной ситуации с выбросом опасных химических веществ (ОХВ) методом реконденсации:  
 $u_1$  – приведенная интенсивность  $\psi$  выброса ОХВ [9] (как характеристика компоненты «среда»);  
 $u_2$  – подготовленность личного состава (как характеристика компоненты «человек»);  
 $u_3$  – используемая комбинация средств индивидуальной защиты спасателей (как характеристика компоненты «техника»).

Анализ выбранных факторов показывает, что они влияют на общее время проведения аварийно-спасательных работ нелинейно.

Так, например, повышение уровня специальной выносливости газодымозащитников будет сильнее влиять на время выполнения поставленного задания при переходе от начального уровня подготовленности к среднему, чем от среднего к высокому. Кроме этого, можно предположить и о взаимосвязях между факторами.

Например, что подготовленность спасателей более сильно будет проявляться при работе в более сложных условиях.

В полиномиальной модели эффекты взаимодействия могут быть учтены соответствующими коэффициентами при произведении рассматриваемых факторов, а нелинейные эффекты – при их квадратах [10]. Исходя из этого, рекомендуется план имитационного эксперимента  $3 \times 3 \times 3$  – традиционный план технико-экономических экспериментов, используемый при исследовании воздействия отдельно каждого из трех факторов на трех уровнях (при прочих равных условиях). Выбранный план обладает хорошими статистическими характеристиками и лучшими по точности оценками всех коэффициентов регрессии  $\{ks\}$  [10].

Полученные результаты соответствующих имитационных экспериментов позволили построить трехфакторные квадратичные модели, которые устанавливают количественную связь между временем проведения аварийно-спасательных работ (в кодированных переменных) и выбранными факторами,

$$y = 0,3244 - 0,1376 \cdot x_1 + 0,0172 \cdot x_1^2 + 0,0390 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0311 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,1650 \cdot x_2 + 0,0112 \cdot x_2^2 + 0,070 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,2332 \cdot x_3 + 0,0774 \cdot x_3^2; \quad (1)$$

$$y = 0,346 - 0,3207 \cdot z_1 - 0,0283 \cdot z_1^2 + 0,0272 \cdot z_1 \cdot z_2 - 0,0623 \cdot z_1 \cdot z_3 - 0,0348 \cdot z_2 + 0,146 \cdot z_2^2 + 0,0061 \cdot z_2 \cdot z_3 - 0,1169 \cdot z_3 - 0,0128 \cdot z_3^2; \quad (2)$$

$$y = 0,165 - 0,031 \cdot u_1 - 0,014 \cdot u_1^2 + 0,040 \cdot u_1 \cdot u_2 + 0,037 \cdot u_1 \cdot u_3 - 0,195 \cdot u_2 + 0,143 \cdot u_2^2 + 0,074 \cdot u_2 \cdot u_3 - 0,012 \cdot u_3 + 0,08 \cdot u_3^2. \quad (3)$$

Приняв для анализа двусторонний риск  $\alpha = 0,2$  (рекомендуется [10] для поисковых работ, к которым относятся и вопросы эргономического анализа рассматриваемых систем), можно удалить незначимые эффекты. Это позволяет получить для анализа конечные модели:

$$y = 0,3244 - 0,1376 \cdot x_1 - 0,1650 \cdot x_2 - 0,2332 \cdot x_3 + 0,0774 \cdot x_3^2; \quad (4)$$

$$y = 0,346 - 0,3207 \cdot z_1 - 0,1169 \cdot z_3. \quad (5)$$

Для ситуации, когда рассматривается локализация очага выброса опасного химического вещества, модель (3) не меняется, поскольку все эффекты значимые.

Наличие моделей (3)÷(5) позволяет провести ранжирование по максимальному перепаду  $\Delta u$  в однофакторных моделях (см. табл. 1 – 3), получаемых при стабилизации остальных  $x_i$  на уровнях, со-

ответствующих координатам экстремумов  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$ , а также в центре факторного пространства.

Таблица 1

Однофакторные модели  $y = f_1(x_i)$   
при различных условиях стабилизации

В зоне максимума	
$x_1$	$0,8 - 0,1376 x_1$
$x_2$	$0,7726 - 0,165 x_2$
$x_3$	$0,627 - 0,2332 x_3 + 0,0774 x_3^2$
В центре факторного пространства	
$x_1$	$0,3244 - 0,1376 x_1$
$x_2$	$0,3244 - 0,165 x_2$
$x_3$	$0,3244 - 0,2332 x_3 + 0,0774 x_3^2$
В зоне минимума	
$x_1$	$0,0036 - 0,1376 x_1$
$x_2$	$0,0031 - 0,165 x_2$
$x_3$	$0,0218 - 0,2332 x_3 + 0,0774 x_3^2$

Таблица 2

Однофакторные модели  $y = f_1(z_i)$   
при различных условиях стабилизации

В зоне максимума	
$z_1$	$0,4629 - 0,3207 \cdot z_1$
$z_2$	-
$z_3$	$0,6667 - 0,1169 \cdot z_3$
В центре факторного пространства	
$z_1$	$0,3460 - 0,3207 \cdot z_1$
$z_2$	-
$z_3$	$0,3460 - 0,1169 \cdot z_3$
В зоне минимума	
$z_1$	$0,2291 - 0,3207 \cdot z_1$
$z_2$	-
$z_3$	$0,0253 - 0,1169 \cdot z_3$

Таблица 3

Однофакторные модели  $y = f_1(u_i)$   
при различных условиях стабилизации

В зоне максимума	
$z_1$	$0,4629 - 0,3207 \cdot z_1$
$z_2$	-
$z_3$	$0,6667 - 0,1169 \cdot z_3$
В центре факторного пространства	
$z_1$	$0,3460 - 0,3207 \cdot z_1$
$z_2$	-
$z_3$	$0,3460 - 0,1169 \cdot z_3$
В зоне минимума	
$z_1$	$0,2291 - 0,3207 \cdot z_1$
$z_2$	-
$z_3$	$0,0253 - 0,1169 \cdot z_3$

Результаты анализа выражений, приведенных в табл. 1÷3, позволяют утверждать, что для случаев:

- работы звена ГДЗС в подвальных помещениях ранжирование во всех зонах дает ряд

$$\Delta y \{x_3\} > \Delta y \{x_2\} > \Delta y \{x_1\}, \quad (6)$$

который свидетельствует о том, что из рассматриваемых факторов наиболее весомо на эффективность выполнения боевой работы влияет слаженность личного состава, а менее – специальная выносливость;

- спасания пострадавшего на станции метрополитена первым звеном ГДЗС – ряд

$$\Delta y \{z_1\} > \Delta y \{z_3\}, \quad (7)$$

т.е. наиболее ощутимо из рассматриваемых факторов влияет подготовленность личного состава пожарно-спасательной службы, а менее – степень реализации существующих нормативно-технических требований.

Подготовленность персонала метрополитена вообще не влияет на данный фактор;

- локализации очага выброса ОХВ методом реконденсации ранжирование в зоне максимума и в центре факторного пространства дает ряд

$$\Delta y \{u_2\} > \Delta y \{u_1\} > \Delta y \{u_3\}, \quad (8)$$

т.е. наиболее ощутимо из рассматриваемых факторов на ликвидацию аварии с выбросом ОХВ влияет подготовленность личного состава, а затем уровень опасности (интенсивность выброса). Меньше остальных факторов влияет компонент «техника» (используемые комплексы средств индивидуальной защиты).

В то же время, ранжирование в зоне минимума дает ряд:

$$\Delta y \{u_3\} > \Delta y \{u_2\} > \Delta y \{u_1\}, \quad (9)$$

который говорит о том, что при низких значениях приведенной интенсивности выброса и высоком уровне подготовленности наиболее существенно на время проведения ликвидации влияют особенности, связанные с работой в выбранном комплексе средств индивидуальной защиты (фактор  $u_3$ ). Затем следуют факторы  $u_2$ , связанные с уровнем подготовленности персонала, и  $u_1$  – с опасностью среды, в которой работают спасатели.

Видно, что уже результаты ранжирования позволяют перейти к конкретным практическим рекомендациям.

Например, для случая ликвидации аварий с выбросами опасных химических веществ.

Если учесть, что в большинстве случаев конкретный вариант проведения работ носит уникальный характер, то есть спасатели не готовятся кон-

кретно к такому случаю, а также к выполнению работ они приступят, если позволят средства защиты, при любом, в том числе высоком, уровне опасности, основное внимание необходимо уделить подготовке аварийно-спасательных подразделений.

Последняя должна включать как отработку отдельных типовых операций и процессов в средствах защиты, так и обучение работе со средствами контроля опасности.

Кроме этого, представляет интерес и непосредственный анализ полученных рядов.

В частности, ряд (6) отличается от результатов, полученных в [11] с помощью модифицированного экспертного метода принудительного распределения по порядку.

Привлеченные эксперты дали данные, которые можно использовать в виде следующего ряда

$$\Delta y\{x_1\} > \Delta y\{x_2\} > \Delta y\{x_3\}. \quad (10)$$

Анализ результатов реальной боевой работы, особенно начальных операций, позволил предположить, что ряд (6) в основном определяется качеством подготовки звена к работе, т.е. теми операциями, которые выполняются без включения в изолирующий аппарат.

В связи с этим, в соответствии с планом 3x3x3, используя существующую программу, в которой не рассматривались операции, выполняемые без изолирующих аппаратов (они были установлены равными нулю), был проведен имитационный эксперимент.

В результате получена следующая полиномиальная модель

$$y' = 0,2875 - 0,2055 \cdot x_1 + 0,0650 \cdot x_1^2 + 0,0564 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0599 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0985 \cdot x_2 + 0,0018 \cdot x_2^2 + 0,0558 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0767 \cdot x_3 - 0,0201 \cdot x_3^2. \quad (11)$$

Ее анализ по аналогии с приведенным выше, дает следующие ряды:

– в зоне максимума и центре факторного пространства

$$\Delta y\{x_1\} > \Delta y\{x_2\} > \Delta y\{x_3\}; \quad (12)$$

– в зоне минимума

$$\Delta y\{x_1\} > \Delta y\{x_3\} > \Delta y\{x_2\}. \quad (13)$$

Сравнение (10) и (13) показывает, что в этом случае они совпадают.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что на начальном этапе подготовки для приближения эффективности боевой работы в изолирующих аппаратах, соответствующей среднему уровню подготовленности, основное внимание должно быть

уделено тренировке специальной выносливости  $x_1$ , а потом – способности ориентироваться в пространстве  $x_2$  и групповой слаженности  $x_3$  газодымозащитников звена.

При этом необходимо учитывать, что относительно лучшая подготовленность к реализации одного из качеств способствует сокращению времени боевой работы с началом тренировок любого из двух других.

Кроме этого, наличие имитационных моделей позволяет провести оценку того, насколько эффективным будут те или иные рекомендации.

В частности, если реализовать рекомендации [12], полученные в результате проведения тактико-специальных учений на станциях метрополитена глубокого залегания, модель (2) приобретет следующий вид:

$$y'' = 0,2755 - 0,3403 \cdot z_1 - 0,1230 \cdot z_1^2 + 0,0125 \cdot z_1 \cdot z_2 + 0,0722 \cdot z_1 \cdot z_3 - 0,0576 \cdot z_2 - 0,0018 \cdot z_2^2 + 0,0065 \cdot z_2 \cdot z_3 - 0,0984 \cdot z_3 - 0,0178 \cdot z_3^2. \quad (14)$$

Это выражение по аналогии с (5) трансформируется в

$$y'' = 0,2755 - 0,3403 \cdot z_1 - 0,0984 \cdot z_3. \quad (15)$$

Сравнение (5) и (15) показывает, что можно ожидать сокращения времени спасения пострадавшего первым звеном ГДЗС в среднем на 15-20%. При этом, даже в случае достижения наилучших значений выбранных факторов в первом случае, время спасения пострадавшего при минимальных уровнях этих факторов после реализации предложений будет меньше.

## Выводы

Для проведения имитационного эргономического исследования целесообразно использовать традиционный план технико-экономических экспериментов, используемый при исследовании воздействия отдельно каждого из трех факторов на трех уровнях (при прочих равных условиях).

Анализ полученных регрессионных зависимостей, характеризующих продолжительность выполнения отдельных этапов аварийно-спасательных работ, позволяет получить количественные нелинейные оценки как весов отдельных факторов, влияющих на эффективность функционирования системы «спасатель – средства защиты личного состава и ликвидации аварии – чрезвычайная ситуация», так и весов их взаимного влияния.

Конкретные рекомендации целесообразно разрабатывать по максимальному перепаду в однофакторных моделях, полученных при стабилизации ос-

тальних факторів не тільки для центра факторного простору, але і для рівней, що відповідають координатам екстремумів розглянутого показателя ефективності системи.

#### Направлення дальніших досліджень.

Цілесобразно оцінити ефект від впровадження запропонованих рекомендацій в практичну діяльність рятувальників.

### Список літератури

1. Даниленко А.С. Модель бойових дій пожежних підрозділів / А.С. Даниленко // Пожежна небезпека рухомого складу метрополітенів та залізничних доріг: Сб.науч.тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1990. – С. 46-53.
2. Бондарев В.Ф. Імітаційне моделювання бойових дій по тушенню пожег на електростанціях метрополітенів / В.Ф. Бондарев, В.В. Семенов // Пожежна безпека метрополітенів: Сб.науч.тр. – М.: ВНИИПО, 1989. – С. 44-59.
3. Губинский А.И. Ергономічне проектування судових систем управління / А.И. Губинский, В.Г. Евграфов. – Л.: Судостроение, 1977 – 328 с.
4. Зигель А. Модели групового поведіння в системі "людина-машина" / А. Зигель, Дж. Вольф. – М.: Мир, 1976. – 356 с.
5. Брушлинский Н.Н. Системний аналіз діяльності Державної протипожежної служби: підручник / Н.Н. Брушлинский. – М.: МІПБ МВД Росії, 1998. – 255 с.
6. Стрелець В.М. Імітаційне моделювання роботи зв'язного зв'язку служби пожежної охорони / В.М. Стрелець // Системи обробки інформації: Збірник наукових праць. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1999. – Вип. 1(5). – С. 158-161.

7. Стрелець В.М. Закономірності діяльності рятувальників при проведенні аварійно-рятувальних робіт на станціях метрополітену: моногр. / В.М. Стрелець, П.Ю. Бородин, С.В. Росоха. – Х.: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2012. – 112 с.

8. Васильев М.В. Імітаційна оцінка локалізації вибуха небезпечного хімічного речовини методом реконденсації розрахунками різного рівня підготовленості / М.В. Васильев, В.М. Стрелець, В.В. Тригуб // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Х.: Фоліо, 2012. – № 16. – С. 141-149.

9. Басманов А.Е. Вибір комплексу засобів індивідуальної захисту для забезпечення робіт по ліквідації неперервно діючого джерела небезпечного хімічного речовини / А.Е. Басманов, С.С. Говаленков, М.В. Васильев // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Х.: Фоліо, 2011. – № 13. – С. 29-39.

10. Вознесенский В.А. Статистическі методи планування експерименту в техніко-економічних дослідженнях / В.А. Вознесенский. – М.: Фінанси і статистика, 1981. – 263 с.

11. Стрелець В.М. Експертна оцінка психофізіологічних якостей газодимозахисників / В.М. Стрелець, П.А. Ковальов, О.В. Єлізаров // Пожежна безпека. – 2005. – №2(65). – С. 24-25.

12. Стрелець В.М. Рекомендації по вдосконаленню пожежно-оперативного обслуговування в метрополітені / В.М. Стрелець, П.А. Ковалев, П.Ю. Бородин // Пожежна та техногенна безпека: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2005. – С. 351-353.

Поступила в редакцію 31.03.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Росоха, Національний університет громадянської захисту України, Харків.

### ІМІТАЦІЙНА ЕРГОНОМІЧНА ОЦІНКА ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ «РЯТУВАЛЬНИК - ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ТА ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЇ - НАДЗВИЧАЙНА СИТУАЦІЯ»

О.М. Рева, В.М. Стрелець

Показано, що імітаційну ергономічну оцінку процесу проведення аварійно-рятувальних робіт доцільно проводити на основі аналізу багатфакторних поліноміальних моделей, отриманих в результаті реалізації традиційного плану техніко-економічних експериментів 3x3x3. Це дозволяє отримати кількісні нелінійні оцінки як терезів окремих факторів, що впливають на ефективність функціонування системи «рятувальник - засоби захисту особового складу та ліквідації аварії - надзвичайна ситуація», так і ваг їх взаємного впливу. При цьому конкретні рекомендації доцільно розробляти по максимальному перепаду в однофакторних моделях, отриманих при стабілізації інших факторів не тільки для центру факторного простору, але й для рівнів, що відповідають координатам екстремумів розглянутого показника ефективності системи.

**Ключові слова:** ергономічна оцінка, система «рятувальник - засоби захисту особового складу та ліквідації аварії - надзвичайна ситуація», імітаційне моделювання, багатфакторні моделі.

### SIMULATION ERGONOMIC EVALUATION OF THE OPERATION OF THE "RESCUER - PROTECTION AND EMERGENCY RESPONSE - EMERGENCY"

O.M. Reva, V.M. Strelec

It is shown that the simulation ergonomic evaluation process of the rescue operation is advantageously carried out on the basis of multivariate analysis of polynomial models derived from the sale of the traditional plan of feasibility experiments 3x3x3. This allows for quantitative assessment of both nonlinear weights of individual factors affecting the efficiency of the system "rescuer - protection of personnel and emergency response - emergency" and the balance of their mutual influence. In this case, it is advisable to develop specific recommendations for the maximum difference in the one-factor model obtained by the stabilization of other factors not only for the center of the factor space, but also for the levels corresponding to the coordinates of the extreme of the indicator system efficiency.

**Keywords:** ergonomic evaluation system "rescuer - protection and emergency response - emergency", simulation, multi-factor model.