

М.В. Васильев, В.М. Стрелец
(Национальный университет гражданской защиты Украины;
e-mail: vstrelec1956@ukr.net)

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СПАСАТЕЛЕЙ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ С ВЫБРОСОМ ОПАСНОГО ХИМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Обоснована последовательность многофакторного анализа закономерностей деятельности спасателей. В основе лежит анализ полиномиальных регрессионных зависимостей, полученных в результате имитационного моделирования на ЭВМ деятельности спасателей при ликвидации последствий аварий с выбросом опасного химического вещества.

Ключевые слова: имитационная оценка, многофакторный анализ, подготовленность, комплекс средств индивидуальной защиты.

M.V. Vasil'ev, V.M. Strelec

ABOUT REGULARITIES OF LIFEGUARDS ACTIVITIES ON ELIMINATION OF CONSEQUENCES TO ACCIDENTS WITH RELEASE OF A HAZARDOUS CHEMICAL

Sequence of multivariate analysis regularities of lifeguards activities are proved. It is based on the analysis of polynomial regression, which was obtained as a result of computer simulation of lifeguards activities on elimination of consequences to accidents with release of a hazardous chemical

Key words: simulation evaluation, multivariate analysis, preparedness, set of personal protective equipment.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 2 октября 2013 г.

Повышение эффективности **аварийно-спасательных работ (АСР)** при ликвидации последствий аварий с выбросом **опасного химического вещества (ОХВ)** требует системного изучения процесса ликвидации чрезвычайной ситуации, который представляет собой функционирование системы "спасатель – средства защиты и ликвидации аварии – чрезвычайная ситуация", совершенствование которой в условиях комплексного воздействия опасных факторов требует знания результатов эргономического анализа закономерностей деятельности спасателей. Оценить же влияние на время выполнения рассматриваемого процесса выбранных факторов, с учётом того, что такие процессы бывают крайне редко, позволяет использование результатов имитационного моделирования на ЭВМ.

Анализ последних исследований и публикаций показал эффективность подхода, основанного на обобщении результатов имитационного моделирования как аварийной ситуации, так и деятельности спасателей. Например, в [1] рассматриваются особенности использования результатов имитационного моделирования для предварительного планирования боевой работы групп быстро-

го реагирования в подразделениях пожарной охраны Нью-Йорка. При этом закономерности, связывающие показатели эффективности проведения АСР с отдельными важными факторами, не рассматриваются.

В [2] анализируются результаты физического моделирования деятельности пожарных, в основе которых лежало выполнение специальных контрольных упражнений, копирующих работу в неудобном положении. В итоге рассматриваются линейные регрессионные зависимости, которые учитывают влияние возраста, звания (опыта), владение недвижимостью. Нелинейные эффекты и эффекты взаимодействия отсутствуют и, естественно, не анализируются. В [3], где приведены результаты имитационного моделирования экстремальной деятельности военнослужащих, они в программе учитываются, однако их количественная оценка отсутствует.

В то же время, в [4] отмечена имитационная оценка локализации выброса ОХВ и показано, что время локализации типовой чрезвычайной ситуации спасателями в зависимости от уровня подготовленности меняется по экспоненциальному закону. Однако результаты использования модели на тот момент не позволяли комплексно оценить влияние на конечный результат факторов, характеризующих компоненты рассматриваемой системы "спасатель – средства защиты и ликвидации последствий аварии – чрезвычайная ситуация".

В [5] показана возможность использования результатов имитационного моделирования в виде регрессионных моделей для эргономической оценки эффективности работы звена газодымозащитной службы при тушении пожара в подвальных помещениях. Но проведенный анализ не объяснял выбор вида многофакторной модели.

В [6, 7] сравниваются многофакторные модели проведения аварийно-спасательных работ на станциях метрополитена, которые описывают рассматриваемый процесс до и после реализации предложенных экспертами рекомендаций. Однако и в этом случае не обосновывается выбор вида многофакторной модели.

В [7] отмечено, что в процессе выбора плана имитационного эксперимента и отбора основных факторов целесообразно рассматривать одновременно более трёх факторов, а также проводить оценки влияния выбранных факторов в том случае, когда они меняются, на двух равных интервалах. Исходя из этого, можно сформулировать следующие цели:

- обосновать план имитационного эксперимента, который необходимо провести для обеспечения эргономического анализа закономерностей, характеризующих продолжительность процесса локализации аварии с выбросом ОХВ;
- систематизировать порядок получения полиномиальных моделей, которые станут основой для комплексного многофакторного анализа выбранного способа ликвидации (локализации) последствий аварии;
- определить порядок и провести эргономический анализ полученной многофакторной зависимости.

В процессе выбора плана имитационного эксперимента, учитывая результаты анализа особенностей проведения работ по ликвидации последствий аварии с выбросом ОХВ [11] и данные экспериментальных исследований [9, 10], были выделены следующие значимые факторы, которые характеризуют отдельные компоненты системы "человек – техника – среда":

x_1 – приведённая интенсивность ψ выброса ОХВ [8] (как характеристика компоненты "среда");

x_2 – подготовленность личного состава (как характеристика компоненты "человек");

x_3 – используемая комбинация средств индивидуальной защиты спасателей (как характеристика компоненты "техника").

Учитывая опыт разработки многофакторных полиномиальных моделей для других видов экстремальной деятельности спасателей [6, 7], оценка влияния выбранных факторов рассматривается для ситуации, когда они изменяются на двух равных интервалах.

Анализ отобранных факторов показывает, что они влияют на ход АСР нелинейно. В [10] отмечено, что время выполнения отдельных операций, в зависимости от уровня подготовленности спасателей, меняется по экспоненциальному закону, то есть уровень практической выучки будет сильнее сказываться на времени рассматриваемого процесса при переходе от начального уровня подготовленности ($x_2 = -1$) к среднему ($x_2 = 0$), чем от среднего – к высокому ($x_2 = +1$).

Аналогичная ситуация имеет место и при сравнении того [6, 7], как быстро выполняются отдельные операции в комплексе средств индивидуальной защиты 1 типа, когда изолирующий аппарат находится внутри костюма ($x_3 = -1$), по сравнению с тем, когда используется комбинация, при которой изолирующий аппарат находится снаружи костюма ($x_3 = 0$) или же личный состав работает в комбинации изолирующего костюма и фильтрующего противогаза ($x_3 = +1$).

Относительно приведенной интенсивности ψ выброса опасного химического вещества x_1 в [8] отмечено, что при $\psi = 1 \frac{\text{кг/с}}{\text{мг/м}^3}$ ($x_1 = -1$) все операции должны выполняться личным составом в комплексе средств индивидуальной защиты, который предполагает обязательное наличие изолирующего аппарата внутри изолирующего костюма; при $\psi = 0,1 \frac{\text{кг/с}}{\text{мг/м}^3}$ ($x_1 = 0$) – обязательно наличие изолирующего аппарата, который может быть и поверх изолирующего костюма; при $\psi = 0,01 \frac{\text{кг/с}}{\text{мг/м}^3}$ ($x_1 = +1$) – спасатели могут быть в фильтрующих противогазах. Можно предположить, что фактор x_1 на время АСР также будет влиять нелинейно. При этом очевидна взаимосвязь между интенсивностью выброса ОХВ и комбинацией средств индивидуальной защиты спасателей. Кроме этого, можно предположить и о других 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 [11].

Таким образом, полиномиальная модель времени выполнения (в кодированных переменных) рассматриваемого процесса проведения АСР при ликвидации последствий аварий с выбросом ОХВ в общем виде может иметь вид:

$$y' = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ b_2 \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \\ b_3 \cdot x_3 + b_{33} \cdot x_3^2. \quad (1)$$

Исходя из вышесказанного, рекомендуется план имитационного эксперимента $3 \times 3 \times 3$ – традиционный план технико-экономических экспериментов, используемый при исследовании воздействия отдельно каждого из трёх факторов на трех уровнях (при прочих равных условиях). Выполнение плана обеспечивает хорошие статистические характеристики и лучшие по точности оценки всех коэффициентов регрессии [11].

При проведении многофакторного имитационного моделирования в соответствии с выбранным планом наилучшие показатели соответствуют уровню "-1 -1 -1", средние – уровню "0 0 0", а лучшие – "1 1 1". Используя разработанную имитационную модель [1] локализации выброса ОХВ методом реконденсации, было проведено 27 экспериментов по 100 итераций каждый. В итоге (табл. 1) получено 27 средних значений выполнения комплекса операций при различных сочетаниях уровней, а также 27 значений среднеквадратического отклонения.

Кроме этого, в табл. 1 в столбцах 7 и 8 приведены кодированные значения полученных средних и среднеквадратичных отклонений

$$\bar{y}'(G'_y) = \frac{\bar{t}(G_t) - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}. \quad (2)$$

Изменение отобранных факторов на трёх уровнях через равные интервалы позволяет существенно упростить построение искомым полиномиальных моделей, поскольку в результате этого при расчёте оценок коэффициентов b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} можно использовать готовые формулы, приведённые в [11]:

$$b_0 = A_0(0Y) - \sum A_{0i}(iiY), \quad (3)$$

$$b_i = A_i(iY), \quad (4)$$

$$b_{ij} = A_{ij}(ijY), \quad (5)$$

$$b_{ii} = A_{ii}(iiY) - A_{0i}(0Y), \quad (6)$$

где $A_0, A_{0i}, A_i, A_{ij}, A_{ii}$ – постоянные для расчёта коэффициентов регрессии при симметричных планах [11];

$0Y, iiY, iY, ijY$ – суммы результатов экспериментов (табл. 1).

**Результаты имитационного моделирования локализации выброса ОХВ
методом реконденсации**

№ п/п	x_1	x_2	x_3	$\bar{t}, \text{с}$	$G_t, \text{с}$	\bar{y}'	G'_y
1	-1	-1	-1	1263,14	182,54	0,628	0,124
2	-1	-1	0	1120,25	169,68	0,531	0,115
3	-1	-1	1	1111,04	169,12	0,525	0,115
4	-1	0	-1	583,46	68,35	0,166	0,046
5	-1	0	0	578,11	64,65	0,163	0,044
6	-1	0	1	592,97	60,77	0,173	0,041
7	-1	1	-1	525,21	51,00	0,127	0,035
8	-1	1	0	516,99	48,69	0,121	0,033
9	-1	1	1	503,25	51,22	0,112	0,035
10	0	-1	-1	1123,10	170,15	0,533	0,116
11	0	-1	0	1100,74	169,06	0,518	0,115
12	0	-1	1	1093,12	177,02	0,512	0,120
13	0	0	-1	581,07	59,56	0,165	0,040
14	0	0	0	566,66	56,96	0,155	0,039
15	0	0	1	577,43	61,11	0,162	0,042
16	0	1	-1	522,97	52,38	0,125	0,036
17	0	1	0	503,07	44,92	0,112	0,031
18	0	1	1	498,61	47,20	0,109	0,032
19	1	-1	-1	966,69	131,47	0,427	0,089
20	1	-1	0	953,76	118,47	0,418	0,080
21	1	-1	1	921,24	124,13	0,396	0,084
22	1	0	-1	582,33	63,87	0,165	0,043
23	1	0	0	559,86	63,81	0,150	0,043
24	1	0	1	561,45	62,20	0,151	0,042
25	1	1	-1	487,65	41,05	0,101	0,028
26	1	1	0	475,97	39,87	0,093	0,027
27	1	1	1	455,66	38,93	0,079	0,026

Полученные результаты рассчитанных коэффициентов позволили построить трехфакторную квадратичную модель, которая устанавливает количественную связь между временем локализации (в кодированных переменных) очага выброса ОХВ и выбранными факторами

$$\begin{aligned}
 y = & 0,165 - 0,031 \cdot x_1 - 0,014 \cdot x_1^2 + 0,040 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,037 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\
 & - 0,195 \cdot x_2 + 0,143 \cdot x_2^2 + + 0,074 \cdot x_2 \cdot x_3 + \\
 & - 0,012 \cdot x_3 + 0,08 \cdot x_3^2.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Полученная модель отражает полученные в ходе имитационного эксперимента данные, однако непосредственный эргономический анализ закономерности (7) включает в себя её интерпретацию при нарастающей степени риска отвергнуть правильную гипотезу [11].

В то же время, для вычисления соответствующих критических значений $b_{кр}$

$$b_{кр} = t \cdot G\{b\}, \quad (8)$$

где t берётся по таблицам [12] при выбранном уровне значимости α и числе степеней свободы $f = n = 27$, используется средняя дисперсия проведённых имитационных экспериментов, в качестве которой, в соответствии с [8], можно назначать 1-10 %-ю относительную ошибку к среднему выходу в системе (для плана "0 0 0"). Учитывая то, что вопросы эргономического анализа относятся к поисковым [11], при вычислении критических значений $b_{кр}$ в качестве ошибки опыта принято решение использовать 10 %-ю относительную ошибку для плана "0 0 0":

$$G_s = 0,1 \cdot 0,137 = 0,0137. \quad (9)$$

Это позволяет для расчёта ошибок коэффициентов регрессии использовать следующие выражения [8]

$$G\{b_0\} = 0,5022 \cdot G_s = 0,0069; \quad (10)$$

$$G\{b_i\} = 0,3333 \cdot G_s = 0,0046; \quad (11)$$

$$G\{b_{ij}\} = 0,2887 \cdot G_s = 0,0039; \quad (12)$$

$$G\{b_{ii}\} = 0,4082 \cdot G_s = 0,0056. \quad (13)$$

В табл. 2 показаны рассчитанные по (8) критические значения коэффициентов при уровнях значимости $\alpha = 0,01$ и $\alpha = 0,05$ для модели (7).

Таблица 2

Критические значения коэффициентов модели (7)

α	t	$b_{0кр}$	$b_{iкр}$	$b_{iiкр}$	$b_{ijкр}$
0,01	2,771	0,0191	0,0127	0,0110	0,0155
0,05	2,052	0,0141	0,0094	0,0081	0,0115

Полученные значения позволяют при каждом уровне риска α построить и проанализировать графы связи между факторами. На рис. 1. показаны такие графы при возрастающем риске для модели (7).



Рис. 1. Изменение графов связи между тремя факторами x_i при различном уровне риска отвергнуть правильную гипотезу (зачернены значимые линейные эффекты, петля – значимый квадратичный эффект, ребра графа – значимыми являются эффекты взаимодействия)

Видно, что уже при уровне значимости $\alpha = 0,05$ можно говорить о том, что все выбранные для анализа факторы являются значимыми, влияют на результат нелинейно и взаимосвязаны между собой.

В задачу интерпретации полиномиальной модели входит и ранжирование факторов x_i по степени их влияния на выход, что необходимо для выбора управляющих воздействий. Для дальнейшего анализа был принят двусторонний риск: $\alpha = 0,05$. Поскольку незначимые эффекты отсутствуют (правый граф на рис.1), рассматривается модель (7).

В соответствии с [11], ранжирование проводится по максимальному перепаду Δy в однофакторных моделях $y = f_i(x_i)$ (табл. 3), получаемых при стабилизации остальных x_i на уровнях, соответствующих координатам экстремумов y_{\min} и y_{\max} , а также в центре факторного пространства.

Таблица 3

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

	В зоне максимума	В центре факторного пространства	В зоне минимума
x_1	$0,5970 - 0,1080 x_1 - 0,0141 x_1^2$	$0,1655 - 0,0313 x_1 - 0,0141 x_1^2$	$0,1829 + 0,0453 x_1 - 0,0141 x_1^2$
x_2	$0,2391 - 0,3092 x_2 + 0,1425 x_2^2$	$0,1655 - 0,1949 x_2 + 0,1425 x_2^2$	$0,1522 - 0,0806 x_2 + 0,1425 x_2^2$
x_3	$0,5600 - 0,1232 x_2 + 0,0076 x_2^2$	$0,1655 - 0,0121 x_2 + 0,0076 x_2^2$	$0,1076 + 0,0990 x_2 + 0,0076 x_2^2$

Ранжирование в зоне максимума и в центре факторного пространства даёт ряд

$$\Delta y\{x_2\} > \Delta y\{x_1\} > \Delta y\{x_3\}, \quad (14)$$

то есть наиболее ощутимо из рассматриваемых факторов на ликвидацию последствий 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 даёт ряд:

$$\Delta y\{x_3\} > \Delta y\{x_2\} > \Delta y\{x_1\}, \quad (15)$$

который говорит о том, что при низких значениях приведенной интенсивности выброса ψ и высоком уровне подготовленности наиболее существенно на время ликвидации влияют особенности, связанные с работой в выбранном комплексе средств индивидуальной защиты (фактор x_3). Затем следует факторы x_2 , связанный с уровнем подготовленности персонала, и x_1 – с опасностью среды, в которой работают спасатели.

Следовательно, учитывая то, что в большинстве случаев конкретный вариант проведения работ носит уникальный характер [13], то есть спасатели не готовятся конкретно 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, которая должна включать как отработку отдельных типовых операций и процессов в средствах защиты, так и обучение работе со средствами контроля опасности.

Выводы

- отмечена целесообразность использования для проведения имитационного исследования традиционного плана технико-экономических экспериментов, используемого при исследовании воздействия отдельно каждого из трёх факторов на трёх уровнях (при прочих равных условиях);
- предложена последовательность анализа полученных регрессионных зависимостей, позволяющая получить количественные нелинейные оценки как весов отдельных факторов, влияющих на эффективность функционирования системы "спасатель – чрезвычайная ситуация с выбросом опасных химических веществ – средства защиты личного состава", так и весов их взаимного влияния;
- показано, что при подготовке аварийно-спасательных подразделений необходимо уделять внимание как отработке отдельных типовых операций и процессов в средствах защиты, так и обучению работе со средствами контроля уровня опасности.

Литература

1. *Dennis Amodio*. Electronic Pre-Planning for first responders // The Carolina Fire Rescue EMS Journal. <http://www.carolinafirejournal.com/articles/article-detail/articleid/2277/electronic-pre-planning-for-first-responders.aspx>.
2. *WF Peate, Gerry Bates, Karen Lunda, Smitha Francis, Kristen Bellamy*. Core strength: A new model for injury prediction and prevention // Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 2007. <http://www.occup-med.com/content/2/1/3>.
3. *Зигель А., Вольф Дж.* Модели группового поведения в системе "человек-машина". М.: Мир, 1976. 356 с.
4. *Васильев М.В., Стрелец В.М., Тригуб В.В.* Имитационная оценка локализации выброса опасного химического вещества методом реконденсации расчётами разного уровня подготовленности // Проблемы надзвичайних ситуацій. № 16. Харків, Фоліо, 2012. С. 141-149.
5. *Стрелец В.М., Мамон В.П., Ермаков Н.П., Дьяченко С.Д.* Эргономический анализ групповой деятельности звена ГДЗС // Сб. науч. тр. "Проблемы пожарной безопасности". Вып. 7. Харьков: ХИПБ, 2000. С.190-194.
6. *Стрелец В.М., Бородич П.Ю.* Многофакторная оценка пожарно-спасательных работ на станциях метрополитена // Сб. науч. тр. "Проблемы пожарной безопасности". Вып. 15. Харьков: АПБУ, 2004. С. 208-214.
7. *Бородич П.Ю.* Сравнительная оценка многофакторных моделей // Сб. науч. тр. "Проблемы пожарной безопасности". Харьков: УГЗУ, 2006. Вып. 20. С. 29-32.
8. *Басманов А.Е., Говаленков С.С., Васильев М.В.* Выбор комплекса средств индивидуальной защиты для обеспечения работ по ликвидации непрерывно действующего источника опасного химического вещества // Проблемы надзвичайних ситуацій. № 13. Харків, Фоліо, 2011. С. 29-39.
9. *Васильев М.В., Стрелец В.М., Тригуб В.В.* Сравнительный анализ закономерностей работы спасателей в средствах индивидуальной защиты первого и второго типа // Проблемы надзвичайних ситуацій. № 13. Харків, Фоліо, 2011. С. 58-65.
10. *Васильев М.В., Стрелец В.М.* Представление исходных данных для имитационного моделирования процесса ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом опасного химического вещества // Проблемы надзвичайних ситуацій. № 14. Харків, Фоліо, 2011. С. 53-64.
11. *Вознесенский В.А.* Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981. 263 с.
12. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.
13. *Владимиров В.А., Лукьянченков А.Г., Павлов К.Н. и др.* Методические рекомендации по ликвидации последствий радиационных и химических аварий. М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС, 2004. 340 с.