

*Васильев М.В., нач. Краснокутского РС ГУГСЧСУ
в Харьковской обл.,*

Стрелец В.М., канд. техн. наук, доц., НУГЗУ,

Тригуб В.В., канд. техн. наук, доц., НУГЗУ

**АНАЛИЗ МНОГОФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «СПАСАТЕЛЬ –
СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ И ЛИКВИДАЦИИ АВАРИИ –
ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ С ВЫБРОСОМ ОПАСНОГО
ХИМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА»**

(представлено д-ром техн. наук Соболев А.Н.)

Предложена последовательность получения и эргономического анализа полиномиальных регрессионных зависимостей, которые характеризуют проведение аварийно-спасательных работ при ликвидации аварий с выбросами опасных химических веществ. Показана возможность количественной оценки взаимозависимых и нелинейных факторов, влияющих на функционирование системы «спасатель – средства защиты и ликвидации аварии – чрезвычайная ситуация с выбросом опасного химического вещества».

Ключевые слова: имитационная оценка, локализация чрезвычайной ситуации, средства защиты, многофакторная модель, спасатели

Постановка проблемы. Повышение эффективности аварийно-спасательных работ (АСР) при ликвидации 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 учетом того, что такие процессы бывают крайне редко, позволяет использование результатов имитационного моделирования на ЭВМ.

Анализ последних исследований и публикаций. В [1] отмечена работоспособность имитационной оценки 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 аварии – чрезвычайная ситуация». В [2] показана возможность использования результатов имитационного моделирования в виде регрессионных моделей для эргономической оценки эффективности работы звена ГДЗС при тушении пожара в подвальных помещениях. Но проведенный анализ не объяснял выбор вида многофакторной модели.

В [3,4] 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 [4] отмечено, что в процессе выбора плана имитационного эксперимента и отбора основных факторов целесообразно рассматривать одновременно более трех факторов, а также – оценки влияния выбранных факторов в том случае, когда они меняются, на двух равных интервалах.

Постановка задачи и ее решение. Исходя из этого, были сформулированы 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) аварии;

- определить порядок эргономического анализа полученной многофакторной зависимости.

В процессе выбора плана имитационного эксперимента, учитывая результаты анализа особенностей проведения работ по ликвидации аварии с выбросом ОХВ [5] и данные экспери-

ментальных исследований [6,7], были выделены следующие значимые факторы, которые характеризуют отдельные компоненты системы «человек – техника – среда»:

x_1 – приведенная интенсивность ψ выброса ОХВ [5] (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 [3,4], оценка влияния выбранных факторов рассматривается для ситуации, когда они меняются, на двух равных интервалах.

Анализ отобранных факторов показывает, что они влияют на ход АСР нелинейно. Так, в [7] отмечено, что время выполнения отдельных операций в зависимости от уровня подготовленности спасателей меняется по экспоненциальному закону, т.е. 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 теми, 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 [5] 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 [8].

Таким образом, полиномиальная модель времени выполнения (в кодированных переменных) рассматриваемого процесса проведения АСР при ликвидации 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 трех факторов на трех уровнях (при прочих равных условиях). При этом план обладает хорошими статистическими характеристиками и лучшими по точности оценками всех коэффициентов регрессии $\{ks\}$ [8].

При проведении многофакторного имитационного моделирования в соответствии с выбранным планом наихудшие 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 (см. Табл.1) получено 27 средних значений выполнения комплекса операций при различных сочета-

Анализ многофакторной модели функционирования системы «спасатель – средства защиты и ликвидации аварии – чрезвычайная ситуация с выбросом опасного химического вещества»

ниях уровней, а также 27 значений среднеквадратического отклонения.

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования локализации выброса ОХВ методом реконденсации

№ п/п	x_1	x_2	x_3	\bar{t} , с	G_t , 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

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 трех уровнях через равные интервалы позволяет существенно упростить построение искомых полиномиальных моделей, поскольку в результате этого при расчете оценок коэффициентов b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} можно использовать готовые формулы, приведенные в [8]

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

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

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

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

где $A_0, A_{0i}, A_i, A_{ij}, A_{ii}$ – постоянные для расчета коэффициентов регрессии при симметричных планах [8]; $0Y, iiY, iY, ijY$ – суммы результатов экспериментов (см. Табл.1).

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

$$y = 0.165 - 0.031 \cdot x_1 - 0.014 \cdot x_1^2 + 0.040 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.037 \cdot x_1 \cdot x_3 - \\ - 0.195 \cdot x_2 + 0.143 \cdot x_2^2 + \quad + 0.074 \cdot x_2 \cdot x_3 - (7) \\ - 0.012 \cdot x_3 + 0.08 \cdot x_3^2$$

Полученная модель отражает полученные в ходе имитационного эксперимента данные, однако непосредственный эргономический анализ закономерности (7) включает в себя ее интерпретацию при нарастающей степени риска отвергнуть правильную гипотезу [8].

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

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

где t берется по таблицам [9] при выбранном уровне значимости α и числе степеней свободы $f = n = 27$, используется средняя дисперсия проведенных имитационных экспериментов, в качестве которой в соответствии с [8] можно назначать 1-10% относительную ошибку к среднему выходу в системе (для плана «000»). Учитывая то, что вопросы эргономического анализа относятся к поисковым [8], при вычислении критических значений $b_{кр}$ в качестве ошибки опыта принято решение использовать 10% относительную ошибку для плана «000»

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

Это позволяет для расчета 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).

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).

Видно, что уже при уровне значимости $\alpha=0.05$ можно говорить о том, что все выбранные для анализа факторы явля-

ються значимими, впливають на результат нелінійно і взаємо-
связаны между собой.

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



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

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 [8] 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.

Ранжирование в зоне максимума и в центре факторного пространства дает ряд

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

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).

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	$0,2391-0,3092 x_2+$ $+0,1425 x_2^2$	$0,1655-0,1949 x_2+$ $+0,1425 x_2^2$	$0,1522-0,0806x_2+$ $+0,1425 x_2^2$
x_3	$0,5600-0,1232 x_3-$ $+0,0076x_3^2$	$0,1655-0,0121x_3+$ $+0,0076x_3^2$	$0,1076+0,0990x_3+$ $+0,0076x_3^2$

В то же время, ранжирование в зоне минимума дает ряд

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

который говорит о том, что при низких значениях приведенной интенсивности выброса ψ и высоком уровне подготовленности наиболее существенно на время проведения 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 [10], 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 трех факторов на трех 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 обращать внимание как на отработку отдельных типовых операций и процессов в средствах защиты, так и обучению работе со средствами контроля опасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев М.В. Имитационная оценка локализации выброса опасного химического вещества методом реконденсации расчетами разного уровня подготовленности / М.В. Васильев, В.М. Стрелец, Тригуб В.В. // Проблемы надзвичайних ситуацій - № 16 – Харків, Фоліо, 2012 – С.141-149
2. Стрелец В.М. Эргономический анализ групповой деятельности звена ГДЗС / Стрелец В.М., Мамон В.П., Ермаков Н.П., Дьяченко С.Д. // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. Вып.7. – Харьков: ХИПБ, 2000. – С.190-194
3. Стрелец В.М. Многофакторная оценка пожарно-спасательных работ на станциях метрополитена / В.М.Стрелец, П.Ю.Бородич // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр.Вып.15. - Харьков: АПБУ, 2004. – С.208 –214.
4. Бородич П.Ю. Сравнительная оценка многофакторных моделей.// Проблемы пожарной безопасности: Сбнауч.тр. – Харьков: УГЗУ, 2006. – Вып.20. – С.29-32
5. Басманов А.Е. Выбор комплекса средств индивидуальной защиты для обеспечения работ по ликвидации непрерыв-

- но действующего источника опасного химического вещества / Басманов А.Е., Говаленков С.С., Васильев М.В. // Проблемы надзвичайних ситуацій - № 13 – Харків, Фоліо, 2011 – С.29-39
6. Васильев М.В. Сравнительный анализ закономерностей работы спасателей в средствах индивидуальной защиты первого и второго типа / М.В. Васильев, В.М. Стрелец, Тригуб В.В. // Проблемы надзвичайних ситуацій - № 13 – Харків, Фоліо, 2011 – С.58-65
 7. Васильев М.В. Представление исходных данных для имитационного моделирования процесса ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом опасного химического вещества / М.В. Васильев, В.М. Стрелец // Проблемы надзвичайних ситуацій - № 14 – Харків, Фоліо, 2011 – С.53-64
 8. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях./ Вознесенский В.А. // М.:Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
 9. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Большев Л.Н., Смирнов Н.В.// М., Наука, 1965. – 464 с.
 10. Методические рекомендации по ликвидации последствий радиационных и химических аварий / [Владимиров В.А., Лукьянченко А.Г., Павлов К.Н. и др.]; под ред. В.А. Владимирова. – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС, 2004. – 340 с.

Васильев М.В., Стрелец В.М., Тригуб В.В.

Аналіз багатofакторної моделі функціонування системи «рятувальник – засоби захисту та ліквідації аварії – надзвичайна ситуація з викидом небезпечних хімічних речовин»

Запропоновано послідовність отримання та ергономічного аналізу поліноміальних регресійних залежностей, які характеризують проведення аварійно-рятувальних робіт при ліквідації аварій з викидами небезпечних хімічних речовин. Показана можливість кількісної оцінки взаємозалежних і нелінійних факторів, що впливають на функціонування системи «рятувальник - засоби захисту та ліквідації аварії - надзвичайна ситуація з викидом небезпечної хімічної речовини».

Ключові слова: імітаційна оцінка, локалізація надзвичайної ситуації, засоби захисту, багатofакторна модель, рятувальники

Vasil`ev M.V., Strelec V.M., Trigub V.V.

Analysis of multifactor model of the system "rescuers - protection and emergency response - emergency release of hazardous chemicals"

A sequence of receipt and ergonomic analysis of polynomial regression relationships that characterize the conduct rescue operations in emergency response to the release of hazardous chemicals. The possibility of quantifying nonlinear and interdependent factors affecting the operation of the "rescuer - protection and emergency response - emergency release of hazardous chemicals".

Key words: simulation evaluation, the localization of emergency, PPE, multi-factor model, the rescuers

УДК 351.861+504.61

*Васюков А.Е., д-р хим. наук, зав. каф., НУГЗУ,
Иванов Е.В., зам. нач. курса, НУГЗУ,
Лобойченко В.М., канд. хим. наук, доц., НУГЗУ,
Варивода Е.А., канд. геогр. наук, доц., НУГЗУ*

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА МАССЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ВСЛЕДСТВИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

(представлено д-ром техн. наук Басмановым А.Е.)

Рассмотрены варианты расчета массы загрязняющих веществ в зависимости от вида водопользования на примере последствий взрыва боеприпасов на артиллерийском складе (с. Новобогдановка Запорожской обл., 2006 г.). Введено понятие $M_{уд}$ – удельная масса загрязняющего вещества в сточной воде»: масса загрязняющего вещества в 1 м³ сточной воды, поступающая в водный объект в течение 1 часа. Показано, что $M_{уд}$ зависит от вида водопользования в случае, когда фактическая концентрация загрязняющего вещества сравнима с ПДК для воды хозяйственно-питьевого водопользования. В случае $C_{факт.} > 10 ПДК_{хоз.-пит.}$, вид водопользования практически не влияет на $M_{уд}$.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, загрязняющие вещества, экологический ущерб, загрязнение водных ресурсов, экологическая безопасность, сбросы сточных вод

Постановка проблемы. На сегодняшний день актуальной проблемой является увеличение числа чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера вследствие нарушения природоохранного законодательства в части пре-

К вопросу расчета массы загрязняющего вещества при определении экологического ущерба от чрезвычайных ситуаций вследствие загрязнения водных ресурсов