

*Васильев М.В., адъюнкт, НУТЗУ,  
Стрелец В.М., канд. техн. наук, доц., НУТЗУ,  
Тригуб В.В., канд. техн. наук, доц., НУТЗУ*

## **ИМИТАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЫБРОСА ОПАСНОГО ХИМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА МЕТОДОМ РЕКОНДЕНСАЦИИ РАСЧЕТАМИ РАЗНОГО УРОВНЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ**

(представлено д-ром техн. наук Бодянским Э.В.)

Показано, что время локализации типовой чрезвычайной ситуации спасателями в зависимости от уровня подготовленности меняется по экспоненциальному закону. При этом различие математических ожиданий времени локализации чрезвычайной ситуации, полученных путем имитационного на ЭВМ и физического моделирования, статистически незначимо.

**Ключевые слова:** имитационная оценка, локализация чрезвычайной ситуации, средства защиты, подготовленность, спасатели

**Постановка проблемы.** Эффективное проведение аварийно-спасательных работ (АСР) при ликвидации чрезвычайной ситуации с выбросом опасных химических веществ (ОХВ) требует разработки комплекса организационно-технических мероприятий, реализация которых обеспечит сокращение времени работ при ограничениях на людские и технические ресурсы, а также без снижения уровня безопасности спасателей. Учитывая то, что для обеспечения не только реальных АСР, но даже для проведения учений, связанных с ликвидацией последствий выброса ОХВ, требуются значительные материальные затраты, что возможны разнообразные способы проведения работ [1], и при этом конечные результаты существенно зависят от уровня подготовленности спасателей [2], одним из направлений обоснования практических рекомендаций является имитационное моделирование деятельности спасателей

**Анализ последних исследований и публикаций.** Опыт использования моделирования в пожарной охране для решения организационно-управленческих задач [3,4], в авиации и космонавтике [5], других сферах деятельности [6,7] подтвердил эффек-

тивность использования результатов моделирования деятельности специалистов, работающих в экстремальных ситуациях.

Однако в каждом случае проводился отдельный анализ того, что полученной моделью можно пользоваться. Так, в моделях группового поведения [6] вывод об их достоверности делают после того, как в итоговых результатах проявляются заявленные при создании моделей такие психологические качества как напряженность, спаянность, психосоциальные эффективность и направленность, моральные качества отдельных номеров боевого расчета. В [3] подбор итоговых моделей осуществляется по результатам статистического анализа результатов реального пожарно-оперативного обслуживания за достаточно продолжительный период с последующей оценкой их достоверности по, как правило, критерию Романовского. При этом полученные модели не реагируют на изменение технических средств или уровня подготовленности пожарных. Этот недостаток устранен в [4], однако объясняется в первую очередь тем, что рассматриваемая ситуация (боевое развертывание специального пожарного автомобиля) позволяла провести сравнение результатов имитационного и натурального экспериментов при всех рассмотренных исходных данных. Аналогичная ситуация имеет место и в [5]. В более сложных ситуациях, например в [7], проводится проверка попадания натуральных результатов, полученных в ходе тактико-специальных учений для отдельных событий рассматриваемого процесса (в данном случае проведения АСР на станциях метрополитена), в диапазон трех среднеквадратичных отклонений, от математического ожидания времени наступления этого события, полученного в результате имитационного моделирования. Т.е., фактически, доказана работоспособность модели.

Проведенный анализ показывает, что все рассмотренные ситуации не только характеризуются сложностью обоснования достоверности полученной имитационной оценки, но и, практически, неприменимы для анализа достоверности имитационной оценки результатов проведения АСР при ликвидации ЧС с выбросом ОХВ, поскольку даже практика подготовки спасателей (а не только их боевой работы, которая носит эпизодический характер) не позволяет проводить многочисленные натурные эксперименты.

**Постановка задачи и ее решение.** Исходя из этого, поставлена задача анализа результатов АСР при ликвидации ЧС с выбросом ОХВ, полученных как в результате имитационного, так

и в результате физического моделирования процесса локализации очага методом реконденсации.

Для этого, используя модель, описанную в [2], было проведено имитационное моделирование АСР спасателями, которые имеют разный уровень подготовленности. Полученные на ЭВМ результаты в обобщенном виде приведены в табл.1.

**Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования локализации очага чрезвычайной ситуации методом реконденсации спасателями разного уровня подготовленности**

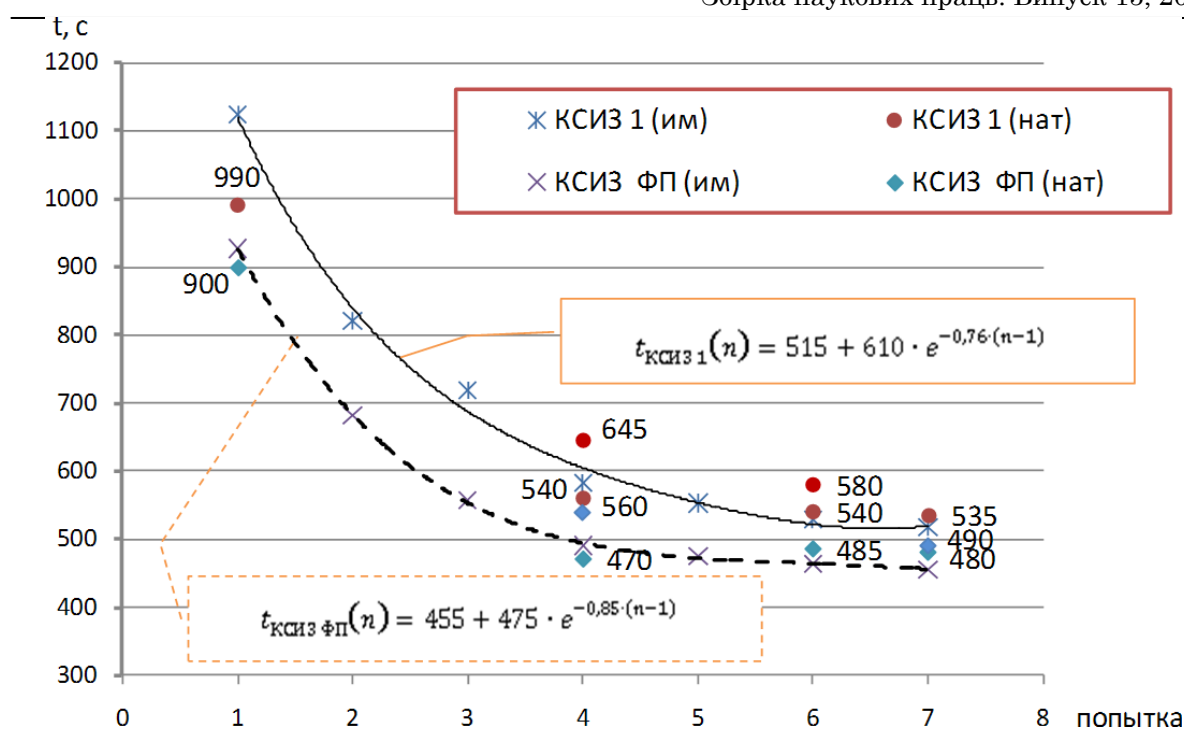
Попытка, $n$	1	2	3	4	5	6	7
$\bar{t}_{КСИЗ\ 1}, \text{ с}$	1123,21	819,96	719,84	583,93	552,96	528,97	517,55
$G_{КСИЗ\ 1}, \text{ с}$	167,53	93,21	81,6	66,2	59,1	57,63	49,44
$\bar{t}_{КСИЗ\ \text{ФП}}, \text{ с}$	926,71	681,89	556,74	490,56	475,32	463,35	456,43
$G_{КСИЗ\ \text{ФП}}, \text{ с}$	121,6	56,74	59,09	46,81	41,75	39,06	36,38

В качестве показателя уровня подготовленности выступало количество тренировочных попыток, которые они осуществили прежде, чем приступили к выполнению операций, составляющих рассматриваемый процесс (см. рис.2 в [2]). При каждом из семи рассмотренных уровней подготовленности было проведено по 100 имитационных итераций.

Полученные результаты имитационного моделирования показали (см. рис.1), что в ходе тренировок время локализации типовой чрезвычайной ситуации методом реконденсации спасателями в зависимости от количества  $n$  тренировочных попыток меняется по экспоненциальному закону независимо от того, был ли это КСИЗ 1 типа или изолирующий костюм (ИК) вместе с фильтрующим противогазом (ФП)

$$t = \bar{t}_{\text{гран}} + (\bar{t}_1 - \bar{t}_{\text{гран}}) \cdot e^{-\lambda(n-1)}, \quad (1)$$

где  $\bar{t}_{\text{гран}}$  - оценка математического ожидания, к которому приближается время локализации, с;  $\bar{t}_1$  - оценка математического ожидания времени локализации в первой попытке, с;  $\lambda$  - параметр экспоненциального распределения.



**Рис. 1 – Залежність часу локалізації ЧС методом реконденсації від рівня підготовленості спасателів**

Крім результатів імітаційного моделювання на рис.1 приведені також результати фізичного моделювання локалізації методом реконденсації, отримані після  $n$  тренувальних спроб у виконанні окремих операцій, що складають розглядаваний процес [2]. Наявність натуральних результатів дозволяє порівняти оцінки, отримані шляхом імітаційного моделювання, з оцінками, які були отримані шляхом фізичного моделювання. Для того щоб можна було порівняти результати, що стосуються різного рівня  $n$  підготовленості персоналу та різного оснащення спасателів (в КСИЗ першого типу та в КСИЗ з фільтруючим противогоздом), попередньо була виконана їх норміровка

$$x_{КСИЗ1(ФП)}(n) = \frac{t_{КСИЗ1(ФП)}(n) - t_{\min КСИЗ1(ФП)}(n)}{t_{\max КСИЗ1(ФП)}(n) - t_{\min КСИЗ1(ФП)}(n)}, \quad (2)$$

де  $t_{КСИЗ1(ФП)}(n)$  – оцінка часу виконання розглядаваного процесу, отримана в результаті натурального або імітаційного експерименту, с;  $t_{\max КСИЗ1(ФП)}(n)$  – максимальна оцінка часу виконання розглядаваного процесу, отримана в результаті

имитационного эксперимента, с;  $t_{\min_{КСИЗ1(ФП)}}(n)$  – минимальная оценка времени выполнения рассматриваемого процесса, полученная в результате имитационного эксперимента, с.

После преобразования (2) кодированная оценка математического ожидания времени локализации по результатам имитационного моделирования равна  $\bar{x}(им) = 0,5$ , а кодированная оценка среднеквадратичного отклонения времени локализации по результатам имитационного моделирования, учитывая [1], –  $G_x(им) \approx 0,167$ . Кодированные оценки времени локализации по результатам натуральных экспериментов  $x_{нат}$  приведены в табл.2.

**Таблица 2 – Экспериментальные (натурные и имитационные) и кодированные оценки времени локализации очага ЧС методом реконденсации**

Эксперимент	$t_{нат}, с$	$x_{нат}$	$t_{\max_{им}}, с$	$t_{\min_{им}}, с$	$\bar{t}_{им}, с$
1	990	0,367	1625,80	620,61	1123, 21
2	560	0,440	782,52	385,34	583,93
3	635	0,628	782,52	385,34	583,93
4	540	0,532	701,85	356,10	528,97
5	560	0,590	701,85	356,10	528,97
6	535	0,559	655,88	369,21	517,55
7	900	0,463	1291,58	561,83	926,71
8	470	0,427	631,00	350,12	490,56
9	540	0,676	631,00	350,12	490,56
10	485	0,592	580,54	346,16	463,35
11	475	0,585	565,58	347,28	456,43
12	465	0,539	565,58	347,28	456,43

Для проверки эмпирического распределения  $\{x_{нат}\}$  на нормальность вначале были получены оценки его математического ожидания  $\bar{x}(нат) \approx 0,533$  и среднеквадратического отклонения  $G_x(нат) \approx 0,091$ . Поскольку все отклонения от среднего значения меньше  $\pm 3 \cdot G_x(нат)$

$$\left\langle \begin{array}{l} x_{\min_{нат}} = 0,367 > 0,259 \\ x_{\max_{нат}} = 0,676 < 0,808 \end{array} \right\rangle, \quad (3)$$

$2/3$  всех отклонений меньше  $\pm G_x(\text{нат}) \approx 0,091$ , и половина всех отклонений меньше  $\pm 0,657 \cdot G_x(\text{нат}) \approx 0,060$ , то можно [8] считать, что эмпирическое распределение  $\{x_{\text{нат}}\}$  является нормальным.

Это позволяет проверить, значимо ли различаются средние значения, полученные по двум независимым выборкам (по результатам имитационного  $\bar{x}(\text{им})$  моделирования на ЭВМ и натурального  $\bar{x}(\text{нат})$  эксперимента), используя  $t$ -критерий Стьюдента. В этом случае рассматривается гипотеза

$$H_0 : \bar{x}(\text{нат}) = \bar{x}(\text{им}) \quad (4)$$

и ее альтернатива

$$H_1 : \bar{x}(\text{нат}) \neq \bar{x}(\text{им}), \quad (5)$$

которая доказывает простое различие средних значений.

С целью выбора конкретной методики расчета  $t$ -критерия [8] вначале была проверена гипотеза о равенстве дисперсий имитационного и натурального экспериментов (гипотеза  $H_0 : G_x^2(\text{нат}) = G_x^2(\text{им})$  и ее альтернатива  $H_1 : G_x^2(\text{нат}) \neq G_x^2(\text{им})$ ). Поскольку рассчитанные значения  $F$ -критерия больше табличного

$$F_{\text{набл}} = \frac{G_x^2(\text{им})}{G_x^2(\text{нат})} = 3,32 > F_{\text{табл}} = 1,94, \quad (6)$$

полученного при уровне значимости  $\alpha=0,05$  и числе степеней свободы

$$\nu_{\text{им}} = n_{\text{им}} - 1 = 699, \quad \nu_{\text{нат}} = n_{\text{нат}} - 1 = 11, \quad (7)$$

где  $n_{\text{им}} = 700$  – количество имитационных экспериментов на ЭВМ,  $n_{\text{нат}} = 12$  – количество натуральных экспериментов, принимается гипотеза  $H_1$ , т.е. дисперсии отличаются значимо.

Исходя из этого, стандартная ошибка разности  $S_{\text{им-нат}}$  и число степеней свободы  $\nu$  с учетом того, что выборки отличаются, при вычислении  $t$ -критерия рассчитываются [8] следующим образом

$$S_{им-нат} = \sqrt{\frac{G_{им}^2}{n_{им}} + \frac{G_{нат}^2}{n_{нат}}} = 0,027, \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{G_{им}^2}{n_{им}} + \frac{G_{нат}^2}{n_{нат}}\right)^2}{\frac{G_{им}^4}{n_{им}^2 \cdot (n_{им} - 1)} + \frac{G_{нат}^4}{n_{нат}^2 \cdot (n_{нат} - 1)}} = 12,26. \quad (5)$$

В результате

$$t_{набл} = \frac{|\bar{x}_{нат} - \bar{x}_{им}|}{S_{им-нат}} = 1,23 < t_{табл}(\alpha = 0,05) = 1,78, \quad (6)$$

т.е. значение  $t$ -критерия  $t_{набл}$  меньше критического значения  $t$ -критерия  $t_{табл}$  при заданном уровне значимости  $\alpha=0,05$  и числе степеней свободы  $\nu$ . Это говорит о том, что на уровне значимости  $\alpha$  (вероятность ошибки меньше 5%) можно принять гипотезу  $H_0$ . Следовательно, различие математических ожиданий времени локализации чрезвычайной ситуации методом реконденсации, полученных путем имитационного на ЭВМ и физического моделирования, статистически незначимо.

#### **Выводы:**

- Время локализации типовой чрезвычайной ситуации спасателями в зависимости от количества тренировочных попыток меняется по экспоненциальному закону независимо от того, были ли они одеты в КСИЗ 1 типа или в изолирующий костюм, оснащенный фильтрующим противогазом.

- Переход к представлению полученных экспериментальных (имитационных и натуральных) данных в кодированных переменных позволяет сравнить имитационные и натурные результаты, несмотря на существенную разность в их количестве.

- Для разработки практических рекомендаций, связанных с работой в комплексе средств индивидуальной защиты при ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом опасных химических веществ, могут использоваться результаты имитационного моделирования, поскольку они отличаются от результатов физического моделирования статистически незначимо.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по ликвидации последствий радиационных и химических аварий / [Владимиров В.А., Лукьянченков А.Г., Павлов К.Н. и др.]; под ред. В.А. Владимирова. – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС, 2004. – 340 с.
2. 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.
3. Системный анализ деятельности Государственной противопожарной службы. Учебник / Брушлинский Н.Н.– М.: МИПБ МВД России, 1998. – 255 с.
4. Абрамов Ю.А. Имитационная оценка деятельности боевых расчетов пожарных автомобилей / Ю.А. Абрамов, В.М. Стрелец, В.Н. Чучковский // Эргономика на автомобильном транспорте. – Харьков, ХГАДТУ, 1997. – С. 92-95
5. Попович П.Р. Эргономическое обеспечение деятельности космонавтов / П.Р. Попович, А.И. Губинский, Г.М. Колесников – М.: Машиностроение, 1985.- 272 с.
6. Зигель А. Модели группового поведения в системе "человек-машина" / А. Зигель, Дж. Вольф – М.: Мир, 1976. - 356 с.
7. Стрелець В.М. Імітаційна оцінка ефективності пожежогасіння на станціях метрополітену / В.М. Стрелець, П.Ю. Бородич // Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб.– К.: Техніка, 2004. – Вип. 55. - С. 229-239.  
nuczu.edu.ua

Стрелець В.М., Тригуб В.В., Васильев М.В.

**Імітаційна оцінка локалізації викиду небезпечної хімічної речовини методом реконденсації розрахунками різного рівня підготовленості**

Показано, що час локалізації типової надзвичайної ситуації рятувальниками в залежності від рівня підготовленості змінюється за експоненціальним законом. При цьому відмінність математичних очікувань часу локалізації надзвичайної ситуації, отриманих шляхом імітаційного на ЕОМ і фізичного моделювання, статистично незначуща.

**Ключові слова:** імітаційна оцінка, локалізація надзвичайної ситуації, засоби захисту, підготовленість, рятувальники



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

### **Comparative analysis of patterns of rescuers in custom-tailored means of protecting the first and second type**

It is shown that the time localization of the type of emergency rescue workers, depending on the level of preparedness varies exponentially. At the same time, the difference of the expectations of localization of an emergency, obtained by a computer simulation and physical modeling, not statistically significant.

**Key words:** simulation evaluation, the localization of an emergency, protection, preparedness, rescue

**УДК 666. 84**

*Дейнека В.В., канд. техн. наук, ст. преп., НУГЗУ*

### **СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ РАДИАЦИОННОГО ФОНА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ РАДИАЦИОННООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ**

(представлено д-ром техн. наук Комяк В.М.)

Строительство сооружений, зданий, инженерных сетей и транспортных коммуникаций с заданными уровнями безопасности и надежности от негативного воздействия радиации диктует необходимость разработки вяжущих материалов со специальными свойствами, которые не обеспечиваются применением цементов общестроительного назначения. Проблема разработки средств защиты от радиации очень актуальна в наше время. С точки зрения обеспечения безопасности окружающей среды, населения, территории и объектов от выбросов радиоактивных веществ, наиболее интересны для изучения и внедрения цементы на основе четырехкомпонентной системы  $\text{CaO} - \text{BaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , содержащие, кроме ферритов и силикатов кальция, ферриты бария, которые по скорости нарастания прочности и конечной ее величины могут конкурировать со специальными конструктивными материалами. Применение этих цементов обеспечивает изделиям повышенный удельный вес, более высокий коэффициент массового поглощения гамма-излучений, повышенную стойкость к агрессивному действию сульфатной коррозии.

**Ключевые слова:** жесткое радиационное излучение, вяжущие материалы, сульфатная коррозия

**Постановка проблемы.** Постоянный технический прогресс связан с ростом числа объектов повышенной опасности, к одним из

---

Снижение уровня радиационного фона в рабочей зоне радиационноопасных объектов