

# МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВАРИЙНОЙ ЭВАКУАЦИЕЙ НА ОБЪЕКТАХ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ

**А.В. Матвеев, кандидат технических наук, доцент;**

**М.В. Иванов; В.Ю. Писков.**

**Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.**

**Д.Ю. Минкин.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Разработана стохастическая модель системы управления аварийной эвакуацией с высоты в случае пожара. Получены аналитические закономерности, позволяющие оценивать влияние использования спасательных средств эвакуации с высоты на величину индивидуального пожарного риска в здании.

*Ключевые слова:* стохастическая модель, пожарная безопасность, риск, эвакуация, спасательные средства, системный анализ

## THE MODEL OF THE SYSTEM OF MANAGEMENT OF EMERGENCY EVACUATION ON THE OBJECTS WITH THE MASSIVE PRESENCE OF PEOPLE

A. V. Matveev; M. V. Ivanov; V. Y. Piskov.

Saint-Petersburg State Technical University.

D. Y. Minkin. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

In this article authors developed the stochastic model of the system of management of emergency evacuation from a height in the case of fire. There were received analytical laws which allow to assess the influence of exploitation of rescue equipment of evacuation from a height on individual fire risk in the building.

*Key words:* stochastic model, fire safety, risk, evacuation, rescue equipment, systems analysis

В последнее время в целом ряде регионов России зарегистрировано увеличение числа пожаров, при которых отмечается большое количество погибших и травмированных людей [1].

Мир все чаще становится свидетелем того, как при пожарах в зданиях люди, будучи отрезанными от штатных путей эвакуации, вынуждены, спасаясь от огня и дыма, в отчаянии выбрасываться из окон верхних этажей.

Многим памятливы фатальные последствия пожаров гостиницы «Россия» в Москве, здания УВД в г. Самаре, московских студенческих общежитий, в детских домах Якутии и Дагестана, а также последние трагические события в г. Владивостоке, наркологической клиники в Москве, унесшие значительное количество человеческих жизней.

Общая тенденция увеличения показателей гибели и травмирования людей на пожарах в Российской Федерации обуславливает необходимость внедрения новых средств и способов обеспечения пожарной безопасности, направленных на сохранение жизни и здоровья людей при возникновении пожара в зданиях.

Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является применение различных спасательных средств – индивидуальных средств защиты органов дыхания и зрения от опасных факторов пожара, а также специальных средств аварийной эвакуации из горящего здания.

Актуальность применения средств аварийной эвакуации при пожарах на объектах с массовым пребыванием людей обусловлена тем фактом, что именно на данных объектах возможно скопление людей к увеличению времени эвакуации. В результате этого увеличивается вероятность воздействия воздействию опасных факторов пожара на людей. При пожарах в производственных помещениях с массовым пребыванием людей возможен наибольший социальный и материальный ущерб.

Рассмотрим процесс аварийной эвакуации людей, который осуществляется за счет функционирования системы управления аварийной эвакуацией (СУАЭ) в случае возникновения пожара в здании.

Исследование эффективности любой системы, в том числе и СУАЭ, необходимо проводить на основе методологии системного анализа [2–4] с позиции структурного построения, раскрывающего понятия «деятельность» и «ресурсное обеспечение». Ресурсное обеспечение СУАЭ включает в себя совокупность спасательных средств, установленных в местах эвакуационных выходов из здания. Под «деятельностью» будет пониматься процесс эвакуации людей в зону безопасности.

Значение СУАЭ в системе обеспечения пожарной безопасности по существу сводится к определению влияния СУАЭ на уровень индивидуального пожарного риска в здании и обоснованию ее ресурсов. При этом конечной целью является такое формирование структуры СУАЭ, при которой обеспечивались бы требуемые значения эффективности ее функционирования, то есть требуемые значения вероятности эвакуации людей из здания.

Применение методов декомпозиции и агрегирования [5] (рис. 1) позволило представить процесс аварийной эвакуации в виде трех базовых компонентов (функций):

- $\lambda_n$  – интенсивность потока прибытия людей к аварийному выходу, из которого осуществляется эвакуация при помощи специальных спасательных средств;
- $\Delta t_n$  – среднее время, затрачиваемое на подготовку человека к эвакуации;
- $\Delta t_s$  – среднее время перемещения человека в зону безопасности, где на него не будут воздействовать опасные факторы пожара.

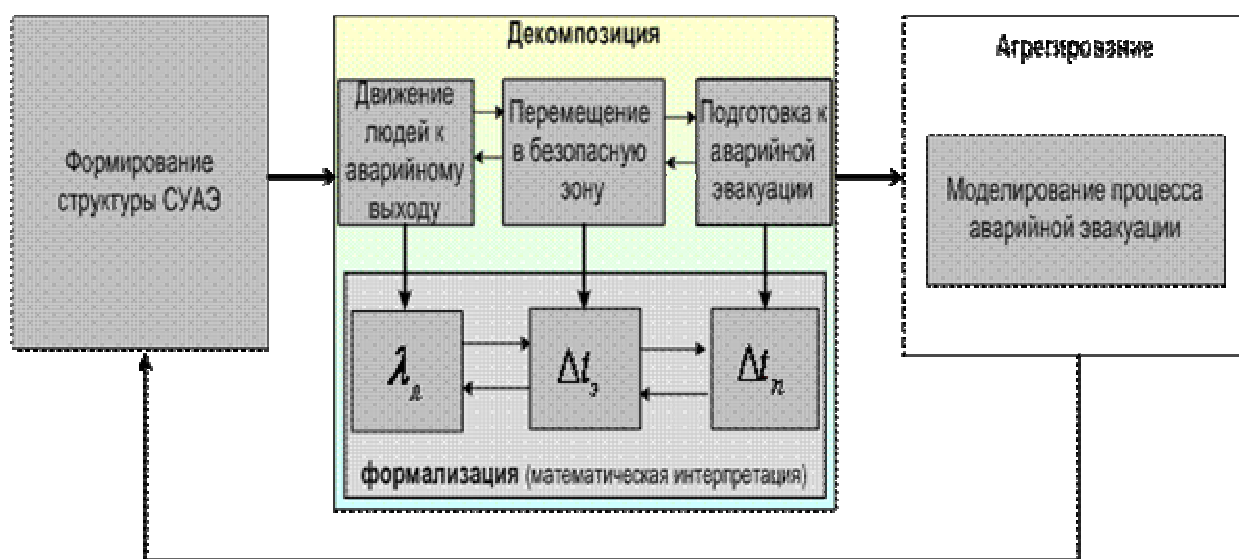


Рис. 1. Структурная схема процесса формирования СУАЭ

Таким образом, формируя соответствующую структуру СУАЭ и задавая функции соответствующих компонентов, можно будет определить значение вероятности аварийной эвакуации людей  $P_{Э,С}$ , а также ее влияние на величину индивидуального пожарного риска в здании. В качестве функций, помимо интенсивности потока прибытия людей к аварийному выходу  $\lambda_n$  рассмотрены:

– интенсивность подготовки людей к аварийной эвакуации при помощи спасательных средств

$$\mu_1 = \frac{1}{\Delta t_n},$$

где  $\Delta t_n = \Delta t_u + \Delta t_m$ ;  $\Delta t_u$  – среднее время, затрачиваемое на идентификацию очередного эвакуируемого (связано в первую очередь с психофизиологическими аспектами поведения людей в процессе эвакуации);  $\Delta t_m$  – среднее время, необходимое на подготовку технического средства к эвакуации следующего человека (в случае необходимости);

– интенсивность перемещения людей в зону безопасности на (в) спасательном средстве

$$\mu_2 = \frac{1}{\Delta t_3}.$$

Использование при стохастическом моделировании в качестве исходных данных распределений вероятностей времени на подготовку к эвакуации и времени спуска позволяет отразить неоднородность введенных функций как по уровню мобильных возможностей разных людей в потоке, так и по уровню их эмоциональных реакций на обстоятельства, ситуации, в которых они оказались. Это позволяет наиболее полно оценить возможность эвакуации людей независимо от их возраста и физического состояния.

В общем случае предполагается, что время подготовки человека к эвакуации распределено по закону Эрланга  $k$ -го порядка с параметром  $\mu_1(t)$ , а время спуска человека в безопасную зону распределено по закону Эрланга  $l$ -го порядка с параметром  $\mu_2(t)$ ;

$$f_n(t) = \frac{\mu_1'(\mu_1't)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\mu_1'(t)t} (t > 0),$$

$$f_3(t) = \frac{\mu_2'(\mu_2't)^{l-1}}{(l-1)!} e^{-\mu_2'(t)t} (t > 0).$$

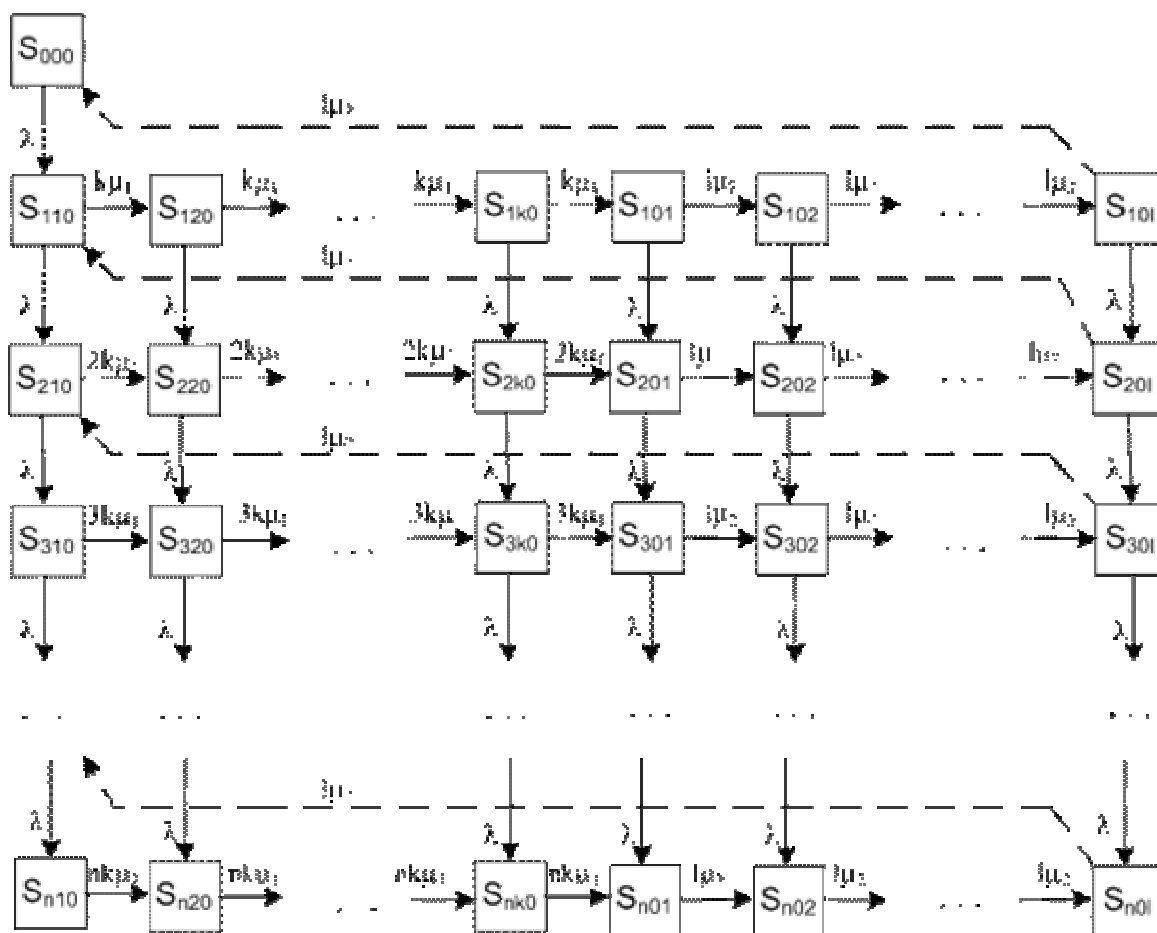


Рис. 2. Граф состояний СУАЭ

Применяя метод псевдосостояния [6], построен граф состояний СУАЭ, представленный на рис. 2. Введены обозначения состояний  $S_{ijh}$ , где  $i$  – количество людей, находящихся у места аварийного выхода, где находится спасательное средство;  $i = \overline{1, n}$ ,  $j$  – подфазы процесса идентификации человека и его подготовка к эвакуации;  $j = \overline{1, k}$ ,  $h$  – подфазы процесса эвакуации людей,  $h = \overline{1, l}$ .

По теореме сложения математических ожиданий [6] имеем:

$$\mu_1'(t) = k \mu_1(t),$$

$$\mu_2'(t) = l \mu_2(t).$$

Таким образом, оказалось возможным сформировать систему однородных дифференциальных уравнений Колмогорова-Эрланга, описывающих данный процесс:

$$\left\{ \begin{array}{l}
dp_{000} / dt = -\lambda_n p_{000} + l\mu_2 p_{10l}; \\
dp_{i10} / dt = -(\lambda_n + ik\mu_1) p_{i10} + \lambda_n p_{i-1,10} + l\mu_2 p_{i+1,0l}, \quad i = \overline{1, n-1}; \\
dp_{n10} / dt = -nk\mu_1 p_{n10} + \lambda_n p_{n-1,10}; \\
dp_{1j0} / dt = -(\lambda_n + k\mu_1) p_{1j0} + k\mu_1 p_{1,j-1,0}, \quad j = \overline{2, k}; \\
dp_{ij0} / dt = -(\lambda_n + ik\mu_1) p_{ij0} + \lambda_n p_{i-1,j0} + ik\mu_1 p_{i,j-1,0}, \quad i = \overline{2, n-1}, \quad j = \overline{2, k}; \\
dp_{nj0} / dt = -nk\mu_1 p_{nj0} + \lambda_n p_{n-1,j0} + nk\mu_1 p_{n,j-1,0}, \quad j = \overline{2, k}; \\
dp_{101} / dt = -(\lambda_n + l\mu_2) p_{101} + k\mu_1 p_{1k0}; \\
dp_{i01} / dt = -(\lambda_n + l\mu_2) p_{i01} + \lambda_n p_{i-1,01} + ik\mu_1 p_{ik0}, \quad i = \overline{2, n-1}; \\
dp_{n01} / dt = -l\mu_2 p_{n01} + nk\mu_1 p_{nk0} + \lambda_n p_{n-1,01}; \\
dp_{10h} / dt = -(\lambda_n + l\mu_2) p_{10h} + l\mu_2 p_{10,h-1}, \quad h = \overline{2, l}; \\
dp_{i0h} / dt = -(\lambda_n + l\mu_2) p_{i0h} + \lambda_n p_{i-1,0h} + l\mu_2 p_{i0,h-1}, \quad i = \overline{2, n-1}, \quad h = \overline{2, l}; \\
dp_{n0h} / dt = -l\mu_2 p_{n0h} + \lambda_n p_{n-1,0h} + l\mu_2 p_{n0,h-1}, \quad h = \overline{2, l}.
\end{array} \right. \quad (1)$$

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (1) возможно в общем случае численными методами при заданных начальных условиях  $p_{000}(t_0) = 1$ ;  $p_{ij0}(t_0) = p_{i0h}(t_0) = 0$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k}$ ,  $h = \overline{1, l}$ .

Непосредственно перемещение людей в область безопасности происходит с моменты нахождения системы в состояниях  $S_{i0h}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $h = \overline{1, l}$ . Таким образом, определена пропускная способность СУАЭ, отражающая среднее количество людей, перемещающихся в область безопасности в единицу времени:

$$\mu_3(t) = \mu_2(t) \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^l p_{i0h}(t). \quad (2)$$

Определение пропускной способности СУАЭ требует в общем виде решения системы  $n(k+l)+1$  дифференциальных уравнений (1), что при большом  $n$  является весьма трудоемкой задачей, даже с использованием ЭВМ. Однако, возможно найти решение в установившемся режиме при предположении  $\lambda_n(t) = \text{const}$ , путем приведения системы дифференциальных уравнений (1) к системе алгебраических уравнений и использования нормировочного условия

$$p_{000} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k p_{ij0} + \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^l p_{i0h} = 1.$$

Натурные наблюдения показывают, что размещение людей в потоке всегда имеет неравномерный и часто случайный характер [7]. Расстояние между идущими людьми постоянно меняется, возникают местные уплотнения, которые затем рассеиваются и

возникают снова. Эти изменения неустойчивы во времени. Данные факторы позволяют сделать вывод о нестационарности потока  $\lambda_{л}(t)$ .

В этом случае предлагается решать задачу в классе кусочно-постоянных функций. Суть решения заключается в формировании пары  $\{s, a\}$ , где  $s$  – разбиение множества  $T = (t_0, t_1, \dots, t_s)$ ;  $a: \lambda_{л}(t_k) = c_k \Rightarrow \mu_{э}(t_k)$ , где  $c_k = \text{const}$ .

Суть оператора  $a$ :

1. Решается система алгебраических уравнений, полученных из (1) при условии  $\lambda_{л}(t_k) = c_k$  и формируются  $p_{ijh}$  при  $t \in [t_k, t_{k+1}]$ ;

2. Вычисляется  $\mu_{э}(t)$  на основе выражения (2),  $t \in [t_k, t_{k+1}]$ .

3. Если  $t_k < t_s$ , то переход к п.1, иначе задача решена.

Вероятность аварийной эвакуации при использовании спасательного средства, таким образом, можно определить с помощью следующего выражения:

$$P_{э.с} = \frac{\int_0^{t_a} \mu_{э}(\tau) d\tau}{n},$$

где  $t_a$  – максимально возможное время аварийной эвакуации людей из здания;  $n$  – количество людей, не имеющих возможности покинуть здание по основным эвакуационным путям.

В случае использования  $z$  аварийных выходов и, соответственно,  $z$  спасательных средств вероятность  $P_{э.с}$  можно определить следующим образом:

$$P_{э.с} = 1 - (1 - P_{э.с_1}) \cdot (1 - P_{э.с_2}) \cdot \dots \cdot (1 - P_{э.с_z}),$$

где  $P_{э.с_i}$  – вероятность эвакуации из здания людей через  $i$ -й аварийный выход.

Используя разработанный инструмент, оказывается возможным решать две основные задачи (анализа и синтеза):

а) оценивать эффективность существующей СУАЭ, то есть определять вероятность эвакуации людей при использовании спасательных средств  $P_{э.с}$ , когда известны интенсивность движения эвакуирующихся людей, а также законы распределения и среднее время процессов подготовки к эвакуации и перемещения людей в безопасную зону при помощи спасательных средств, расчетное время, необходимое на эвакуацию;

б) проводить синтез СУАЭ, когда, наоборот, заданы требования к её характеристикам, то есть вероятность эвакуации людей при использовании спасательных средств  $P_{э.с}$ , известны параметры потока эвакуирующихся людей, время и законы распределения процессов выбора людей, их подготовки и эвакуации, а требуется определить соответствующие параметры СУАЭ, то есть количество и виды спасательных средств, которыми должен быть оснащен объект защиты в данных условиях обстановки.

## Литература

1. Динамика и анализ рисков гибели детей и взрослых при пожарах в РФ за 1991–2008 гг. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Клепко Е.А. [и др.]. // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2009. № 4. С. 21–26.

2. Ильичев А.В., Волков В.Д., Грущанский В.А. Эффективность проектируемых элементов сложных систем. М.: Высшая школа, 1982.

3. Матвеев А.В., Бурлов В.Г., Магулян Г.Г. Общий подход к моделированию систем безопасности // Научно-технические ведомости СПб гос. политехнического ун-та. Том 5. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. С. 73–77.

4. Матвеев А.В. Системное моделирование управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007.

5. Матвеев А.В., Иванов М.В. Критерий эффективности управления пожарным риском при использовании средств аварийной эвакуации // Научно-технические ведомости СПб гос. политехнического ун-та. Том 6. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. С. 81–85.

6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Кнорус, 2011. 448 с.

7. Холщевников В.В., Самошин Д.А., Исаевич И.И. Натурные наблюдения людских потоков: учеб. пособ. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. 191 с.