Д.В. Тараканов
(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России;
e-mail: den-pgs@yandex.ru)

МНОГОАГЕНТНАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ В СОЦИАЛЬНЫХ ЗДАНИЯХ

Разработана многоагентная система моделирования действий оперативных подразделений пожарной охраны при тушении пожаров в социальных зданиях.
Ключевые слова: многоагентная система, пожар, социальное здание.

D.V. Tarakanov

MULTI-AGENT SYSTEM FOR SIMULATION EXTINGUISHING OF FIRES IN SOCIAL BUILDINGS

The multi-agent system to simulate the action of operational units of fire protection during fire extinguishing in social buildings was developed.
Key words: multi-agent system, fire, social building.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 29 июля 2016 г.

Введение

Современное состояние информационных технологий и результаты их внедрения в борьбу с пожарами диктует необходимость разработки методического обеспечения для повышения эффективности тушения пожаров [1]. Стратегия информатизации МЧС России предусматривает создание моделей мониторинга безопасности на ***социальных*** объектах. Одной из важных задач создания таких моделей является совершенствование систем управления действиями по тушению пожаров и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Стоит отметить, что, с точки зрения тактики тушения, пожары на ***социальных*** объектах являются сложными и предусматривают высылку сил и средств пожарно-спасательного гарнизона по повышенному номеру вызова. Для совершенствования управления при пожарах на ***социальных*** объектах применяется программное обеспечение, с использованием которого разрабатываются, корректируются и отрабатываются планы и карточки тушения пожаров [2]. Программное обеспечение и компьютерные системы моделирования действий по тушению пожаров ***социальных*** объектов необходимы и для совершенствования подготовки специалистов пожарной безопасности [3-5].

В данной статье анализируются теоретические модели, объединённые в многоагентную систему для моделирования действий по тушению пожаров в социальных зданиях. Выбор агентного подхода к моделированию обусловлен практикой его применения при решения аналогичных задач для объектов химической промышленности [6, 7].

1. Элементы и структура многоагентной системы

Многоагентная система (МАС) включает в себя когнитивных и реактивных агентов и среду их взаимодействия между собой и пожаром в здании. ***Реактивные агенты*** – участники тушения пожара (газодымозащитники), ***когнитивные агенты*** это руководитель тушения пожара и постовой на посту безопасности. ***Внутренняя среда здания*** – это нагретая пожаром газовая среда внутри здания, характеризующаяся следующими параметрами: температура газовой среды, дальность видимости в дыму.

Система взаимодействия агентов между собой: когнитивные агенты принимают решения о спасании людей и ликвидация очага пожара посредством подачи огнетушащих веществ с использованием основной пожарной техники и решения о подаче команды на выход из здания на основе данных о динамике параметров, характеризующих условия работы пожарных в специальных дыхательных аппаратах.

Система взаимодействия агентов с пожаром: параметры внутренней среды здания при пожаре оказывают влияние на возможность, скорость и условия тепловой нагрузки при движении агентов к очагу пожара в здании. В свою очередь, посредством информации о состоянии внутренней среды пожара в здании когнитивные агенты "понимают" место расположения очага пожара и производят выбор маршрутов движения для ликвидации пожара.

В соответствии с общепринятыми для агентного моделирования правилами агенты в МАС наделены пятью способностями:

1. ***Реактивность*** – способность влияния состояния внутри среды пожара в здании на условия и скорость решения задач агентами.

2. ***Активность*** – способность производить выбор маршрута реализации работ с учётом необходимости минимизации времени их выполнения на основе информации от системы мониторинга состояния пожара в здании.

3. ***Коммуникативность*** – способность передачи информации о динамике параметров работы в дыхательных аппаратах от реактивных агентов когнитивным агентам для определения безопасного времени пребывания реактивных агентов в здании.

4. ***Когнитивность*** – способность определять значения критического времени нахождения реактивных агентов внутри здания и принимать решение о подаче команды на выход из здания или координации их действий.

5. ***Автономность*** – способность агентов функционировать в системе без участия пользователя.

Все задачи принятия решений в МАС приведены к модели многокритериального выбора с заранее заданными значениями количественных критериев и их предпочтениями. При возникновении неоднозначности выбора в многокритериальной модели, в силу возможной тождественности маршрутов движения, окончательный выбор производится случайным образом.

Для реализации МАС в виде программного средства, по аналогии с компьютерной системой моделирования действий по тушению пожаров в зданиях [5], выбрана модульная структура. Это позволяет отдельные модели, описывающие процессы в МАС, реализовать в виде модулей для адаптации системы под конкретные задачи моделирования посредством гибкой настройки.

Общая концептуальная схема МАС представлена на рис. 1.

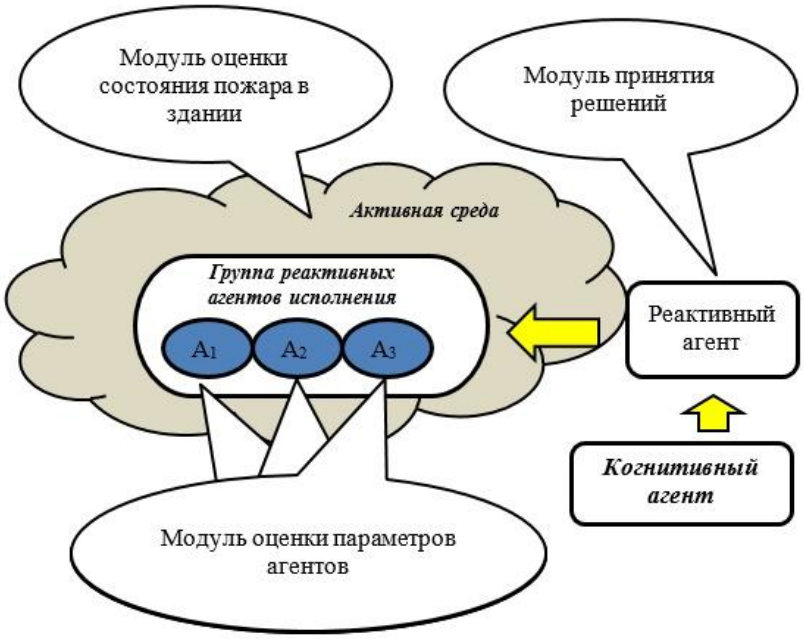

Рис. 1. Структурная схема многоагентной модели

Таким образом, в МАС когнитивные агенты при управлении наделены двумя функциями принятия решений: выбор маршрута к месту проведения работ внутри здания; подача команды на выход из здания при достижении критического времени пребывания в здании реактивных агентов. Реактивные агенты, в свою очередь, решают задачу ликвидации горения.

2. Модуль принятия решений

При принятии решений о выборе маршрута движения к очагу пожара в здании когнитивным агентам необходимо минимизировать время движения реактивных агентов. Исходя из условий моделирования на время движения влияют факторы тепловой нагрузки и условий видимости. Для количественной оценки степени влияния данных факторов в МАС продолжительность движения реактивных агентов определяется по формуле:

$$\tau = \frac{L}{VK_1K_2}, \text{ мин.}, \qquad (2.1)$$

где L – протяжённость маршрута движения, *м*;

V – максимальная скорость движения агентов, *м·мин.*$^{-1}$;

K_1 и K_2 – коэффициенты снижения скорости в зависимости от тепловой нагрузки и условий видимости на маршрутах движения.

Значения коэффициентов K_1 и K_2 рассчитываются по формуле

$$K_i = C_i \cdot B_i^{\gamma_i},\ i = 1, 2, \tag{2.2}$$

где B_i – бальная шкала зависимости скорости движения по участку маршрута 1 - для условий тепловой нагрузки и 2 – для условий видимости;

C_1 = 0,5; γ_1 = 0,34; C_2 = 0,6 и γ_1 = 0,27 – значения констант модели, полученные путём теоретического обобщения наблюдений за особенностями движения газодымозащитников в здании при пожаре.

По аналогии с [7], при формализованном описании процессов принятия решений с использованием многокритериальной модели возможны две постановки задачи: ранжирование вариантов и выбор наиболее предпочтительного варианта; теоретико-множественный анализ вариантов – построение структуры вариантов решений.

В МАС функция ранжирования маршрутов движения является мультипликативной и записывается следующим образом:

$$\Phi(x) = \prod_{i=1}^{3} f_i^{\omega_i}(x), \tag{2.6}$$

где f_1 – "тепловая нагрузка": $f_1(x) = B_1$, B_1 = {1, …, 6}, $f_1(x) \to \max$;

f_2 – "условия видимости": $f_2(x) = B_2$, B_2 = {1, …, 6}, $f_2(x) \to \max$;

f_3 – "протяжённость маршрута" $f_3(x) = \dfrac{1}{L}$, $L = \{1,\ldots,30\}$, $f_3(x) \to \max$;

ω_i – коэффициенты важности критериев, $\sum_{i=1}^{3} \omega_i = 1$.

Коэффициенты важности рассчитываются на основе констант модели (2.2) по формуле:

$$\omega_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{k=1,2,3} \gamma_k}. \tag{2.7}$$

Результаты расчёта: $\omega_1 = 0{,}17$; $\omega_2 = 0{,}21$; $\omega_3 = 0{,}62$, $\sum_{i=1}^{3} \omega_i = 1$.

Для построения структуры выбранных вариантов в МАС используется принцип оптимальности по Парето. Для реализации теоретико-множественного анализа вариантов решений необходимо построить структуру, состоящую из трёх множеств взаимосвязанных последовательными включениями:

$$C(X) \subset P_G(X) \subset P_F(X) \subset X, \tag{2.8}$$

где X – исходное множество вариантов в многокритериальной модели принятия решений; $C(X)$ – множество выбранных вариантов;

$P_F(X)$ – множество парето-оптимальных вариантов, построенное на множестве X с использованием исходного векторного критерия $F = \{f_1, f_2, \ldots, f_m\}$;

$P_G(X)$ – множество парето-оптимальных вариантов, построенное на множестве X относительно векторных оценок, полученных с использованием нового векторного критерия $G = \{g_1, g_2, \ldots, g_m\}$, составленного из компоненты f_3, векторного критерия F, а также новых компонент g_{31} и g_{32}, рассчитанных по формуле

$$g_{3j}(x) = f_3(x)^{\theta_j} \cdot f_j(x)^{1-\theta_j},\ j = 1, 2, \tag{2.9}$$

где θ_j коэффициенты относительной важности критериев.

Коэффициенты модели θ_j рассчитываются на основе коэффициентов важности ω_j по формуле $\theta_j = 1 - 3\omega_j$ и равны соответственно $\theta_1 = 0{,}51$, $\theta_1 = 0{,}37$.

3. Модуль оценки состояния пожара в здании

Для принятия решений когнитивными агентами на основе предложенных многокритериальных моделей необходимо иметь представление о динамике температуры пожара и условий видимости в здании. Для получения такой информации в МАС используется система мониторинга состояний пожара в здании, реальным прообразом которой является система адресной пожарной сигнализации. Поэтому оценка динамики состояний пожара рассматривается для каждой зоны контроля системы мониторинга в отдельности. На основе обобщения моделей [8-10] реализован метод моделирования, теоретической основой которого является теория клеточных автоматов.

В соответствии с данной теорией каждая зона контроля системы мониторинга представляется в виде клетки различной размерности 3, 4 и 6 с конечным числом состояний:

$$\{S_0, S_1, \ldots, S_k\}. \tag{3.1}$$

Смена состояний пожара в зоне контроля S_k наблюдается в дискретный момент времени τ_i, если результат измерения параметра пожара p_k принадлежит интервалу $p_k \in [p^{i-1}, p^i)$.

Для описания взаимодействия между зонами используется ориентированный граф. Из всей совокупности зон контроля можно выделить основную зону контроля, в которую продукты горения поступают непосредственно от очага пожара (рис. 2*а*). Смежная зона контроля – это зона, в которую продукты горения приходят из других зон (рис. 2*б*). Визуализация ориентированного графа представлена на рис. 2.

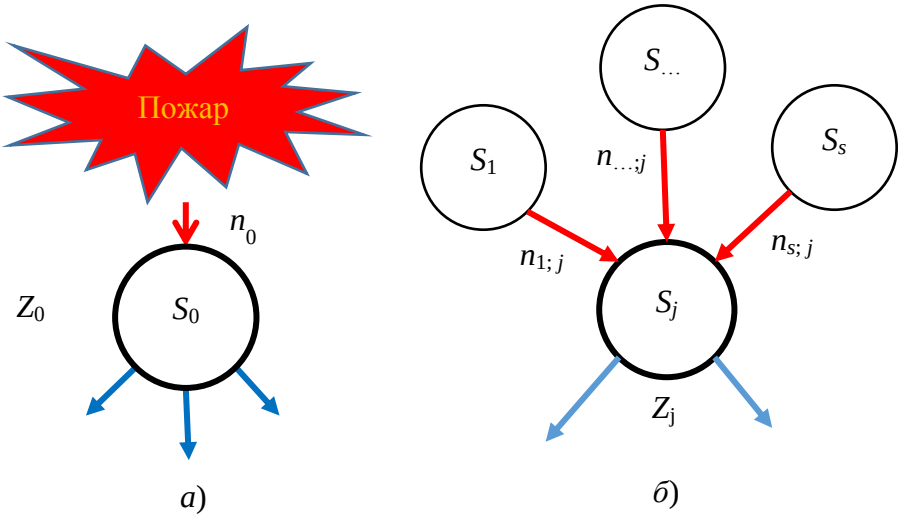

Рис. 2. Элементы орграфа клеточного автомата:
а – основная клетка; *б* – соседняя клетка

Изменение параметра p в зонах контроля определяется по формулам:

- основная зона:

$$\Delta p_0(\tau) = p_0(\tau) - p^0 = p^*[1 - \exp(-Z_0(\tau))]; \qquad (3.2)$$

- смежная зона контроля:

$$\Delta p_j(\tau) = p_j(\tau) - p^0 = \frac{\sum\limits_{i=1,\dots,s} n_{i;j}\, p_i(\tau)}{\sum\limits_{i=1,\dots,s} n_{i;j}} \left[1 - \exp\left(-Z_j(\tau) \cdot \sum_{i=1,\dots,s} n_{i;j}\right)\right]. \qquad (3.3)$$

где $p(\tau)$ – безразмерный обобщённый параметр пожара;

p^0 – начальное значение безразмерного параметра пожара;

p^* – пороговое значение безразмерного параметра пожара;

$n_{i;j}$ – коэффициент обмена между зонами контроля с номерами i и j;

s – количество соседних зон;

Z_j – интенсивность параметра пожара в зоне контроля с номером j.

Для моделирования температуры и видимости в здании на основе данного подхода используются следующие преобразования для функции p:

- при моделировании температуры (T, K) в зонах контроля:

$$p = \beta,\ p^0 = \beta^0 = 1,\ p^* = \beta^* = \frac{1}{a}\ (a = 4),\ \frac{\beta}{\beta^0} = \frac{T^0}{T} \Rightarrow T = \frac{T^0}{\beta}. \qquad (3.4)$$

- при моделировании видимости (Ω, *м*) в зонах контроля:

$$p = \mu,\ p^0 = \mu^0 = 0,\ p^* = \mu^* = \frac{\rho^0 D}{a},\ \Omega = \frac{2{,}38}{\mu}. \qquad (3.5)$$

Математические зависимости реализованы в МАС с использованием циклического алгоритма, позволяющего получить значения параметров пожара в каждой зоне контроля системы мониторинга для каждого дискретного момента времени. Для этого в МАС разрабатывается сетка клеточного автомата, при этом виды клеток с различной размерностью хранятся в базе данных. Извлекая из базы данных заранее заготовленные клетки, структура клеточного автомата строится автоматически. По построенной структуре клеточного автомата формируется ориентированный граф связей и состояний пожара. После чего по формулам (3.2) и (3.3) рассчитываются значения зависимостей, оценивающих динамику безразмерного параметра пожара p. На основании значений данного параметра с использованием зависимостей пересчёта значений в размерные значения температуры и видимости по формулам (3.4) и (3.5). Затем запускается алгоритм расчёта: на момент времени τ последовательно определяем значение параметра пожара для клетки, начиная с номера 0 и до номера N, затем для момента времени $\tau + \Delta\tau$ по значениям параметров на момент времени τ определяем следующую группу значений и так далее.

4. Модуль оценки критического времени пребывания в здании

Для учёта ограничений по времени пребывания агентов в опасной среде здания в МАС используется вероятностная модель, предусматривающая декомпозицию моделируемого процесса на составляющие; реализация серии вычислительных опытов с использованием датчика равномерно распределённых случайных чисел; анализ результатов с вычислением интервала значений на основе заданной доверительной вероятности.

Элементами вероятностной модели являются счётные множества:

$$<\Delta, R, X>, \tag{4.1}$$

где Δ – множество дискретных моментов времени с элементами из кортежа $<\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_n>$;

R – множество равномерно распределённых случайных чисел, $<R_1, R_2, \ldots, R_n>$, $R_i \in [0, 1]$;

X – множество возможных значений скорости падения давления $<x_1, x_2, \ldots, x_m>$.

Для каждого элемента x_i множества X задаётся вероятность его "появления" p_i. Совокупность значений вероятностей $<p_1, p_2, \ldots, p_m>$ является законом распределения случайной величины X. В МАС используется восемь типовых законов распределения случайной дискретной величины X.

Для использования закона распределения при моделировании времени пребывания агентов в здании предложены следующие значения лёгочной вентиляции (табл. 1), размерность которой для удобства расчёта представлена в *бар·мин.*$^{-1}$.

Таблица 1

Значения лёгочной вентиляции для различных видов нагрузки

Виды нагрузки	Лёгочная вентиляция, *бар·мин.*$^{-1}$			
	x_1	x_2	x_3	x_4
Лёгкая	2	3	3	4
Средняя	5	6	6	7
Тяжёлая	8	9	10	11
Очень тяжёлая	12	13	14	15

Заключение

Моделирование действий по тушению пожаров в социальных зданиях с использованием МАС построено по принципу "успех – неудача". В случае "неудачи" необходимо на этапе подготовки к моделированию указывать либо большее количество сил и средств для решения задачи пожаротушения, либо улучшать значения показателей реагирования на пожар виртуального пожарно-спасательного гарнизона.

Отношение количества когнитивных и реактивных агентов, совокупность правил их взаимодействия определяют, что по общей классификации многоагентная система является интеллектуальной системой, в которой процессы управления реализуются по принципу "искусственная жизнь". Выбор модульной структуры построения МАС позволяет наращивать её возможности путём внедрения новых математических моделей и реализующих их программных модулей.

Литература

1. ***Теребнев В.В., Семенов А.О., Тараканов Д.В.*** Теоретические основы принятия решений при управлении силами и средствами на пожаре // Пожаровзрывобезопасность, 2012. Т. 21. № 10. С. 14-17.

2. ***Илеменов М.В.*** Комплекс программ для разработки электронных документов предварительного планирования тушения пожаров в зданиях // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 1 (59). С. 97-104.

3. ***Малый И.А., Потемкина О.В., Ермилов А.В.*** Методы развития профессионально значимых качеств у курсантов вуза МЧС России с применением программного обеспечения // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. № 1. 2016. С. 144-149.

4. ***Тараканов Д.В., Саттаров И.Ф.*** Компьютерная модель ликвидации пожаров для тактической подготовки пожарных // Технологии техносферной безопасности. Вып. 6 (58). 2014. С. 96-104. http://ipb.mos.ru/ttb.

5. ***Тараканов Д.В., Варламов Е.С., Илеменов М.В.*** Компьютерное моделирование процессов развития и тушения пожаров в зданиях // Технологии техносферной безопасности. 2014. Вып. 5 (57). С. 114-123. http://ipb.mos.ru/ttb.

6. ***Лабутин А.Н., Семенов А.О., Тараканов Д.В.*** Агентно-ориентированное моделирование системы управления подразделениями при ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах химической промышленности // Современные наукоёмкие технологии, региональное приложение. № 3. 2011. С. 94-99.

7. ***Семенов А.О., Тараканов Д.В., Лабутин А.Н.*** Методика многокритериальной оценки эффективности тушения пожаров на объектах химической промышленности // Современные наукоёмкие технологии, региональное приложение. № 3. 2012. С. 101-104.

8. ***Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Соловьев Р.А. и др.*** Математическая модель развития пожара в системе помещений // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 121-128.

9. ***Кошмаров Ю.А., Лапшин С.С., Тараканов Д.В.*** Динамика ОФП в помещении смежном с очагом пожара // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. № 1. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. С. 67-75.

10. ***Топольский Н.Г., Тараканов Д.В.*** Прогнозирование динамики пожара в здании по данным мониторинга температурных полей // Проблемы управления безопасностью сложных систем: труды XXII международной научной конференции. М., 2014. С. 252-254.