

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПОЖАРА

**Самарцев А. А.¹, Иващенко В. А.², Резчиков А. Ф.³,
Кушников В. А.⁴, Филимонюк Л. Ю.⁵,
Богомолов А. С.⁶**

*(ФГБУН Институт проблем точной механики
и управления РАН, Саратов)*

Рассматривается модель процесса эвакуации людей при пожаре в условиях ограниченного пространства, основанная на применении теории мультиагентных систем. Модель позволяет исследовать состояние и поведение людей (интеллектуальных агентов) при возникновении пожара в производственных помещениях, определить время их эвакуации из помещений. Предложенная модель может быть положена в основу определения оптимальных путей и разработки планов эвакуации людей при пожарах из производственных помещений.

Ключевые слова: мультиагентная модель, интеллектуальный агент, пожар, эвакуация людей из помещений.

¹ Андрей Алексеевич Самарцев, аспирант (samaand@yandex.ru).

² Владимир Андреевич Иващенко, доктор технических наук, ученый секретарь (iptmuran@san.ru).

³ Александр Федорович Резчиков, член-корреспондент РАН, научный руководитель ИПТМУ РАН (iptmuran@san.ru).

⁴ Вадим Алексеевич Кушников, доктор технических наук, директор ИПТМУ РАН (iptmuran@san.ru).

⁵ Леонид Юрьевич Филимонюк, кандидат технических наук, научный сотрудник (iptmuran@san.ru).

⁶ Алексей Сергеевич Богомолов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (alexbogomolov@ya.ru).

1. Введение

Проблема обеспечения безопасности людей при пожарах на промышленных предприятиях приобретает все большую актуальность. В последние годы число пожаров по России выросло до 240-300 тысяч в год, причём значительная часть их приходится на промышленный сектор. Такие пожары часто приводят к травмам и жертвам среди производственного персонала. Именно на пожары в производственных помещениях приходится наибольший ущерб [15].

При этом все большее значение приобретает прогнозирование пожарной опасности и принятие упреждающих решений по устранению пожароопасных ситуаций, возникающих на промышленных предприятиях [9-14].

В случае же возникновения пожара вероятность обеспечения безопасности людей на начальной стадии пожара в существенной степени определяется возможностью их эвакуации до наступления предельно допустимых значений опасных факторов (ГОСТ 12.1.004-91). Грамотно организованный процесс эвакуации позволяет минимизировать время эвакуации людей из помещений промышленного предприятия с целью сокращения периода отрицательного воздействия факторов пожара на здоровье эвакуируемых [5, 6]. Возможное время эвакуации не должно превышать продолжительность начальной стадии пожара, включающей переход возгорания (1-3 мин.) и рост зоны горения (5-6 мин.). Эти стадии пожара составляют 2 - 30 % от общей его продолжительности [3].

Во многих ситуациях эвакуация происходит стихийно. Это, наряду с прочим, в значительной степени обусловлено недостаточностью развития существующих организационно-технических и программных средств управления процессом эвакуации, необходимостью разработки адекватных моделей и алгоритмов поддержки принятия решений по обеспечению эффективной эвакуации людей при пожарах на промышленных предприятиях.

В случаях стихийной эвакуации людей из помещений каждый человек самостоятельно выбирает маршрут и по пути следования принимает решения, которые считает выгодными для достижения своих целей.

При этом на принятие решений человеком значительное влияние оказывают состояние и поведение других людей, окружающая среда – стены и другие препятствия, а также такие факторы, как паника [2], отказ систем оповещения, незнакомство с планом эвакуации, инстинкт самосохранения и др. Поэтому стихийная эвакуация имеет самостоятельное значение. К тому же исследование стихийной эвакуации позволяет максимально учесть поведение людей и выявить «узкие места», такие как максимальная интенсивность потока людей через выходы из помещений, места их максимального скопления, пропускная способность помещений и др., для организации оптимального управления процессом эвакуации [5].

В существующих публикациях весьма ограниченно учитывается динамика поведения людей при эвакуации, а также количественные изменения параметров движения людских потоков, вызванные столкновением людей между собой и с препятствиями. В связи с этим возникает необходимость в математическом исследовании процесса эвакуации для определения максимального скопления людей и наилучшей геометрии помещений, из которых происходит эвакуация, для принятия решений по сокращению ее продолжительности.

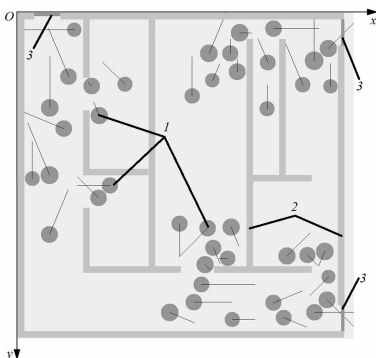
2. Постановка задачи

Опираясь на свойство фрактальности, не теряя общности рассуждений, рассмотрим помещение, план которого представлен на рис. 1. В плоскости xOy , параллельной полу помещения, заданы следующие компоненты (рис. 1):

1. Конечное множество стен, каждая из которых задана параметрами: (x, y) – координаты левого нижнего угла стены, x_w и y_w – ее длина и ширина. Будем считать, что стены перпендикулярны осям координат Ox и Oy , так как любую стену не перпен-

дикулярную осям координат можно представить как конечное множество стен перпендикулярных им.

2. Конечное множество выходов из помещений, заданных параметрами: (x, y) – координаты левого нижнего угла выхода; x_W и y_W – его ширина и длина, соответственно. После того, как человек попал в одну из зон выхода можно считать, что он успешно эвакуировался.



1 - люди, 2 - стены, 3 – выходы из помещения

Рис. 1. Геометрия помещения и распределение эвакуируемых людей в нем

3. Конечное множество эвакуируемых людей, которых будем рассматривать как множество их проекций на плоскость xOy в виде геометрических образов – кругов. В качестве координат данных людей примем центры этих кругов.

Параметры описания процесса эвакуации:

– радиус-вектор (координаты) окружности вокруг проекции человека на плоскость xOy – $\mathbf{x}(t)$;

– радиус проекции – r ;

– масса человека – m ;

– векторы его скорости – $\mathbf{v}(t)$ и ускорения – $\mathbf{a}(t)$ движения;

– максимально возможные скорость – v_{max} и ускорение – a_{max} движения человека.

Скорость и ускорение человека на начало эвакуации полагаются равными нулю (отсутствие движения).

Необходимо выполнить исследование процесса стихийной эвакуации людей из помещения для выработки мероприятий, направленных на управление этим процессом – оптимизации движения людей по эвакуационным путям.

3. Мультиагентная модель

3.1. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Процесс стихийной эвакуации – яркий пример децентрализованной системы управления, когда управление извне не осуществляется, и каждый эвакуируемый действует в соответствии со своими личными интересами, а глобальное поведение системы возникает как результат действия множества эвакуируемых. Описание данного процесса классическими методами – математического программирования, теории массового обслуживания, сетей Петри и др., как правило, представляет значительные трудности. Поэтому для его описания предлагается использовать мультиагентный подход, в основу которого положено понятие агента, представляющего собой элемент искусственного интеллекта.

Мультиагентные системы – это бурно развивающееся направление искусственного интеллекта, которое находится на стадии становления [7]. Это направление широко представлено в работах Новикова Д.А., Тарасова В.Б., Скобелева П.О., Зотова И.В., Timo Korhonen, Hugo Winter и ряда других известных отечественных и зарубежных ученых [1, 7, 8, 16, 17].

В мультиагентных моделях априори определяются состояния и характеристики агентов, а также правила их взаимодействия между собой.

В предлагаемой мультиагентной модели закон движения агентов определяется соотношениями:

$$(1) \quad \begin{aligned} x(t + \Delta t) &= x(t) + v(t)\Delta t; \\ v(t + \Delta t) &= v(t) + a(t)\Delta t. \end{aligned}$$

где Δt – шаг модельного времени.

Скорости агентов изменяются при столкновениях. Описание их физического взаимодействия между собой и препятствиями может быть представлено различными способами. Допустимо считать столкновения агентов частично упругими, что характерно при достаточно больших скоростях их движения, свойственных стихийной эвакуации. Такая идеализация уместна и потому, что действующие силы, возникающие при столкновении агентов, неизвестны [4]. При частично упругом ударе часть кинетической энергии переходит в тепловую или другие формы энергии, т.е. имеет место диссипация энергии.

Для описания таких столкновений вводится коэффициент восстановления $0 \leq \varepsilon \leq 1$, определяющий характер взаимодействия соударяющихся тел. При $\varepsilon = 1$ удар является абсолютно упругим, при $\varepsilon = 0$ – абсолютно неупругим, а при $0 < \varepsilon < 1$ – частично упругим.

Нормальные составляющие скорости движения к поверхности соударяющихся тел после удара при этом рассчитываются по формулам:

$$(2) \quad \begin{aligned} u_{1n} &= -\varepsilon v_{1n} + (1 + \varepsilon) \frac{m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n}}{m_1 + m_2}; \\ u_{2n} &= -\varepsilon v_{2n} + (1 + \varepsilon) \frac{m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n}}{m_1 + m_2}. \end{aligned}$$

Здесь v_{1n} и v_{2n} – нормальные проекции скоростей движения агентов к плоскости соударения до удара, u_{1n} и u_{2n} – нормальные проекции скоростей движения агентов к плоскости соударения после удара, m_1 и m_2 – массы сталкивающихся агентов. Тангенциальные проекции скоростей движения к плоскости соударения агентов при ударе не изменяются [4].

При столкновении агента со стеной проекция его скорости движения, параллельная стене, не изменяется, другая же проекция меняет знак на противоположный и уменьшает свое значение согласно коэффициенту ε . Например, при столкновении агента со стеной, параллельной оси Ox , его скорость движения пересчитывается по соотношениям $v_x = u_x; v_y = -\varepsilon u_y$,

где $v = (v_x, v_y)$, $u = (u_x, u_y)$ – скорости агента до столкновения со стеной и после, соответственно.

Определим направление вектора ускорения $a(t)$ для каждого агента при условии, что каждый из них стремится быстрее попасть к ближайшему выходу из помещения (рис. 1). Для этого введем понятие вектора оптимальной (с точки зрения агента) скорости движения $v_{opt}(t)$, приближающей его к выбранному выходу и позволяющей по возможности не сталкиваться с препятствиями – другими агентами и стенами.

Реальная скорость движения агента $v(t)$ может отличаться от оптимальной из-за его столкновений с другими агентами и стенами. Тогда можно считать, что агент движется с ускорением $a(t)$, модуль которого определяется, исходя из физиологических возможностей человека ($|a(t)| = a_{max}$), а направление движения совпадает с $v_{opt}(t) - v(t)$. Если $v_{opt}(t) = v(t)$, то агент движется без ускорения.

На рис. 2 приведена графическая интерпретация связи между параметрами описания процесса эвакуации.

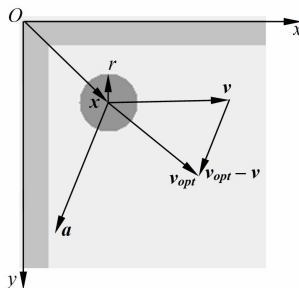


Рис. 2. Графическая интерпретация связи между параметрами описания процесса эвакуации

Модуль оптимальной скорости $v_{opt}(t)$ ограничен сверху физиологическими возможностями агента – скоростью v_{max} . Если впереди агента по маршруту следования нет препятствий – других агентов или стен, то $|v_{opt}(t)| = v_{max}$. Чтобы избежать столк-

новения с другими агентами по маршруту следования модуль $v_{opt}(t)$ может уменьшаться.

Пусть $\mathbf{e}$ – вектор, задающий направление к ближайшему выходу, l – расстояние от центра агента до ближайшего препятствия (человека или стены) в направлении движения под углом α к вектору $\mathbf{e}$, L – заданное критическое расстояние, а r – радиус проекции человека на плоскость xOy .

Тогда модуль вектора оптимальной скорости $v_{\alpha opt}(\alpha)$ агента в направлении движения под углом α к вектору $\mathbf{e}$ можно вычислить по выражениям:

$$\begin{aligned} v_{\alpha opt}(\alpha) &= v_{max}, l \geq L + r; \\ (3) \quad v_{\alpha opt}(\alpha) &= v_{max}(l - r) / L, r \leq l \leq L + r; \\ v_{\alpha opt}(\alpha) &= 0, l \leq r. \end{aligned}$$

Физиологические возможности людей различны, поэтому необходимо, чтобы каждый агент имел индивидуальные значения v_{max} и a_{max} .

Пусть угол между векторами $\mathbf{v}_{opt}$ и $\mathbf{e}$ равен γ . Тогда выбор вектора $\mathbf{v}_{opt}$ движения агента осуществляется по критерию

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= v_{\alpha opt}(\alpha) \cos(\alpha) \rightarrow \max \\ (4) \quad &\text{при } \alpha = \gamma \text{ и } \alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right]. \end{aligned}$$

Условие (4) позволяет агенту выбрать направление вектора $\mathbf{v}_{opt}$ таким, чтобы максимально приблизиться к выходу из помещения за время $\Delta t \rightarrow 0$.

3.2. ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ

Как следует из модели (1)-(4), для каждого агента на каждый шаг модельного времени требуется вычислить расстояния до всех остальных агентов и стен помещения. Исходя из вычисленных значений, необходимо по соотношению (3) вычислить максимально возможные скорости для определенного множества направлений движения заданного агента (принято 16 возможных направлений движения с шагом $\pi/8$), а затем по

критерию (4), определить направления векторов скорости и ускорения агента.

Алгоритм вычислений (для одного шага модельного времени) будет иметь вычислительную сложность $O(N^2 + NM)$, где N – число агентов, а M – стен помещения.

В программной реализации помещение разбивалось сетью S на мелкие элементы – квадраты (клетки) шириной 10 см. Данный размер клетки достаточно мал для того, чтобы в ней находились центры сразу двух агентов. При этом в ходе вычислений поддерживалась следующая структура данных:

- каждый агент имел координаты клетки, в которой он находился;

- каждая клетка содержала ссылку на агента, центр которого находился в заданной клетке (при отсутствии такого агента ссылка нулевая).

Каждая клетка c_{ij} характеризовалась следующими атрибутами:

- расстоянием до ближайшего выхода d_{ij} ;

- принадлежностью заданной клетки стене или полу.

Следовательно, для заданного агента необходимо проверить весьма ограниченный набор соседних клеток на наличие стен и других агентов, что позволяет улучшить вычислительную сложность алгоритма до $O(N)$. Направление к ближайшему выходу можно определить, исходя из анализа атрибута расстояния до ближайшего выхода клетки, в которой находится агент, и его соседних клеток.

Атрибут расстояния до выхода d_{ij} для каждой клетки рассчитывался с помощью графа $G = (V, E)$, заданного следующим образом.

Пусть $C = \{c_{ij} | 0 \leq i < n, 0 \leq j < m\}$ – сеть, разбивающая помещение на клетки; n, m – количество клеток по горизонтали и вертикали, соответственно; c_{ij} – клетка с координатами (i, j) , а $W \subseteq C$ – множество клеток, которым соответствует стена. Пусть для каждой клетки $c_{ij} \notin W$ существует вершина графа G $v_{ij} \in V$, а $e_{ijkl} \in E$ – ребро графа между вершинами v_{ij} и v_{kl} .

Тогда множество ребер E задается следующим образом:

$$E = \{e_{ijkl} \mid a, b (a \in [\min(i, k); \max(i, k)] \& b \in [\min(j, l); \max(j, l)] \rightarrow c_{ab} \in W) \& (i, j) \neq (k, l) \& (i-k) \in (j-l) \& |i-k| \leq 2 \& |j-l| \leq 2)\}.$$

Под знаком $\in$ понимается условие, которое позволяет не учитывать ребра, не изменяющих значение величины d_{ij} .

Кроме того, для каждого ребра графа G задана его длина, которая пропорциональна реальному расстоянию между клетками, соответствующим вершинам ребра.

Длина l_{ijkl} ребра e_{ijkl} определяется по соотношению

$$l_{ijkl} = \sqrt{(i-k)^2 + (j-l)^2}.$$

На заданном графе можно реализовать алгоритм поиска кратчайших путей, например алгоритм Дейкстры, для нахождения расстояния от выхода до всех остальных клеток. Таким образом, для каждой вершины v_{ij} , для которой $c_{ij} \notin W$, определяется расстояние d_{ij} до ближайшего выхода.

На рис. 3 показаны все ребра, инцидентные вершине v_{ij} .

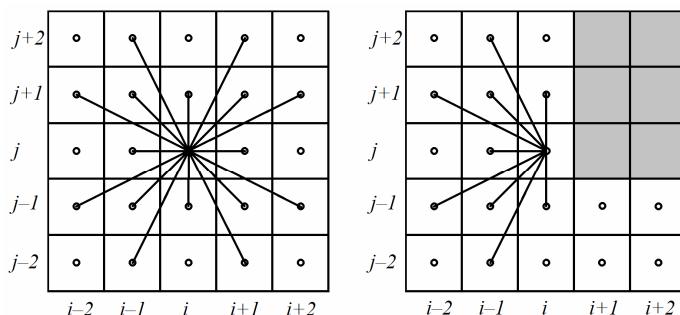


Рис. 3. Ребра графа, инцидентные вершине v_{ij} :
слева – вдали от стен; справа – рядом со стеной

Стена на рис. 3 выделена серым цветом.

4. Результаты использования модели

Программно-информационный комплекс для реализации мультиагентной модели написан на языке программирования

Java, с использованием библиотеки графического интерфейса Swing.

Проведенные на программно-информационном комплексе вычислительные эксперименты показали, что при эвакуации агенты демонстрируют интеллектуальное поведение. Например, имеют место обгоны одного агента другим (рис. 4).

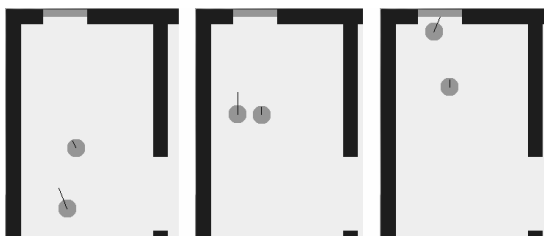


Рис. 4. Иллюстрация обгона одного агента другим

При этом физического контакта между агентами не происходит. Агент, находящийся позади, но имеющий максимальную скорость движения больше, чем скорость движущегося перед ним агента, анализирует обстановку вокруг себя и выбирает маршрут для обгона. Тогда он попадает к выходу, не дожидаясь того, когда выхода достигнет обгоняемый им агент и не тратит свою энергию на физический контакт с ним.

При исследовании процесса эвакуации с большим числом эвакуируемых наблюдалось скопление агентов в зоне выхода из помещения и давка (рис. 5).

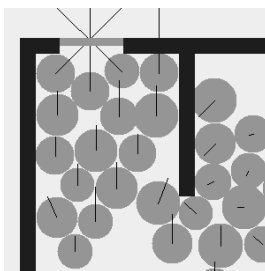


Рис. 5. Скопление агентов в зоне выхода из помещения

В качестве примера приведем результаты численного исследования процесса эвакуации из помещения размером 10×10 метров, план которого представлен на рис. 1.

Помещение содержит 15 стен, каждая из которых заданна параметрами (x, y, x_{II}, y_{II}) в метрах: $(0; 0; 0,2; 10)$; $(0,2; 0; 0,3; 0,2)$; $(1,3; 0; 8,7; 0,2)$; $(9,8; 1,0; 0,2; 8,0)$; $(0,2; 9,8; 9,8; 0,2)$; $(2; 0,2; 0,2; 1,8)$; $(2; 3; 0,2; 1,8)$; $(2; 6; 0,2; 1,8)$; $(4; 0,2; 0,2; 7,6)$; $(7; 0,8; 0,2; 7,0)$; $(8; 0,8; 0,2; 4,2)$; $(2; 4,8; 2; 0,2)$; $(2; 7,8; 3; 0,2)$; $(7,2; 5,0; 1,8; 0,2)$; $(6; 7,8; 3; 0,2)$.

Кроме того, помещение имеет 3 выхода, заданных параметрами (x, y, x_{II}, y_{II}) в метрах: $(0,5; 0; 0,8; 0,1)$; $(9,9; 9,0; 0,1; 0,8)$; $(9,9; 0,2; 0,1; 0,8)$.

При этом использовались следующие численные значения параметров описания процесса эвакуации:

- число эвакуируемых (агентов) – 100;
- максимальная скорость их движения v_{max} – случайная равномерно распределенная величина на отрезке $1 - 2$ м/с [16];
- максимальное ускорение движения a_{max} – случайная равномерно распределенная величина на отрезке $1 - 2$ м/с²;
- начальные координаты каждого агента выбирались по равномерному закону распределения, исходя из условия, что изначально проекция человека не должна пересекать проекции других людей и стены;
- радиус проекции r – случайная равномерно распределенная величина на отрезке $0,22 - 0,29$ м [16];
- критическое расстояние $L = 2$ м;
- масса m – случайная равномерно распределенная величина на отрезке $60 - 100$ кг;
- шаг модельного времени $\Delta t = 0,004$ с;
- коэффициент восстановления $\varepsilon = 0,4$ [4].

Результаты исследования процесса эвакуации приведены на рис. 6 и 7.

График функции $h_n(t)$ отображает зависимость количества эвакуируемых людей от времени, при условии, что в начальный

момент в помещении находится n человек. Функция $\bar{h}_n^m$ представляет собой результат усреднения функции $h_n(t)$ по m реализациям, полученным в процессе исследования.

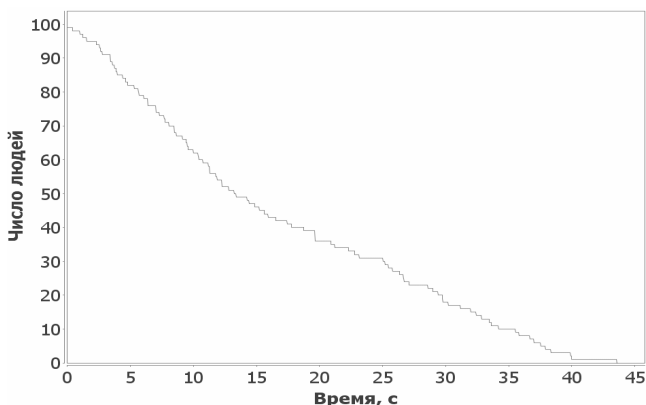


Рис. 6. График функции $h_{100}(t)$

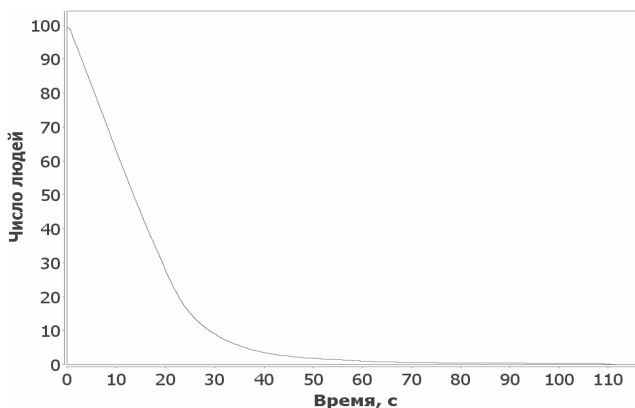


Рис. 7. График функции $\bar{h}_{100}^{100}(t)$

Результаты исследования показали, что в первую секунду процесса эвакуации очень мало людей покидают помещение,

так как большинство из них находятся лишь в начале своего пути к эвакуационным выходам. Затем у выходов начинают образовываться скопления людей, в это время интенсивность людского потока через двери возрастает. Примерно к 25-й секунде, интенсивность людского потока через выходы ослабевает. Это связано с тем, что в это время начинают эвакуироваться агенты с более низкой скоростью движения, а также с неравномерностью распределения нагрузки по выходам из помещения (эвакуация через некоторые выходы к этому времени уже может прекратиться).

Проведен также вычислительный эксперимент по анализу зависимости среднего времени эвакуации $t_m(n)$ от количества

людей n в помещении $t_m(n) = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} h_n^{-100}(t) dt$.

Результаты исследования представлены на рис. 8.

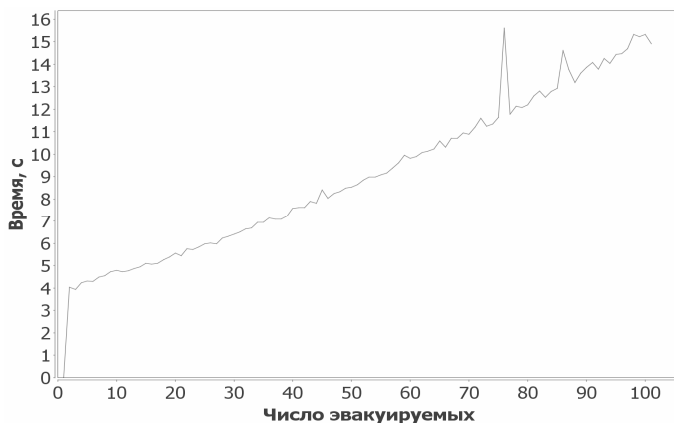


Рис. 8. График функции $t_m(n)$

Как видно из рис. 8, время эвакуации людей увеличивается с ростом числа эвакуируемых. Локальные максимумы при n равным 76 и 86 объясняются образованием пробок в зонах выхода из помещений [15].

На ПЭВМ с процессором Intel Core i5-3470 с 8Гб RAM время вычисления функции $h_{100}(t)$ составляет 3 с, а функции $\bar{h}_{100}^{100}(t)$ – около 5 мин.

5. Заключение

Предложенный подход к исследованию процесса эвакуации позволяет оценить состояние и поведение людей при возникновении пожара в производственных помещениях, построить мультиагентную модель и определить по ней количество эвакуируемых людей в зависимости от времени эвакуации для помещений различной геометрии и разного заполнения людьми.

Результаты, полученные с помощью рассмотренной модели, могут быть положены в основу разработки планов эвакуации, определения геометрии помещений и размещения персонала предприятия в них, обеспечивающих минимизацию времени эвакуации из горящего помещения.

В качестве пользователей данной модели выступают как руководство промышленных предприятий, так и службы МЧС.

Литература

1. ЗОТОВ И.В., САЗОНОВ С.Ю., ЕФРЕМОВА О.В., АББАКУМОВ С.А. *Использование многоагентного подхода в информационно-аналитических системах противопожарной безопасности* // Изв. Юго-Зап. гос. ун-та (Курск). – 2012. – № 5–2 (44). – С. 61–67.
2. НОВИКОВ Д.А. *Модели информационного противоборства в управлении толпой* // Проблемы управления. – 2015. – № 3. – С. 29-39.
3. ПЕТРОВА М.С., ПЕТРОВ С.В., ВОЛЬХИН С.Н. *Охрана труда на производстве и в учебном процессе: учеб. пособ.:* – М.: ЭНАС, 2006. – 152 с.
4. ПУТИЛОВ К.А. *Курс общей физики. Т. 1. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика.* Изд. 11. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963. – 560 с.

5. САМАРЦЕВ А.А., РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Использование динамических планов эвакуации при пожаре на промышленных предприятиях* // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29 [текст]: сб. тр. XXIX Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 3 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т; Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), СПбПУ, СПИИРАН; Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2016. – С. 177-181.
6. САМАРЦЕВ А.А., РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Подход к минимизации времени эвакуации людей из помещений промышленного предприятия* // Компьютерные науки и информационные технологии: материалы Междунар. науч. конф. – Саратов: Издат. Центр «Наука», 2016. – С. 354-356.
7. СКОБЕЛЕВ П.О. *Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 12. – С. 33-46.
8. ТАРАСОВ В.Б. *Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте* // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 2. – С. 5-63.
9. ТУПИКОВ Д.В., ИВАЩЕНКО В.А. *Нейросетевое прогнозирование значений факторов возникновения пожара на производственных объектах* // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27 [текст]: сб. тр. XXVII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 3. Секция 7 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Тамбов: Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 59-61.
10. ТУПИКОВ Д.В., ИВАЩЕНКО В.А. *Подход к обеспечению пожарной безопасности на промышленных предприятиях* // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28 [текст]: сб. тр. XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 3 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – С. 51-54.

11. ТУПИКОВ Д.В., ИВАЩЕНКО В.А. *Разработка базы знаний для оперативного управления взрыво- и пожароопасным производством* // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 3 (72). – С. 133-137.
12. ТУПИКОВ Д.В. РЕЗЧИКОВ А.Ф. *Подход к построению нечёткой базы знаний для определения пожароопасных ситуаций* // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27 [текст]: сб. тр. XXIV Междунар. науч. конф.: в 12 т. Секции 6, 7, 8 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Тамбов: ТГТУ, 2014. Т. 3. – С. 125-127.
13. ТУПИКОВ Д.В. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Алгоритм поддержки принятия решений по устранению пожароопасных ситуаций на промышленных предприятиях* // Управление большими системами. – 2014. – Выпуск 52. – С. 148-163.
14. ТУПИКОВ Д.В. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Подход к прогнозированию значений факторов пожароопасных ситуаций* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 7. – С. 48-51.
15. ХОЛЩЕВНИКОВ В.В., САМОШИН Д.А., ПАРФЕНЕНКО А.П. и др. *Эвакуация и поведение людей при пожарах: учеб. пособ.* – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 261 с.
16. KORHONEN TIMO. *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User's Guide (FDS 6.5.2, Evac 2.5.2, DRAFT)*. – М.: VTT Technical Research Centre of Finland, 2016. – 115 с.
17. WINTER HUGO . *Modelling Crowd Dynamics During Evacuation Situations Using Simulation*. – М.: Lancaster University, 2012. – 20 с.

MULTIAGENTAL MODEL OF PROCESS OF EVACUATION OF PEOPLE FROM INDUSTRIAL PREMISES IN CASE OF FIRE

Andrey Samartsev, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, post-graduate (samaand@yandex.ru).*

Vladimir Ivaschenko, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, scientific secretary (iptmuran@san.ru).*

Alexander Rezhikov, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, corresponding member of RAS, scientific supervisor (iptmuran@san.ru).*

Vadim Kushnikov, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, director (iptmuran@san.ru).*

Leonid Filimonyuk, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science, Scientist (iptmuran@san.ru).*

Aleksey Bogomolov, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science, Scientist (alexbogomolov@ya.ru).*

Abstract: The model of process of people evacuation in fire in limited space conditions is considered which is based on the multi-agent systems theory application. The model allows investigating the state and behavior of people (intelligent agents) in fire in industrial spaces, to determine the time of their evacuation. The proposed model can be used as the basis for determining the best evacuation path and evacuation plan designing.

Keywords: multiagent model, intellectual agent, conflagration, people evacuation from industrial spaces.