

УДК 004.94:614.841
ББК 32.813

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ИЗ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

**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)*

Предложена модель процесса эвакуации людей из помещений при возникновении чрезвычайных ситуаций, основанная на теории мультиагентных систем. Отличие предложенной модели заключается в объединении в единую систему формального описания физических взаимодействий агентов с помощью адаптивной модели частично упругого удара и правил, управляющих поведением агентов. Коррекция скорости движения агентов на каждом шаге модельного времени позволяет уменьшить время их приближения к выходу из помещения. Модель позволяет исследовать состояние и поведение людей при возникновении чрезвычайной ситуации и определить время их эвакуации. Предложенная модель может быть положена

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

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

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

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

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

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

в основу определения путей и разработки планов эвакуации из помещений людей при чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: мультиагентная модель, интеллектуальный агент, эвакуация людей, чрезвычайные ситуации.

1. Введение

В настоящее время проблема борьбы с чрезвычайными ситуациями (ЧС) приобретает особую актуальность. Статистические данные за 2016 год, представленные МЧС России [22], свидетельствуют о существенных человеческих и материальных потерях, вызванных ЧС. Экстренная эвакуация людей из помещений является наиболее эффективным способом снижения ущерба при авариях, природных катастрофах, пожарах, наводнениях и террористических актах.

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 ЧС.

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 [4, 5, 10], отказ систем оповещения, незнание 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 [19, 20].

На данный момент все большее распространение для оценки качества процесса эвакуации людей из помещений при возникновении ЧС получает компьютерное моделирование, особенно если реальное воспроизведение данных ситуаций ограничено или невозможно.

С помощью компьютерной симуляции исследована динамика поведения больших масс людей при эвакуации на основе использования *молекулярной модели – модели социальных сил*, предложенной Хелбингом и Молнаром в 1995 году, и ее модификаций [1, 36-43]. Согласно этой модели на людей в толпе действуют силы, ориентирующие их на достижение цели и удерживающие от взаимодействия друг с другом и столкновений с препятствиями. В целом модель считается довольно удачной, хотя и критикуется за то, что она существенно упрощает описание поведения людей и имеет большую вычислительную сложность [43].

Среди моделей группового движения людей распространение также получили потоковые модели [17, 43], описывающие движение потоков людей по аналогии с движением жидкости или газа, полагая поток людей несжимаемой средой. Потоковые модели рассматривают поток людей как толпу, характеризующую плотностью. Данный подход позволяет получить лишь макрохарактеристики толпы, исходя из законов взаимодействия агентов. К тому же эта аналогия неполноценна, так как толпа относится к умеренно сжимаемым средам [35].

В настоящее время все большее применение находят модели, основанные на рассмотрении индивидуального поведения людей. К их числу в первую очередь следует отнести модели, основанные на аппарате клеточных автоматов, которые концептуально просты и вычислительно эффективны [7, 23, 43]. С помощью таких моделей можно объяснить некоторые аспекты поведения толпы, например давку у выходов из помещений.

Но наиболее известными и прошедшими проверку на практике моделями, основанными на рассмотрении индивидуально-поведения людей, являются агентно-ориентированные моде-

ли [2, 4-6, 8, 10, 21, 24, 39 и др.]. Эти модели позволяют учесть множество факторов, имеющих место в реальных критических ситуациях, на основе моделирования поведения каждого человека в отдельности с учетом его индивидуальных особенностей.

Наиболее близкими к предлагаемой в данной статье модели, являются агентные модели, представленные в работах [33, 34]. В этих моделях отдельно взятому агенту ставится в соответствие сектор обзора, в котором он выбирает дальнейшее направление движения, исходя из условий:

- сокращения числа столкновений с другими агентами;
- сохранения направления своего движения.

Отличие предложенной модели заключается в объединении формального описания физических взаимодействий агентов друг с другом и препятствиями в виде адаптивной модели частично упругого удара и правил, управляющих поведением агентов с учетом этих взаимодействий, в единую систему. Коррекция правил поведения агентов, направленная на выбор ими на каждом шаге модельного времени направления и величины оптимальной скорости движения, обеспечивает уменьшение времени приближения их к выбранному выходу из помещения.

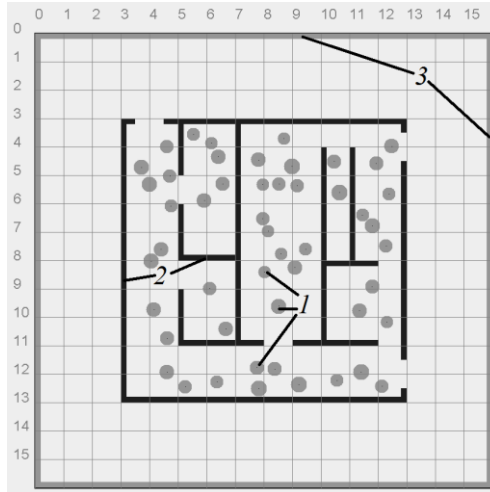
Предложенная модель обладает достаточной гибкостью в плане возможности ее дальнейшего усложнения для повышения адекватности. При этом в основу описания столкновений агентов друг с другом и препятствиями положены:

- диссипативная модель частично упругого удара;
- коррекция правил, управляющих поведением агентов в результате этих взаимодействий.

К достоинствам данной модели следует также отнести несложное задание правил поведения агентов и простоту описания физического взаимодействия их друг с другом и препятствиями, обуславливающие ее высокое быстродействие.

2. Постановка задачи

Опираясь на свойство фрактальности, не теряя общности рассуждений, рассмотрим помещение, план которого представлен на рис. 1.



1 – люди, 2 – стены, 3 – зоны выхода

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

Допустим, что заданы:

1. Конечное множество стен, каждая из которых представлена параметрами: (x^W, y^W) – координаты левого нижнего угла стены, x^W и y^W – ее длина и ширина соответственно. Будем считать, что каждая стена параллельна одной из осей координат.

2. Конечное множество выходов из помещений, заданных координатами левого нижнего угла выхода (x^E, y^E) , а также шириной и длиной дверного проема x^E и y^E соответственно. После того как человек попал в одну из зон выхода из помещения, полагается, что он эвакуирован. Отметим, что зона выхода должна находиться не непосредственно в дверном проеме, а на некотором расстоянии от него, так как после того как человек вышел из помещения, он все еще влияет на процесс эвакуации [3].

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.

4. Конечное множество зон эвакуации, каждая из которых задана параметрами: (x^Z, y^Z) – координаты левого нижнего угла зоны эвакуации, x_w^Z и y_w^Z – ее длина и ширина соответственно. Именно внутри таких зон люди находятся в самом начале эвакуации. Наличие зон эвакуации позволяет учесть возможное отсутствие людей в некоторых помещениях и в пространстве за пределами помещения в первый момент времени.

Параметры людей:

– вектор $x(t)$, исходящий из центра проекции человека на плоскость xOy ;

– радиус проекции – r ;

– масса человека – m ;

– векторы его скорости – $v(t)$ и ускорения – $a(t)$ движения;

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

Скорость и ускорение человека на начало эвакуации полагаются равными нулю (движение отсутствует).

Необходимо выполнить моделирование процесса стихийной эвакуации людей из помещения, по результатам которого выработать рекомендации по изменению планировки помещений и путей эвакуации.

3. Мультиагентная модель

3.1. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

В предлагаемой модели, как и в [1, 33–39], 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 [18]. Тогда часть кинетической энергии переходит в тепловую или другие формы энергии, т.е. имеет место диссипация энергии.

Для описания частично упругого столкновения 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 общей плоскости касательной к поверхностям сталкивающихся тел в точке их контакта (плоскости соударения) после удара при частично упругом ударе 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 [18].

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

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 и направление движения агента $v(t)$ могут изменяться из-за его столкновений с другими агентами и

стенами. Тогда можно считать, что он движется с ускорением $a(t)$, модуль которого определяется, исходя из физиологических возможностей человека ($|a(t)| = a_{max}$), а направление совпадает с $v_{opt}(t) - v(t)$. Если $v_{opt}(t) = v(t)$, то агент движется без ускорения. Модуль ускорения всегда максимален, кроме случая, когда агент уже движется с оптимальной скоростью. Этот факт можно объяснить стрессовой ситуацией и желанием агента как можно быстрее покинуть помещение.

На рис. 2 приведена графическая интерпретация связи между параметрами агента. Следует обратить внимание на то, что вектора a и $v_{opt} - v$ коллинеарны.

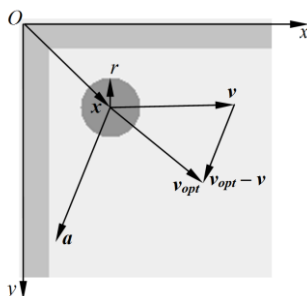


Рис. 2. Графическая интерпретация связи между параметрами агента

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

Рассмотрим подход к выбору вектора $v_{opt}(t)$ подробнее. Пусть e – вектор, задающий направление к ближайшему выходу с учетом планировки помещения.

Выбор вектора e определяется исключительно местоположением агента, стен и зон выхода, но не местоположением других агентов, т.е. вектор e является атрибутом клетки пространства. Таким образом, можно определить множество векторов e для заданного помещения. При этом расчеты этих значе-

ний в ходе моделирования проводятся только один раз, что является преимуществом с точки зрения скорости вычислений. Часть множества векторов e для исследуемого помещения представлено ниже на рис. 5.

Пусть l_α – расстояние от центра агента до ближайшего препятствия (человека или стены) в направлении движения под углом α к вектору e , L – заданное критическое расстояние, а r – радиус проекции человека на плоскость xOy .

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

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

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

Введем функцию

$$(4) \quad f(\alpha) = v_{opt}(\alpha) \cos(\alpha); \quad \alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right].$$

Тогда угол γ между векторами v_{opt} и e определяется как угол, при котором значение функции $f(\alpha)$ максимально. То есть выбор направления вектора v_{opt} движения агента осуществляется по критерию

$$(5) \quad f(\alpha) \rightarrow \max \text{ при } \alpha = \gamma \text{ и } \alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right].$$

Величина вектора v_{opt} определяется в результате подстановки $\alpha = \gamma$ в выражение (3)

$$(6) \quad |v_{opt}| = v_{opt}(\gamma).$$

Представленный способ выбора величины v_{opt} позволяет агенту маневрировать между другими агентами, стремясь, во-первых, по возможности избегать столкновения с ними, а во-вторых, максимально быстро приближаться к ближайшему

выходу (предполагается хорошее знакомство с планом помещения, из которого осуществляется эвакуация).

Таким образом, выбор вектора оптимальной скорости v_{opt} учитывает как планировку помещения, так и расположение других агентов вокруг него. Вектор v_{opt} необходимо пересчитывать для каждого агента на каждом шаге модельного времени.

Отметим, что в описанной модели присутствуют также атрибуты, используемые в известных моделях [2] и др., такие как угол и дальность обзора агентом окружающего пространства, момент инерции и угол поворота головы агента:

1. Направление, приближающее агента к выходу (с учетом наличия в помещении стен), определяется вектором e . Угол обзора агента можно считать равным 180° , так как в выражении (5) $\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$, т.е. агент анализирует все возможные альтернативы для движения в плоскости перед собой.

2. Так как агент вычисляет значения оптимальной скорости, исходя из анализа ситуации в пределах критической зоны, то можно считать, что дальность обзора агента не меньше L .

3. Часть энергии при ударе переходит во вращательное движение. В модели эти потери энергии учитываются исключительно коэффициентом восстановления (формула (2)).

4. Способность агента поворачивать головой учитывается за счет большого угла обзора, указанного в пункте 1.

Таким образом, в модели некоторые параметры задаются неявно, что упрощает модель и увеличивает скорость вычислений.

У модели присутствует значительный потенциал для усовершенствования, в частности, возможна интеграция с другими моделями ЧС, учет ранения и гибели агентов в результате действия опасных факторов ЧС, столкновения агентов друг с другом или давки. Кроме того, анализ эффекта турбулентности и его формализация является предметом дальнейших исследований, в текущей версии модели данный эффект не учтен и не влияет на перерасчет динамики агентов.

3.2. ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ

Особенности реализации модели. Как следует из модели (1)–(6), 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 критериям (4)–(6), определить направление и величину вектора оптимальной скорости, а после этого – величину ускорения агента.

Алгоритм вычислений (для одного шага модельного времени) в таком случае будет иметь вычислительную сложность $O(N^2 + NM)$, где N – число агентов, а M – стен помещения. Квадратичная сложность вычислений не является приемлемой для систем с большим числом агентов, поэтому здесь необходима оптимизация, направленная на улучшение асимптотики скорости вычислений.

Пусть $C = \{c_{ij} / 0 \leq i < n, 0 \leq j < m\}$ – сеть, разбивающая область пространства – помещение и некоторую его окрестность – на клетки со стороной h ; n, m – количество клеток по горизонтали и вертикали соответственно; c_{ij} – клетка с координатами (i, j) , а $W \subset C$ – множество клеток, которым соответствует стена.

В программной реализации помещение разбивалось сетью C на элементы – квадраты (клетки) шириной $h = 10$ 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 c_{ij} содержала ссылку на агента, центр которого находился в заданной клетке (при отсутствии такого агента ссылка нулевая).

Каждая клетка c_{ij} характеризовалась следующими атрибутами:

- принадлежностью заданной клетки стене или полу.
- расстоянием до ближайшего выхода d_{ij} ;

– направлением вектора e_{ij} , задающего направление к выходу.

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, задаваемое вектором e , определяется исходя из анализа атрибута расстояния до ближайшего выхода клетки, в которой находится агент, и его соседних клеток.

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

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:

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

Под знаком \perp понимается условие взаимной простоты, которое позволяет не учитывать ребра, наличие которых не влияет на значение величины d_{ij} .

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

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

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

Рассмотрим формулу подсчета множества ребер подробнее.

1. Выражение $\forall a, b \quad (a \in [\min(i, k); \max(i, k)] \& b \in [\min(j, l); \max(j, l)] \rightarrow c_{ab} \notin W)$, означает, что среди клеток c_{ij} и c_{kl} , а также клеток между ними в прямоугольнике с диагональю соединяющей c_{ij} и c_{kl} , нет клеток, соответствующих стенам.

2. Выражение $(i, j) \neq (k, l)$ означает, что граф не рефлексивный. В петлях в данной ситуации нет смысла, так как они не

могут изменить значение расстояния от выхода до какой-либо вершины.

3. Выражение $(i - k) \perp (j - l)$ означает, что $i - k$ и $j - l$ взаимно просты, т.е. эти числа не имеют общих делителей, кроме единицы. Данное соотношение позволяет упростить граф, так как ребра, для которых это соотношение не выполняется, не могут изменить значение расстояния от выхода до какой-либо вершины.

4. Выражение $|i - k| \leq 2 \ \& \ |j - l| \leq 2$ означает, что расстояние по вертикали или по горизонтали между клетками не больше 2.

Таким образом, две вершины связаны ребром только в случаях, если соответствующие им клетки:

а) непосредственно соприкасаются друг с другом (являются вертикальными или горизонтальными соседями);

б) соприкасаются друг с другом в одной точке (являются диагональными соседями);

в) отстоят на одну клетку по одному измерению и на две по другому (аналогия с L -образным ходом шахматного коня).

При этом соединяемые клетки и клетки, находящиеся между ними, не должны соответствовать клеткам со стеной.

На рис. 3 показаны все ребра, инцидентные вершине v_{ij} . Стена на рис. 3 выделена серым цветом.

На рис. 4 представлен фрагмент графа G , наложенный на часть помещения, представленного на рис. 1 в окрестности точки с координатами (3, 4).

На заданном графе необходимо реализовать алгоритм поиска кратчайших путей 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. Для клеток $c_{ij} \in W$ считаем, что $d_{ij} = \infty$.

В качестве алгоритма поиска кратчайших путей авторами использован алгоритм Дейкстры, достоинство которого состоит в его простоте и распространенности. Слабость алгоритма, связанная с поиском в ширину, в данном случае несущественна, так как алгоритм используется только один раз при инициализации значений d для заданного помещения. Поэтому здесь

указанная слабость алгоритма превращается в его преимущество, так как важно проинициализировать значения d во всех участках помещения.

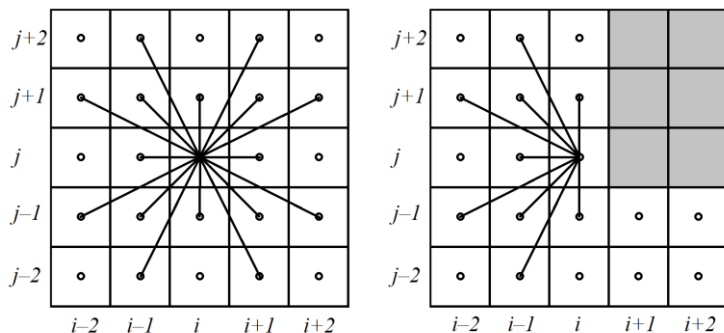


Рис. 3. Ребра графа, инцидентные вершине v_{ij} : слева – вдали от стен; справа – рядом со стеной

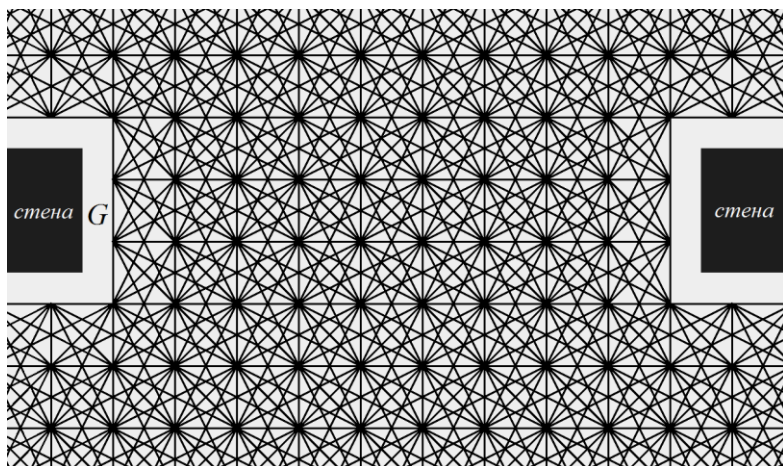


Рис. 4. Фрагмент графа G в окрестности точки с координатами (3, 4)

На рис. 5 представлено множество расстояний d , при этом более темным цветом выделены участки помещения, располо-

женные дальше от выхода. Также на рис. 5 показана часть множества векторов e . Как видно из рисунка, все вектора этого множества направлены в сторону уменьшения значений d .

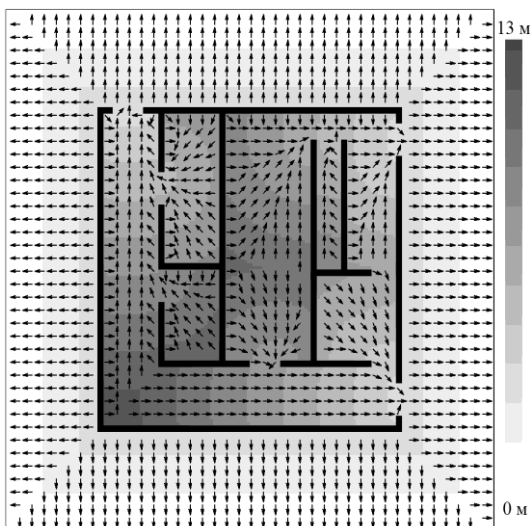


Рис. 5. Визуальное представление совокупности векторов e , задающих направления движения агентов, и расстояний d до зоны выхода из помещения

Расчет значений вектора, задающего направление к ближайшему выходу. Остановимся подробнее на процедуре подсчета значений вектора e . Введем граф G' , отличающийся от графа G множеством ребер. Множество ребер E' графа G' определяется следующим образом:

$$E' = \{e_{ijkl} | (i, j) \neq (k, l) \ \& \ (i - k) \perp (j - l) \ \& \ |i - k| \leq 2 \ \& \ |j - l| \leq 2\}.$$

Таким образом, при выборе множества ребер исключается условие 1, т.е. наличие стен в помещении игнорируется.

Для клетки c_{ij} существует 16 возможных направлений вектора e_{ij} с шагом $\pi/8$. Эти направления соответствуют всем инцидентным ребрам вершины v_{ij} в графе G' . Пронумеруем эти ребра

от 0 до 15 по порядку против часовой стрелки, начиная от ребра, параллельного оси Ox , и обозначим их соответственно e_0, \dots, e_{15} .

Для каждого из этих направлений вычислим отношение $m_k = d_k/l_k$, где l_k – длина ребра e_k , а d_k – разность между величинами атрибута расстояния до выхода между вершинами, инцидентными e_k . Таким образом получается вектор m из 16 элементов $(m_1 \dots m_k)$. Введем в рассмотрение вектор $m_0 = (m_{01} \dots m_{0k})$, полученный из m путем усреднения соседних элементов следующим образом:

$$m_{0k} = 2m_k/5 + (m_{(k+15) \bmod 16} + m_{(k+7) \bmod 16})/5 + (m_{(k+14) \bmod 16} + m_{(k+8) \bmod 16})/10.$$

Пусть элемент m_{0s} минимален, $m_{0s} = \min m_0$. Тогда угол между вектором e и осью Ox определяется как $s * \pi/8$. Множество полученных таким образом значений вектора e изображено на рис. 5.

Многочастичные коллизии при реализации модели.

При реализации модели на практике возникает вопрос о многочастичных столкновениях. Двучастичные коллизии в модели разрешаются путем перерасчета скоростей столкнувшихся агентов по формуле (2) при условии, что расстояние между центрами агентов меньше или равно сумме их радиусов, а агенты приближаются друг к другу.

Многочастичные коллизии разрешаются путем пересчета скоростей столкнувшихся агентов по формуле (2) попарно для всех столкнувшихся агентов в порядке, определяемом индексами сталкивающихся агентов в списке. При дальнейшем развитии модели данный способ расчета многочастичных коллизий может быть усовершенствован.

Необходимо отметить, что многочастичные коллизии, как правило, возникают только в случае давки. При ее отсутствии такие коллизии крайне редки ввиду того, что в модели шаг по времени достаточно мал, а столкновение агентов занимает лишь один шаг модельного времени.

4. Предлагаемый алгоритм моделирования

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

Java с использованием библиотеки графического интерфейса Swing.

Приведем алгоритм работы этого комплекса:

1. Задание исходных данных: размеров помещения, координат стен, выходов из помещения, количества и параметров агентов.

2. Инициализация сети C : построение графа G для сети C , определение множеств значений d и векторов e .

3. Генерация агентов внутри зон эвакуации.

4. Расчет v_{opt} для каждого агента (3)-(6).

5. Расчет a для каждого агента.

6. Расчет v для каждого агента (1).

7. Расчет x для каждого агента (1).

8. Проверка наличия столкновения для каждой пары агентов.

Если столкновение имеет место, то пересчет скоростей (2).

9. Проверка столкновений со стенами для каждого агента.

Если столкновение есть – пересчет скоростей.

10. Проверка условия достижения выхода для каждого агента. Если агент достиг выхода, то он исключается из списка. Полагается, что агент достиг выхода, если его центр находится в зоне выхода.

11. Сбор и хранение статистики. Если в помещении не осталось людей, то переход к шагу 14.

12. Отображение положения агентов и стен на экране в окне программы.

13. Переход к следующему шагу модельного времени. Переход к шагу 4.

14. Если необходимое количество промежуточных экспериментов не выполнено, то переход к шагу 3.

15. Отображение результатов эксперимента (графиков функций).

16. Переход к шагу 1 (по запросу пользователя).

5. Результаты моделирования и их анализ

Проведенные на программно-информационном комплексе вычислительные эксперименты показали, что при эвакуации

агенты демонстрируют «разумное» поведение. Например, имеют место обгоны одного агента другим (рис. 6).

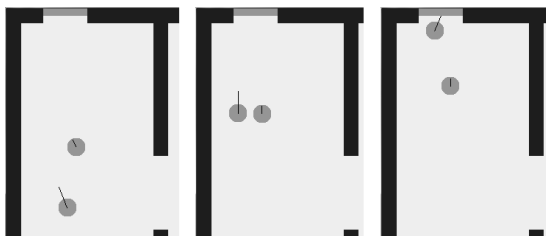


Рис. 6. Иллюстрация обгона одного агента другим
(три стадии обгона слева направо)

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 (рис. 7).

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

Помещение содержит 17 стен, каждая из которых задана параметрами (x, y, x_w, y_w) в метрах: (3,0; 3,0; 0,2; 10); (3,2; 3; 0,3; 0,2); (4,5; 3; 8,5; 0,2); (12,8; 3,2; 0,2; 0,3); (12,8; 4,5; 0,2; 7,0); (12,8; 12,5; 0,2; 0,3); (3,2; 12,8; 9,8; 0,2); (5; 3,2; 0,2; 1,8); (5; 6; 0,2; 1,8); (5; 9; 0,2; 1,8); (7; 3,2; 0,2; 7,6); (10; 4,0; 0,2; 6,8); (11; 4,0; 0,2; 4,0); (5; 7,8; 2; 0,2); (5; 10,8; 3; 0,2); (10,2; 8,0; 1,8; 0,2); (9; 10,8; 3; 0,2).

На плане в 3 метрах от стен помещения заданы зоны выхода, заданных параметрами (x, y, x_w^E, y_w^E) в метрах: (0; 0; 0,2; 16); (0,2; 0; 15,8; 0,2); (15,8; 0,2; 0,2; 15,8); (0,2; 15,8; 15,8; 0,2).

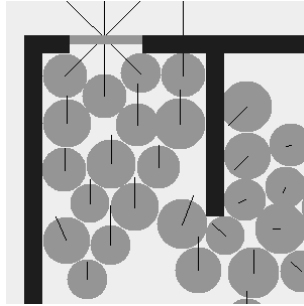


Рис. 7. Скопление агентов в зоне выхода
из помещения

Зона эвакуации определена одним элементом, который задан параметрами (x, y, x_w^z, y_w^z) в метрах: (3; 3; 10; 10).

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, а центр проекции должен находиться внутри зон эвакуации. Начальные координаты каждого агента генерируются заново для каждого нового эксперимента с использованием генератора квазиравномерных псевдослучайных чисел
- 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].

Коэффициент корреляции между случайными величинами r и m равен 1, т.е. имеет место функциональная зависимость $m = 60 + 40(r - 0,22)/0,07$.

Результаты моделирования процесса эвакуации приведены на рис. 8 и 9. 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 моделирования.

Результаты показали, что в первые секунды процесса эвакуации очень мало людей покидают помещение, так как большинство из них находятся лишь в начале своего пути к выходам. Затем у выходов начинают образовываться скопления людей, в это время интенсивность людского потока через двери возрастает. Примерно к 30-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).

Длинный «хвост» у графика функции $\bar{h}_{100}^{-100}(t)$ в области значений аргумента от 40 до 80 с объясняется образованием пробок у выходов из помещения при некоторых реализациях эксперимента. Таким образом, при некоторых первоначальных расположениях агентов и распределениях их параметров эвакуация может затянуться.

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

$$\text{людей } n \text{ в помещении: } t_m(n) = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} \bar{h}_n^{-100}(t) dt.$$

Результаты моделирования представлены на рис. 10.

Как видно из рис. 10, время эвакуации людей увеличивается с ростом числа эвакуируемых. Некоторые отклонения от монотонности функции $t_m(n)$, которые особенно отчетливо наблюда-

ются при значениях $n > 85$, можно объяснить неустойчивостью процесса эвакуации по отношению к начальным условиям, в частности, к расположению агентов в помещении на момент начала эвакуации, и частыми образованиями пробок из людей при данных значениях n .

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.

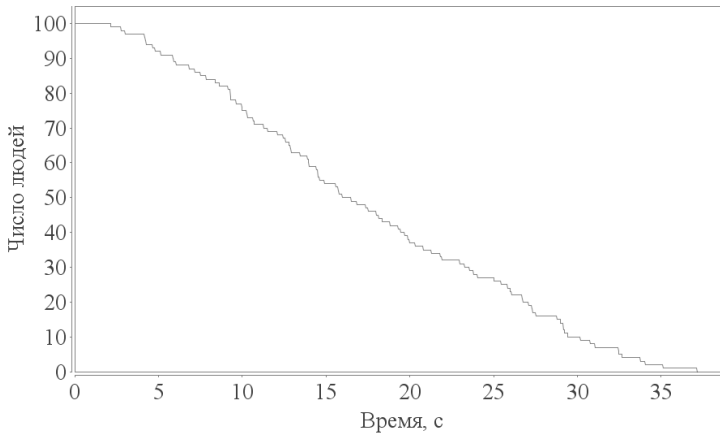


Рис. 8. График функции $h_{100}(t)$

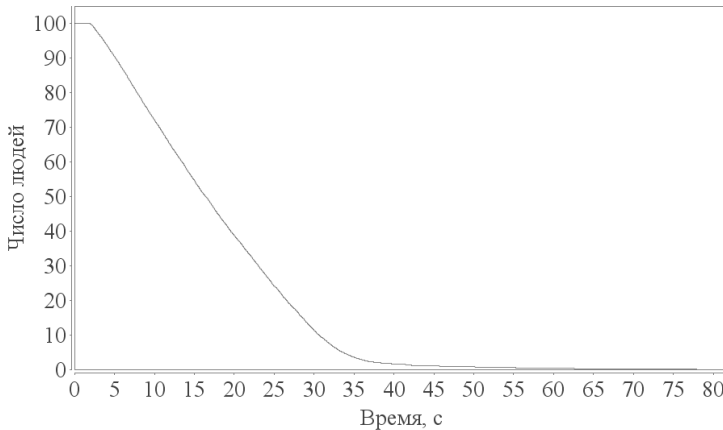


Рис. 9. График функции $\bar{h}_{100}^{-100}(t)$

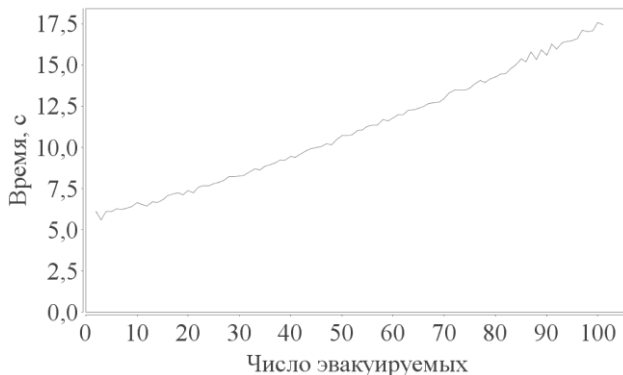


Рис. 10. График функции $t_m(n)$

6. Заключение

Предложена модель процесса эвакуации людей из помещений при чрезвычайных ситуациях. Модель отличается тем, что учитывает сложную конфигурацию ограниченного пространства, влияние стен и других препятствий, физическое взаимодействие людей в процессе эвакуации и разумную взаимную корректировку их целей.

Процесс эвакуации людей из помещений при чрезвычайных ситуациях на основе предложенной модели позволяет оценить состояние и поведение людей, а также количество эвакуируемых от времени эвакуации для помещений различной геометрии и разного заполнения людьми в зависимости от максимально возможных значений скорости и ускорения их движения.

Модель может быть использована в составе тренажерных комплексов по моделированию процесса эвакуации людей из производственных и прочих помещений при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Литература

1. АПТУКОВ А.М., БРАЦУН Д.А., ЛЮШНИН А.В. *Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении* // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т. 5, №3. – С. 491–508.
2. БЕКЛАРЯН А.Л., АКОПОВ А.С. *Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях* // XVI Апрельская Международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества: в 4 кн. – Higher School of Economics Publishing House. – 2016. – С. 665–681.
3. БЕКЛАРЯН А.Л. *Фронт выхода в модели поведения толпы при чрезвычайных ситуациях* // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – Т. 20, №4. – С. 851–856.
4. БРЕЕР В.В., НОВИКОВ Д.А. *Модели управления толпой* // Проблемы управления. – 2012. – №2. – С. 38–44.
5. БРЕЕР В.В., НОВИКОВ Д.А., РОГАТКИН А.Д. *Стохастические модели управления толпой* // Управление большими системами. – 2014. – Вып. 52. – С. 85–117.
6. 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.
7. КИРИК Е.С., КРУГЛОВ Д.В., ЮРГЕЛЬЯН Т.Б. *О дискретной модели движения людей с элементом анализа окружающей обстановки* // Журнал СФУ. Серия «Математика и физика». – 2008. – Т. 1, №3. – С. 266–276.
8. КОРЕПАНОВ В.О. *Имитационные модели тактического поведения агентов* // Управление большими системами. – 2009. – №26. – С. 66–76.
9. КРАСНОЩЕКОВ П.С. *Простейшая математическая модель поведения. Психология конформизма* // Математическое моделирование. – 1998. – Т. 10, №7. – С. 76–92.

10. НОВИКОВ Д.А. *Модели информационного противоборства в управлении толпой* // Проблемы управления. – 2015. – №3. – С. 29-39.
11. *Официальный сайт симулятора Di-Guy* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.diguuy.com/diguuy> (дата обращения: 01.10.2017).
12. *Официальный сайт симулятора Myriad II* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.crowddynamics.com/evacuation-demo.php> (дата обращения: 01.10.2017).
13. *Официальный сайт симулятора Pedestrian Dynamics* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pedestrian-dynamics.com> (дата обращения: 01.10.2017)
14. *Официальный сайт проекта Gamma* [Электронный ресурс]. – URL: <http://gamma.cs.unc.edu> (дата обращения: 01.10.2017).
15. *Официальный сайт фреймворка Menge* [Электронный ресурс]. – URL: <http://gamma.cs.unc.edu/Menge/> (дата обращения: 01.10.2017).
16. ПЕТРОВА М.С., ПЕТРОВ С.В., ВОЛЬХИН С.Н. *Охрана труда на производстве и в учебном процессе*: учеб. пособ. – М.: ЭНАС, 2006. – 152 с.
17. ПРЕДТЕЧЕНСКИЙ В.М., МИЛИНСКИЙ А.И. *Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков*: учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1979. – 375 с.
18. 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.
19. 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.

20. 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.
21. 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.
22. *Сравнительная характеристика чрезвычайных ситуаций, происшедших на территории Российской Федерации в 2016/2015 годах* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mchs.gov.ru/folder/33160904> (дата обращения: 17.09.17).
23. СТЕПАНЦОВ М.Е. *Математическая модель направленного движения группы людей* // Математическое моделирование. – 2004. – Т. 16, №3. – С. 43–49.
24. ТАРАСОВ В.Б. *Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте* // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – №2. – С. 5–63.
25. ТУПИКОВ Д.В., ИВАЩЕНКО В.А. *Нейросетевое прогнозирование значений факторов возникновения пожара на производственных объектах* // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: 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.
26. ТУПИКОВ Д.В., ИВАЩЕНКО В.А. *Подход к обеспечению пожарной безопасности на промышленных предприятиях* // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: 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.

27. 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.
28. ТУПИКОВ Д.В. РЕЗЧИКОВ А.Ф. *Подход к построению нечёткой базы знаний для определения пожароопасных ситуаций* // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: 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.
29. ТУПИКОВ Д.В. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Алгоритм поддержки принятия решений по устранению пожароопасных ситуаций на промышленных предприятиях* // Управление большими системами. – 2014. – Вып. 52. – С. 148–163.
30. ТУПИКОВ Д.В. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Подход к прогнозированию значений факторов пожароопасных ситуаций* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №7. – С. 48–51.
31. ХОЛЩЕВНИКОВ В.В., САМОШИН Д.А., ПАРФЕНЕНКО А.П. и др. *Эвакуация и поведение людей при пожаре*: учеб. пособ. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 261 с.
32. ШИХАЛЕВ Д.В. и др. *Индивидуально-поточная модель движения людей для задачи управления эвакуацией при пожаре* // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – №3. – С. 61.
33. ANTONINI G., BIERLAIRE M., WEBER M. *Discrete choice models of pedestrian walking behavior* // Transportation Research Part B. – 2006. – Vol. 40, No. 8. – P. 667–687.
34. CHERIF F., CHIGHOUB R. *Crowd simulation influenced by agent's sociopsychological state* // J. of computing. – 2010. – Vol. 2, No. 4. – P. 48–54.
35. HENDERSON L.F. *The statistics of crowd fluids* // Nature. – 1971. – No. 229. – P. 381–383.

36. HELBING D., FARKAS I., VICSEK T. *Simulating dynamical features of escape panic* // Nature. – 2000. – №407. – P. 487–490.
37. HELBING D. *Traffic and related self-driven many-particle systems* // Reviews of Modern Physics. – 2001. – Vol. 73, No. 4. – P. 1067–1141.
38. HELBING D., FARKAS I., Molnar T., VICSEK T. *Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations* // Pedestrian and evacuation dynamics. – 2002. – Vol. 21, No. 2. – P. 21–58.
39. HELBING D., JOHANSSON A., AL-ABIDEEN H.Z. *Dynamics of crowd disasters: An empirical study* // Physical review E. – 2007. – Vol. 75, No. 4. – P. 0461091–0461097.
40. MOUSSAIDA M., HELBING D., THERAULAZA G. *How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters* // PNAS. – 2011. – Vol. 108, No. 17. – P. 6884–6892.
41. Yu W., Johansson A. *Modeling crowd turbulence by many-particle simulations* // Physical review E. – 2007. – Vol. 76, No. 4. – P. 046105.
42. KORHONEN T. *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.
43. WINTER H. *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 EMERGENCY

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: A model of Fire Emergency Evacuation process from industrial premises based on the theory of multi-agent systems is proposed in this paper. The distinctive feature of the proposed model is in combining the formal description of agents physical interactions using an adaptive model of partially elastic collision with the rules defining the agents behavior. The correction of agents speed at each step of modeling time allows to reduce the time of their moving towards the exit from the premise. The model allows to investigate people locations and their movings in the fire emergency situation and to find the evacuation time. The proposed model can be used as a basis for finding directions of people evacuation and developing fire emergency evacuation plans.

Keywords: multiagent model, intelligent agent, evacuation of people, premises, emergencies.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии М.В. Губко.

*Поступила в редакцию 09.04.2017.
Опубликована 31.03.2018.*