



Основные подходы к моделированию движения пешеходных потоков



Михаил ЯКИМОВ

Mikhail R. YAKIMOV

General Approach to Modeling of Pedestrian Flows

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 171)

Автором рассматриваются два подхода к моделированию и анализу поведения пешеходов в типичной городской среде: в основе одного – гражданский инжиниринг, а другого – урбанистическая география. При этом фигурируют четыре типа моделей поведения пешеходов – физико-математические и многоагентные, в виде клеточных автоматов и построенные на теории массового обслуживания. Дается описание каждой из них, рассказывается о специфике применения, а также приводятся примеры реализации моделей в программных продуктах.

Ключевые слова: моделирование, организация дорожного движения, пешеходные потоки, модели поведения пешеходов, гражданский инжиниринг, урбанистическая география.

Якимов Михаил Ростиславович – доктор технических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия.

Аналитики транспортных систем, в особенности городских, сталкиваются с серьезными трудностями при формализации и позиционировании результатов своих исследований в профессиональной сфере. В первую очередь это связано с трактовкой самого термина «модель» и процесса моделирования в целом. В настоящее время назрела необходимость в некоем упорядочивании основных терминов и определений, используемых при разработке, оценке и сопоставлении алгоритмов моделирования транспортных и пешеходных потоков. Что касается пешеходных потоков, то обозначенная проблема как никогда актуальна. Подходы к анализу их движения настолько различны по своей сути, насколько по-разному относятся к ним и различные категории заинтересованных лиц (органы власти, проектировщики, общественность, профессиональные сообщества). Существует потребность в четкой классификации не столько алгоритмов, сколько общих подходов к анализу и моделированию движения пешеходных потоков.

Известны многие достаточно апробированные методы анализа и моделирова-

ния транспортных и пешеходных потоков. В части моделирования пешеходного движения [1–16; 18–21] они реализуются на разных принципах, которые определили два основных подхода к исследованиям.

Первый из них — гражданский инжиниринг, который применяется для построения модели транспортного спроса и служит базой при последующем конструировании транспортных моделей в целом, то есть моделей взаимодействия транспортного спроса и транспортного предложения. Модели подобного типа в гражданском инжиниринге используются для решения задач проектирования новой транспортной инфраструктуры. Результатом построения модели транспортного спроса являются матрица корреспонденций и матрица затрат. Ячейки матриц определяют количество людей, перемещающихся по различным маршрутам. Процесс моделирования перемещения людей основан на стандартной четырехшаговой транспортной модели. Такие модели по характеру — макроскопические, поскольку элементы низшего порядка в них — это локации, посещённые индивидами, а также маршруты, которые для этого предназначены.

Второй подход базируется на архитектуре и урбанистической географии. Приверженцев данного подхода выделяет интерес к тому, как расположение мест притяжения влияет на пешеходное движение. Такие модели, как правило, являются микроскопическими, с большим количеством деталей. В общем случае они разрабатываются для небольших территорий, хотя иногда могут быть экстраполированы и на территорию всего города. Ряд же моделей сочетает в себе оба обозначенных подхода, что позволяет им демонстрировать достаточную гибкость в отношении различных типов территорий.

В рамках подходов, исследующих ролевые особенности индивидов на микроуровне, поведение каждого отдельного пешехода моделируется на основе установленных общих правил. Такая методика универсальна и подходит для оценки различных ситуаций: закрытых пространств или необычных потоков

людей, в которых поведение отдельного индивида подвержено сильному влиянию геометрии, хаотичности, социальных предпочтений, локального и коллективного поведения других индивидов.

Совокупность наблюдаемых свойств на микроуровне может в дальнейшем трансформироваться в шаблон коллективного поведения как результат компромисса между конкурентными и кооперативными действиями индивидов. Наиболее типичной является ситуация, в которой локальные передвижения кого-либо, обусловленные стремлением к определённой цели, приводят к появлению нежелательных очагов концентрации людей. Причём склонность индивида повторять действия других в этих условиях способна спровоцировать давку и возникновение паники. Другими словами, такие приёмы моделирования позволяют отслеживать ситуации, в которых флуктуации поведения индивидов в толпе не могут быть объяснены простой совокупностью индивидуальных действий. Более того, эти моменты крайне трудно предугадать на интуитивном уровне или предусмотреть с высоты опыта, как отмечает К. Китазава в одной из своих работ [9].

Существует четыре основных подхода к моделированию поведения пешеходов: физико-математические модели, клеточные автоматы, теория массового обслуживания и многоагентные модели.

В основе **физико-математических моделей** лежат математические и физические уравнения. К примеру, одна из них строится на физической формуле движения, где условные пешеходы обладают такими характеристиками, как текущее местоположение и скорость. Понятие силы используется для объяснения движения пешеходов. В ходу такие показатели силы, как ускорение, эффекты отталкивания от границ и объектов, от других пешеходов, эффекты притяжения к иным группам и объектам.

Д. Хелбинг использовал понятия притяжения и отталкивания для моделирования микроповедения, разработал комплексные уравнения для различных вариантов поведения пешеходов. Эти разработки получили широкую известность



как концепция «социальных сил» [10], в рамках которой при моделировании учитывается ряд внутренних предпосылок определённых действий (движений) индивида, а также их последующее влияние на динамические атрибуты пешеходов (скорость, ускорение, интервалы) [11]. Он заметил, что потоки пешеходов обладают свойством собираться в толпы, а затем снова распадаться на отдельные потоки.

С. Хугендум и П. Бови применили те же базовые формулы для создания трёхуровневой модели, охватывающей процессы выбора действия, определения траектории следования и передвижения [12]. Эта модель предусматривает минимизацию издержек перемещения, она была востребована при анализе функций мультимодальных пересадочных узлов. Еще одна модель этого ряда опирается на статистические методы оценки потоков на определённых направлениях.

Физико-математические модели пешеходных потоков реализованы в таких программных продуктах, как PTV Vision®, Viswalk, Citilabs Cube Dynasim, Quadstone Paramics, SIMWALK.

Клеточные автоматы используются, когда на условном клеточном поле каждый пешеход занимает одну клетку и перемещается в соответствии с рядом простых правил в пределах этого поля. Подобный вариант традиционных моделей клеточных автоматов (частный случай матричных систем) предполагает, что состояние каждой клетки изменяется в зависимости от состояния окружающих её клеток, причем отсутствует явное движение. В этих моделях используются матрицы, в которых одну ячейку может занимать только один индивид, а условное кодирование больших территорий требует матриц высокой размерности.

Большинство моделей, в основе которых лежит данный принцип, имеют в виду подход Шрекенберга–Нагеля для моделирования дорожного потока с применением клеточных автоматов в качестве базовых инструментов [13]. В последнее время клеточные автоматы часто используются при моделировании поступательного движения толпы, покидающей массовые спортивные мероприятия [14].

Моделируемая среда представляется в виде двух слоёв: статического, на котором отображаются существующие выходы из помещений и с территорий, и динамического, содержащего данные об общем векторе движения толпы. Каждый индивид потребляет информацию на уровне своей собственной клетки, чтобы выбрать вектор дальнейшего движения.

Проблема моделей клеточных автоматов заключается в неопределённости действий в случае возникновения столкновения, так как такое состояние не представлено в традиционных моделях. Клеточные автоматы продемонстрировали свою эффективность для дезагрегированных моделей с минимальной вариативностью выбора действий. Модель Alp-Sim совмещает подход клеточных автоматов с совокупным моделированием среды, чтобы получить преимущества за счет отображения различных типов данных в виде набора карт, в особенности для целей планирования более высокого уровня, где одних клеточных решёток недостаточно [15].

Ряд исследователей добился значительных успехов в этой области. Так, В. Блю использовал принцип клеточных автоматов для создания модели пешеходных проходов с движением в двух направлениях [16]. Полученные им результаты свидетельствуют о том, что даже малый набор правил способен эффективно передать поведение пешеходов на микроуровне. Другой специалист, С. Сармади, совместил поведенческую модель, симулирующую действия отдельных пешеходов, и модель клеточных автоматов, симулирующую перемещение пешеходов на малых пространствах [18].

Третий вариант моделирования пешеходного движения опирается на **теорию массового обслуживания**. Здесь принято допущение, что все пешеходы находятся под контролем субъекта, который указывает им время и направление движения. Такой приём полезен для обобщённых моделей, поскольку позволяет свести воедино все необходимые данные. В подобных моделях для условного представления среды берутся основные элементы теории графов, где возможные коридоры движения представлены в виде рёбер,

а точки принятия решения — в виде вершин.

Программа PAXPORT, разработанная консалтинговой фирмой Халкроу, использовалась для моделирования перемещения людей в аэропортах, на железнодорожных вокзалах и станциях, в местах проведения массовых спортивных мероприятий [см., напр., 17]. Она отображает агрегированные данные о потоке и уровне организации пешеходного движения в рамках приёмов теории графов. Стоит отметить, однако, что методы теории массового обслуживания, как и методы клеточных автоматов, не нашли широкого применения в коммерческих программных продуктах.

Четвертый вид моделирования движения пешеходных потоков — **многоагентные модели**. Для них характерна оценка взаимодействия определённых индивидов между собой в заданной среде. Эти индивиды в модели — условные агенты, которые обладают восприимчивостью, способностью принимать решения, действовать и получать знания из среды.

Подход используется для экономического, социального, делового и логистического моделирования, где индивид постоянно взаимодействует с внешней средой и другими индивидами, а также обладает способностью самостоятельно принимать сложные решения. М. Бэтти выдвинул предположение, что многоагентные модели появились как серьёзная альтернатива более сложным и геометрическим подходам к пространственному моделированию [19]. Их возникновение обусловлено множеством причин, в том числе ввиду повышения качества имеющихся данных о существующем землепользовании, различных видах деятельности и потоках пешеходов.

Многоагентные модели рассматривают пешехода в качестве абсолютно независимого субъекта, обладающего способностями к познанию и изучению [20]. Сравнительный обзор различных подходов к компьютерному моделированию поведения масс людей во время эвакуации в условиях чрезвычайных происшествий представлен в работах С. Гвайнна и соавторов [21], а Д. Хелбинг делает

акцент на характер таких наблюдаемых явлений в поведении людей, как следование друг за другом по коридорам или колебания масс в местах сужения коридоров («бутылочных горлышках»), при возникновении затруднений и даже блокирования движения в чрезвычайных ситуациях [11].

В формализованном виде модель состоит из трёх основных компонентов: окружение индивида, механизм обновления, поведение пешехода. Каждая из этих составляющих существует в виде формализованных показателей, формул и логических выражений. К примеру, окружение индивида, то есть всё пространство, в пределах которого могут происходить взаимодействия, представляет собой сетку из клеток (сторона клетки — 40 см). Любая из клеток характеризуется определённым состоянием, которое указывает на занятость или незанятость клетки пешеходами или различными препятствиями:

$State(c): Cells \rightarrow \{Free, Obstacle, OnePed_i, TwoPeds_{ij}\}.$ (1)

Два последних показателя в формуле указывают на количество пешеходов в пределах одной клетки. Если пешеходов двое, то это говорит о высокой загруженности территории — наличии столпотворения, когда плотность потока выше, чем 6,25 человек на квадратный метр площади. Агенты, то есть пешеходы, закодированы в виде набора определённых условных обозначений:

$Ped = Id, Group, State = position, oldDir, Dest,$ (2)

где *Id* — идентификационный номер агента; *Group* — группа, к которой они относятся (если таковая сформирована); *State* — состояние агента; *Position* — текущее положение агента; *OldDir* — предыдущее действие агента; *Dest* — пункт назначения, конечная цель совершаемых агентом действий.

Один из примеров применения многоагентных моделей — «Legion» — запатентованное программное обеспечение, специализирующееся на моделировании поведения масс людей. Оно было разработано как модель «входа и выхода». Каждый индивид в ней представлен в виде виртуального субъекта, способного



воспринимать окружающую среду и в соответствии с этим принимать решения в отношении направления дальнейшего движения. Модель, в частности, используется для анализа ситуаций на железнодорожных станциях, сценариев эвакуации. Более того, она была применена в ходе подготовки Олимпийских игр в Сиднее [17]. Другим часто используемым программным продуктом для агентного моделирования пешеходного движения остается «Steps» компании Mott MacDonald [22].

ВЫВОДЫ

В статье рассмотрены различные подходы к моделированию поведения пешеходов в различных условиях. Была предложена классификация методов анализа и моделирования пешеходных потоков, в рамках которой все модели движения таких потоков разделены на микро- и макромоделю.

Дана оценка существующим подходам и алгоритмам моделирования, а также используемым при этом программным продуктам PTV Vision®, Viswalk, Citilabs Cube Dynasim, Quadstone Paramics, SIMWALK.

На основе сделанного анализа исследователи могут выбрать те или иные алгоритмы и программные продукты для решения реальной инженерной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ставничий Ю. А. Транспортные системы крупных городов США: Обзор / ЦНТИ — М., 1979 г. — 57 с.
2. Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов. — М.: Логос, 2013. — 188 с.
3. Якимов М. Р. Научная методология формирования эффективной транспортной системы крупного города / Дис... док. техн. наук. — М.: МАДИ, 2011. — 418 с.
4. Трофименко Ю. В., Якимов М. Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов. — М.: Логос, 2013. — 464 с.
5. Якимов М. Р. Концепция транспортного планирования и организации движения в крупных городах. — Пермь: ПГТУ, 2011. — 175 с.
6. Бугаев А. С., Буслаев А. П., Яшина М. В. Дорожное движение в мегаполисах: проблемы и перспективы решения. — Часть 1: Общие вопросы. — М.: Технополиграфцентр, 2009. — 184 с.
7. Семенов В. В. Смена парадигмы в теории транспортных потоков. — М., 2006. — 32 с.
8. Harney, D. Pedestrian modeling: current methods and future directions. *Road & Transport Research*, 2002, 11 (4), pp. 2–12.
9. Kitazawa, K., Batty M. Pedestrian behavior modeling: An application to retail movements using a genetic algorithm. Paper for: Seventh international conference on design and decision support systems in architecture and urban planning. Eindhoven, 2004. [Электронный ресурс http://www.casa.ucl.ac.uk/kay/paper/DDSS040703_e.pdf]. Доступ 22.04.2015.
10. Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I. J., Bolay, K. Self organizing pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28, pp. 361–383.
11. Helbing, D., Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 1995, Vol. 51, No 5, pp. 4282–4286.
12. Hoogendoorn, S. P., Bovy, P.H.L. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B*, 2004, pp. 169–190.
13. Nagel, K. and Schreckenberg, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 1992, 2 (12), pp. 2221–2230.
14. Henein, C.M., White, T. Agent-Based Modelling of Forces in Crowds. In: Davidsson, P., Logan, B., Takadama, K. (eds.) MABS2004. LNCS (LNAI), Vol. 3415, pp. 173–184. Springer, Heidelberg (2005).
15. Gloor, C., Stucki, P. and Nagel, K. Hybrid techniques for pedestrian simulations. In: Sloot, P., Chopard, B. & Hoekstra, A. (Eds.) *Cellular automata. 6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2004*, Amsterdam, The Netherlands, October 25–28, 2004. *Proceedings. Lecture notes in computer science*, Vol. 3305, 2004, pp.581–590.
16. Blue, V. J., Adler, J. L. Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B*, 2001, pp. 293–312.
17. Электронный ресурс: <http://www.legion.com/news/legion-acquires-paxport>. Доступ 22.04.2015.
18. Sarmady, S., Haron, F., Talib, A. Z. Hj. Multi-agent simulation of circular pedestrian movements using cellular automata. *Second Asia Intern. Conf. on Modelling & Simulation*, IEEE, 2008, pp. 654–659.
19. Batty, M. Agent-based pedestrian modeling. *Environment and planning B: Planning and Design*, 2001, Vol. 28, pp. 321–326.
20. Koh, W. L., Lin L., Zhou S. Modelling and simulation of pedestrian behavior. *Proceedings of the 22nd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation*, IEEE Computer Society, 2008, pp. 43–50.
21. Gwynne, S., Gale, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., Filippidis, L. A. Review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment*, 1999, 34, pp. 741–749.
22. Электронный ресурс. Веб-сайт Mott MacDonald Group Limited: <http://www.steps.mottmac.com/>. Доступ 22.04.2015.

Координаты автора: Якимов М. Р. — auto@perm.ru.

Статья поступила в редакцию 19.02.2015, актуализирована 31.03.2015, принята к публикации 27.06.2015.

GENERAL APPROACH TO MODELING OF PEDESTRIAN FLOWS

Yakimov, Mikhail R., National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

ABSTRACT

The author considers two approaches to modeling and analysis of pedestrian behavior in typical urban environment. One approach is based on civil engineering, the other one is focused on urban geography. Those two approaches are described by four models

of pedestrian behavior, which are described respectively by physical and mathematical terms, by multi-agent, cellular automata, and queuing theory. A description of each of them is given, the specifics of the application are described, and examples of models implementation in software products are provided.

Keywords: modeling, traffic management, pedestrian flows, patterns of pedestrian behavior, civil engineering, urban geography.

Background. Analysts of transport systems, particularly urban systems, face serious difficulties in formalizing and positioning of their research in the professional field. This is primarily due to the interpretation of the term "model" and the modeling process in general. Currently, there is a need for some ordering of key terms and definitions used in development, evaluation and comparison of algorithms for simulation of transport and pedestrian flows. With regard to pedestrian flows, the designated problem is as relevant as ever. The approaches to the analysis of their movements are so different in nature, as different are attitudes towards them of different categories of stakeholders (authorities, planners, public and professional communities). There is a need for a clear classification of not so much algorithms as of common approaches to the analysis and modeling of pedestrian traffic.

There are quite many proven methods of analysis and modeling of transport and pedestrian flows. With regard to simulation of pedestrian traffic [1-16; 18-21], they are implemented using different principles, and the least have identified two basic approaches to research.

The first of them is civil engineering, which is used to build a model of transport demand and serves as a base during subsequent construction of transport models in general, that is, models of interaction between transport demand and transport supply. Models of this type in civil engineering are used to meet challenges of designing new transport infrastructure. The result of the construction of transport demand model is a matrix of correspondence and a matrix of costs. Cells of matrices determine the number of people traveling by different routes. The process of modeling the movement of people is based on a standard four-step transport model. Such models are macroscopic in nature, as lower-order elements in them are locations, visited by individuals, as well as routes that are designed for this purpose.

The second approach is based on the architecture and urban geography. Adherents of this approach have the interest to understand how the location of places of attraction affects foot traffic. Such models are generally microscopic, with more details. Generally, they are designed for smaller areas, although sometimes can be extrapolated to the territory of the whole city. Some models combine also two approaches identified, allowing them to demonstrate sufficient flexibility with respect to different types of territories.

Within approaches, exploring role-based features of individuals at the micro level, the behavior

of every single pedestrian is modeled on the basis of pre-defined general rules. This methodology is universal and suitable for evaluation of different situations: closed spaces or unusual flow of people, in which the behavior of an individual is heavily influenced by geometry, randomness, social preferences, local and collective behavior of other individuals.

Objective. The objective of the authors is to consider approaches to modeling and analysis of pedestrian behavior and to generalize the methods which are commonly used for different purposes.

Methods. The author uses general scientific and engineering methods, simulation, modeling, comparative analysis, assessment.

Results. The totality of observed properties at the micro level can be further transformed into a pattern of collective behavior as a result of a compromise between competitive and cooperative actions of individuals. The most typical is the situation in which the local movement of people caused by the desire for a particular purpose, lead to the appearance of unwanted crowded places, and the tendency of an individual to repeat actions of others can lead to stampede and panic. In other words, these modeling techniques allow monitoring the situation in which growing crowd fluctuations cannot be explained by a simple set of individual actions. Moreover, these issues are extremely difficult to predict by intuition or to specify at a height of experience as K. Kitazawa says in one of his works [9].

There are four basic approaches to modeling pedestrian behavior: physical and mathematical models, cellular automata, queuing theory and multi-agent models.

The basis of **physical and mathematical models** is mathematical and physical equations. For example, one of them is built on the physical formula of movement where conventional pedestrians have such features as current location and speed. The concept of power is used to explain movement of pedestrians. Such indicators of force are used as acceleration, effects of repulsion from borders and objects, from other pedestrians, effects of attraction to other groups and objects.

D. Helbing has used concepts of attraction and repulsion for modeling microbehavior, developed complex equations for different behaviors of pedestrians. These developments have been widely known as the concept of "social forces" [10], in which the simulation takes into account a number of internal prerequisites for certain actions (movements) of the individual, and their subsequent impact on dynamic attributes of pedestrians



(speed, acceleration, intervals) [11]. He remarked that the streams of pedestrians have the ability to gather in the crowd, and then split into separate streams.

S. Hoogendoorn and P. Bovy used the same basic formula to create a three-level model covering processes of action selection, determination of the trajectory of movement [12]. This model is aimed at minimizing travel costs, it has been claimed in the analysis of functions of multimodal interchange hubs. Another model of this series is based on statistical methods for estimating flows on certain routes.

Physical and mathematical models of pedestrian flows are implemented in such popular software products, such as PTV Vision® Viswalk, Citilabs Cube Dynasim, Quadstone Paramics, SIM-WALK.

The second model is based on the use of **cellular automata** when in a conventional cellular field each pedestrian takes one single cell and moves in accordance with a number of simple rules within this field. Variant of traditional models of cellular automata (special case of matrix systems) suggests that the state of each cell varies depending on the state of the cells surrounding it, with no apparent movement. These models use a matrix in which one cell can be occupied only by one individual but conditional coding of large areas requires matrices of high dimensionality.

Most of the models, which are based on this principle, mean Schrekenberg-Nagel approach for modeling traffic flow using cellular automata as the underlying instruments [13]. Recently, cellular automata are often used in the simulation of translational motion of the crowd, leaving the mass sports activities [14]. Simulated environment is represented in the form of two layers: static, which displays the current exists of the premises and territories and dynamic, containing data on the total vector of the crowd motion. Each individual consumes information at the level of its own cell to select a further motion vector.

The problem of cellular automata models is the uncertainty of action in case of crowds, since such a state is not represented in traditional models. Cellular automata have demonstrated their effectiveness for disaggregated models with minimal variability of choices. Model Alp-Sim approach combines approach of cellular automata with a combined simulation of environment to get benefits due to display of different types of data as a set of maps, especially for planning purposes at a higher level, where block lattices are not enough [15].

Several researchers have made significant progress in this area. V. Blue used the principle of cellular automata to create a model of pedestrian walkways his movement in two directions [16]. The results of his work suggest that even a small set of rules can effectively convey the behavior of pedestrians at the micro level. Another expert, S. Sarmady, combined behavioral model simulating the actions of individual pedestrian and model of cellular automata simulating the movement of pedestrians in small spaces [18].

The third variant of modeling the pedestrian traffic is **queuing theory**. It is assumed here that all pedestrians are controlled by a subject which indicates them time and direction of movement. This technique is useful for generalized models,

as it allows bringing together all necessary data. In such models for a schematic representation of the environment the basic elements of graph theory are taken, where the possible movement corridors are presented in the form of ribs and decision points – in the form of the vertices.

Program PAXPORT, developed by Halcrow Group Limited was used to simulate the movement of people at airports, railway stations and stations, in the places of mass sports activities [see, e.g., 17]. It displays aggregate data on flow and level of organization of pedestrian flow within techniques of graph theory. It is worth noting, however, that the methods of queuing theory, as well as methods of cellular automata, are not widely used in commercial software products.

The fourth kind of modeling movement of pedestrian flows is **multi-agent models**. They are characterized by evaluation of the interaction of certain individuals to each other in a given environment. These individuals in the model are conventional agents who possess susceptibility, ability to make decisions, to act and to receive knowledge from the environment.

The approach is used for economic, social, business and logistics simulation, where the individual is constantly interacting with the environment and other individuals, and also has the ability to make difficult decisions. M. Batty, suggests that multi-agent models appeared as a serious alternative to the more complex and geometric approaches to spatial modeling [19]. Their appearance was caused by many reasons, including due to improving the quality of existing data on the existing land use, different activities and pedestrian flows.

Multi-agent models consider a pedestrian as a fully independent subject with an cognitive and learning abilities [20]. A comparative overview of different approaches to computer modeling of the behavior of the masses of people during an evacuation in emergency incidents is presented in the works of S. Gwynne and coauthors [21], while D. Helbing focuses on the nature of these phenomena observed in the behavior of people like following each other through the corridors or fluctuations in the masses in places of corridors narrowing («bottlenecks»), when difficulties arise, and even blocking of traffic in emergency situations [11].

In the formalized form a model consists of three main components: environment of the individual, update mechanism, behavior of pedestrians. Each of these components exists in the form of formal parameters, formulas, and logical expressions. For example, the environment of the individual, that is, all the space within which the interaction can take place, is a grid of cells (cell side is 40 cm). Any of the cell is characterized by a certain condition, which indicates occupancy or non-occupancy of a cell by pedestrians or different obstacles:

State (c): Cells $\rightarrow \{\text{Free, Obstacle, OnePed}_i, \text{TwoPeds}_j\}$. (1)

The last two indicators in the formula indicate the number of pedestrians within the same cell. If there are two pedestrians, then it indicates a high load of area – the presence of pandemonium when the flux density is higher than 6,25 people per square meter. Agents, i.e. pedestrians, are encoded as a set of specific symbols:

$Ped = Id, Group, State = position, oldDir, Dest, (2)$

where *Id* is identification number of the agent; *Group* is a group to which they belong (if formed); *State* is state of the agent; *Position* is current position of the agent; *OldDir* is previous action of the agent; *Dest* is destination, the ultimate goal of agent's actions.

One example of the practical application of multi-agent models is «Legion» – proprietary software, which specializes in modeling the behavior of the masses of people. It has been developed as a model of «input and output». Each individual is presented in the form of a virtual subject to perceive the environment, and in accordance with this, to make decisions about the direction of further movement. The model is particularly useful for analyzing the situation in railway stations, evacuation scenarios. Moreover, it has been applied in the preparation of the Olympic Games in Sydney [17]. Another commonly used software product for agent-based modeling of pedestrian traffic is «Steps» of company Mott MacDonald [22].

Conclusions. The article deals with different approaches to modeling of pedestrian behavior in various conditions. Classification of methods of analysis and modeling of pedestrian traffic flow was offered, in which all models of the movement of the relevant flows are divided into micro and macro models. The article offers an assessment of existing approaches and algorithms of modeling of the movement of pedestrian flows, as well as of relevant software products PTV Vision® Viswalk, CitiLabs Cube Dynasim, Quadstone Paramics, SIMWALK.

Using the proposed analysis the researchers can select algorithms and software products of their choice which are most suitable for the solution of a real engineering problem.

REFERENCES

1. Stavniichiy, Yu. A. Transport systems of major US cities: Overview [Transportnye sistemy krupnykh gorodov SShA: Obzor]. Moscow, CNTI, 1979, 57 p.
2. Yakimov, M. R. Transport planning: creation of transport models of cities [Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnykh modeley gorodov]. Moscow, Logos publ., 2013, 188 p.
3. Yakimov, M. R. Scientific methodology of building an efficient transport system of a large city [Nauchnaya metodologiya formirovaniya effektivnoy transportnoy sistemy krupnogo goroda]. D. Sc. (Eng.) thesis. Moscow, MADI University, 2011, 418 p.
4. Trofimenko, Yu. V., Yakimov, M. R. Transport planning: formation of efficient transport systems of large cities [Transportnoe planirovanie: formirovanie effektivnykh transportnykh sistem krupnykh gorodov]. Moscow, 2013, 464 p.
5. Yakimov, M. R. The concept of transport planning and traffic organization in major cities [Konceptiya transportnogo planirovaniya i organizatsii dvizheniya v krupnykh gorodakh]. Perm, Perm State Technical University, 2011, 175 p.
6. Bugaev, A. S., Buslaev, A. P., Yashina, M. V. Road traffic in metropolitan areas: problems and prospects of

solutions. Part 1. General questions [Dorozhnoe dvizhenie v megapolisah: problemy i perspektivy resheniya. Chast' 1. Obshhie voprosy]. Moscow, Tehnopoligrafsentr publ., 2009, 184 p.

7. Semenov, V. V. A paradigm shift in the theory of traffic flows [Smena paradigmy v teorii transportnykh potokov]. Moscow, 2006, 32 p.

8. Harney, D. Pedestrian modeling: current methods and future directions. *Road & Transport Research*, 2002, 11 (4), pp. 2–12.

9. Kitazawa, K., Batty M. Pedestrian behavior modeling: An application to retail movements using a genetic algorithm. Paper for: Seventh international conference on design and decision support systems in architecture and urban planning. Eindhoven, 2004. [Electronic data http://www.casa.ucl.ac.uk/kay/paper/DDSS040703_e.pdf]. Last accessed 22.04.2015.

10. Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I. J., Bolay, K. Self organizing pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28, pp. 361–383.

11. Helbing, D., Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 1995, Vol. 51, No 5, pp. 4282–4286.

12. Hoogendoorn, S. P., Bovy, P.H.L. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B*, Vol. 38, 2004, pp. 169–190.

13. Nagel, K. and Schreckenberg, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 1992, 2 (12), pp. 2221–2230.

14. Henein, C.M., White, T. Agent-Based Modelling of Forces in Crowds. In: Davidsson, P., Logan, B., Takadama, K. (eds.). MABS2004. Springer, Heidelberg (2005). LNCS (LNAI), vol. 3415, pp. 173–184.

15. Gloor, C., Stucki, P. and Nagel, K. Hybrid techniques for pedestrian simulations. In: Sloot, P., Chopard, B. & Hoekstra, A. (Eds). Cellular automata. 6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2004, Amsterdam, The Netherlands, October 25–28, 2004. Proceedings. *Lecture notes in computer science*, Vol. 3305, 2004, pp. 581–590.

16. Blue, V. J., Adler, J. L. Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research*, Part B35, 2001, pp. 293–312.

17. Electronic resource: <http://www.legion.com/news/legion-acquires-paxport>. Last accessed 22.04.2015.

18. Sarmady, S., Haron, F., Talib, A. Z. Hj. Multi-agent simulation of circular pedestrian movements using cellular automata. Second Asia Intern. Conf. on Modelling & Simulation, IEEE, 2008, pp. 654–659.

19. Batty, M. Agent-based pedestrian modeling. *Environment and planning B: Planning and Design*, 2001, Vol. 28, pp. 321–326.

20. Koh, W. L., Lin L., Zhou S. Modelling and simulation of pedestrian behavior. Proceedings of the 22nd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation, IEEE Computer Society, 2008, pp. 43–50.

21. Gwynne, S., Gale, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., Filippidis, L. A. Review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment*, 1999, 34, pp. 741–749.

22. Electronic source. Site of Mott MacDonald Group Limited: <http://www.steps.mottmac.com/>. Last accessed 22.04.2015.

Information about the author:

Yakimov, Mikhail R. – D.Sc. (Eng.), professor of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, auto@perm.ru.

Article received 19.02.2015, revised 31.03.2015, accepted 27.06.2015.

