

## ИНФОРМАТИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 106–115  
*Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 106–115

<https://mmi.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-1-106-115>

EDN: TLQGGD

Научная статья  
УДК 001.891.573

### Мультиагентное моделирование эвакуации из помещений с учетом столкновений агентов

В. О. Гамаюнова<sup>1</sup>, А. С. Богомолов<sup>1,2,3</sup>✉,  
В. А. Кушников<sup>1,2</sup>, В. А. Иващенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук», Россия, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт прикладной математики и механики», Россия, 283048, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 74

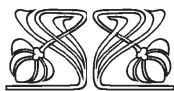
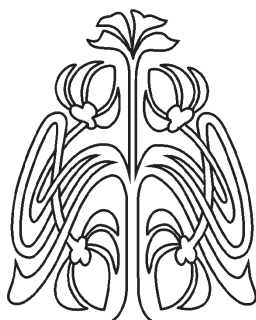
**Гамаюнова Виктория Олеговна**, магистрант кафедры математической кибернетики и компьютерных наук, 29vikagamaiunova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-8367-9742>

**Богомолов Алексей Сергеевич**, доктор технических наук, <sup>1</sup>профессор кафедры математической кибернетики и компьютерных наук; <sup>2</sup>ведущий научный сотрудник лаборатории системных проблем управления и автоматизации в машиностроении Института проблем точной механики и управления; <sup>3</sup>ведущий научный сотрудник отдела теории управляющих систем, bogomolov@iptmuran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6972-3181>, SPIN: 3689-2420, AuthorID: 109940

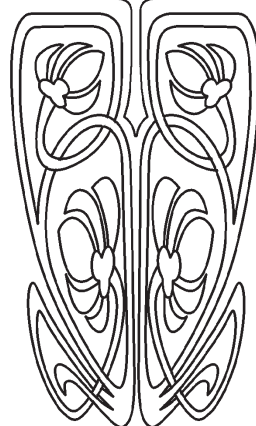
**Кушников Вадим Алексеевич**, доктор технических наук, <sup>1</sup>профессор кафедры математической кибернетики и компьютерных наук; <sup>2</sup>главный научный сотрудник лаборатории комплексных научных исследований, kushnikoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9195-2546>, SPIN: 4755-5063, AuthorID: 10353

**Иващенко Владимир Андреевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем точной механики и управления, ivaiptmu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0073-5838>, SPIN: 5426-0852, AuthorID: 10354

**Аннотация.** Предложена программная реализация развитой мультиагентной модели эвакуации людей различных возрастных групп из помещений сложной формы. Реализованная модель отличается возможностью учета физических столкновений агентов, их возрастных габаритов в соответствии с методиками из приказа МЧС России от 2022 г. В поведении агентов заложено целенаправленное стремление к выходу, при этом при возникновении заторов они могут ожидать, пока место для движения освободится. Это позволяет более



Научный  
отдел





точно учесть особенности организованной эвакуации. Для моделирования столкновений агентов друг с другом и с препятствиями используется модель частично упругого удара. Была проведена серия экспериментов для различных возрастных групп: дети, подростки, взрослые и смешанные группы. Для каждой возрастной группы было рассчитано и усреднено время полной эвакуации из помещения. Программа предоставляет возможность визуализировать процесс эвакуации людей, задавая их начальную расстановку случайно или вручную. Полученные результаты были сопоставлены с данными аналогичного эксперимента по методикам из приказа МЧС России от 2009 г. Сравнение показало, что в данном эксперименте дети и подростки эвакуируются примерно с такой же скоростью. Однако группа взрослых людей достигает выхода быстрее. Результаты сравнения позволили предположить, что особенности используемого мультиагентного подхода с учетом способности агентов ожидать выхода позволяет увеличивать степень организованности моделируемого поведения группы, что дает возможность существенно сократить время эвакуации (более чем в два раза для 100 человек). Полученные и перспективные результаты проекта предназначены для использования в разработке цифровых двойников процессов эвакуации из помещений коммерческого и общественного назначения.

**Ключевые слова:** моделирование, эвакуация, мультиагентная модель, возрастные группы людей, чрезвычайные ситуации, цифровой двойник

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FREM-2023-003).

**Для цитирования:** Гамаюнова В. О., Богомолов А. С., Кушников В. А., Иващенко В. А. Мультиагентное моделирование эвакуации из помещений с учетом столкновений агентов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 106–115. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-1-106-115>, EDN: TLQGGD

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## Multi-agent modeling of evacuation from premises with consideration of agent collisions

V. O. Gamayunova<sup>1</sup>, A. S. Bogomolov<sup>1,2,3✉</sup>, V. A. Kushnikov<sup>1,2</sup>, V. A. Ivashchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia

**Viktoria O. Gamayunova**, 29vikagamaiunova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-8367-9742>

**Aleksey S. Bogomolov**, bogomolov@iptmuran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6972-3181>, SPIN: 3689-2420, AuthorID: 109940

**Vadim A. Kushnikov**, kushnikoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9195-2546>, SPIN: 4755-5063, AuthorID: 10353

**Vladimir A. Ivashchenko**, ivaipmtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0073-5838>, SPIN: 5426-0852, AuthorID: 10354

**Abstract.** The article proposes a software implementation of a developed multi-agent model for the evacuation of people of various age groups from premises of a complex shape. The model is distinguished by the possibility of taking into account the physical collisions of agents, their age dimensions in accordance with the methods from the order of the Ministry of Emergency Situations of Russia from 2022. The behavior of agents is based on a purposeful desire to exit. At the same time, in the event of congestion, they can wait until a place for movement is vacated. To simulate the collisions of agents with each other and with obstacles, we use the model of partially elastic impact. We carried out a series of experiments for different age groups: children, teenagers, adults and mixed groups. The total evacuation time from the premises was calculated and averaged for each age group. The program provides an opportunity to visualize the process of evacuation of people, set their initial arrangement randomly or manually. We



compared the obtained results with the data of a similar experiment using the methods from the order of the Russian Emergencies Ministry of 2009. The comparison showed that in this experiment, children and teenagers are evacuated at about the same speed. However, a group of adults reaches the exit faster. The results of the comparison suggested that the features of the multi-agent approach used, taking into account the ability of agents to expect an exit, make it possible to increase the degree of organization of the modeled behavior of the group. This makes it possible to significantly reduce the evacuation time (more than twice for 100 people). The obtained and promising results of the project are intended for use in the development of digital twins of evacuation processes from commercial and public premises.

**Keywords:** simulation, evacuation, multi-agent model, age groups of people, emergencies

**Acknowledgements:** The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task (project No. FREM-2023-003).

**For citation:** Gamayunova V. O., Bogomolov A. S., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A. Multi-agent modeling of evacuation from premises with consideration of agent collisions. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 106–115 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-1-106-115>, EDN: TLQGGD

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Оперативная и своевременная эвакуация людей из помещений при чрезвычайных ситуациях является одной из ключевых задач в области обеспечения безопасности населения. В подготовке помещений к возможным чрезвычайным ситуациям важную роль играет математическое моделирование процессов эвакуации в различных условиях. Моделирование эвакуации позволяет оценить возможные сценарии действий в случае чрезвычайной ситуации, максимальное допустимое количество людей в помещении, время полной эвакуации и другие важные факторы. Поэтому данному вопросу посвящено достаточно большое количество научных публикаций и нормативных документов в различных странах. Так, обзор [1] освещает эволюцию методов расчета процесса эвакуации людей при пожаре начиная с 30-х гг. прошлого века. Рассматриваются такие математические модели, как графоаналитический метод расчета и алгоритмы имитационно-стохастического моделирования. Отмечен переход от моделирования движения потока людей к исследованию индивидуально-поточного движения с учетом эмоционального и физического состояния.

В [2] исследуются известные случаи пожаров, возможное влияние своевременного оповещения и оперативной эвакуации, а также опасных факторов пожара на общее время эвакуации и последствия для здоровья людей.

В настоящее время для моделирования эвакуации людей из ограниченных пространств довольно часто используются модели социальной силы. Модель социальной силы движения толпы, или модель Хелбинга [3,4], использует аппарат для анализа молекулярной и реактивной динамики, что позволяет описать образование скоплений людей и вовлечение их в панику. Индивидуальные движения людей описываются с помощью сил отталкивания и притяжения. Программная реализация данной модели описана в [5]. Данная модель существенно упрощает описание поведения людей, в то время как процесс моделирования оказывается достаточно ресурсозатратным.

В [6] исследуются стратегии эффективной эвакуации людей с ограниченными возможностями. Рассматриваются типы уязвимости с точки зрения расстояния от выхода и скорости передвижения. Исследуется влияние предоставления преимуществ при эвакуации уязвимым людям на эвакуацию в целом при различном начальном количестве эвакуируемых. Однако в указанной работе апробация предложенных стратегий приводится при использовании модели социальных сил, где отсутствует механизм предотвращения столкновений, что приводит к менее реалистичному моделированию процесса эвакуации.



В [7] разработана интегрированная модель эвакуации из помещения, учитывающая индивидуальное влияние опасных факторов пожара на каждого человека, а также возникновение стресса, влияющего на принятие решений и скорость передвижения людей. В программной реализации данные импортируются из симулятора пожара FDS на каждом модельном шаге и синхронизируются с симуляцией эвакуации. Полученные в исследовании результаты показывают, что эвакуация на ранней стадии развития пожара создает меньше стресса для эвакуируемых и приводит к более быстрой эвакуации.

Статья [8] описывается моделирование эвакуации из высотных зданий с использованием модели клеточного автомата. При этом учитывается актуальный для высотных зданий фактор усталости, когда агенты со временем замедляются.

В [9] предлагается адаптивная система управления эвакуацией, в которой предварительно обученные лидеры перемещаются с заданной скоростью и следят за указаниями на специальных браслетах, являющихся индикаторами оптимального выхода, к которому следует двигаться. Остальные агенты знают о необходимости следовать указаниям ближайших лидеров. Выдвигается предположение, что в чрезвычайных ситуациях получение инструкций от человека особенно важно для содействия скоординированной эвакуации и повышения безопасности.

В статье [10] представлены результаты исследования моделирования эвакуации людей разных возрастных групп из помещений, представляемых как поле клеточного автомата. Перемещение людей осуществляется по свободным от препятствий и других людей клеткам. Поиск направления к выходу осуществляется на основе предварительной рассчитанной ее удаленности от выхода. Однако исследование выполнено с соблюдением методик из приказа МЧС<sup>1</sup> 2009 г., который в настоящее время утратил силу и заменен на приказ<sup>2</sup> 2022 г. с другими рекомендациями по учету размеров проекций людей при эвакуации. Кроме того, используемая в статье модель эвакуации не учитывает столкновение людей с препятствиями и друг с другом.

Физические столкновения людей учитываются в модели упругого удара в работе [11], где предлагаются результаты интегрированного моделирования распространения опасных факторов пожара и эвакуации людей. Однако в этой работе не исследованы процессы эвакуации без пожара (по иным причинам) и также с учетом возможного преобладания лиц младшего, среднего и старшего возраста и рекомендаций МЧС РФ на этот счет.

В силу сказанного актуальной является задача математического моделирования эвакуации людей различных возрастных групп с учетом их физических столкновений и сравнения результатов с полученными ранее. Для этой цели разработан программный комплекс, использующий описанные ниже математические модели и алгоритм.

## 1. Используемые математические модели

В настоящем исследовании используется программное обеспечение на основе математической модели, предлагаемой и апробированной в [11–13]. Модель определяет правила выбора агентами скорости и направления движения на основании заранее просчитанных векторов, задающих направление к ближайшему выходу. Учитываются физические взаимодействия их друг с другом и с препятствиями, столкновения агентов рассматриваются как частично упругий удар [14].

При создании основной модели задается множество стен помещения, а также множество эвакуационных зон, помещение разбивается на множество клеток  $c_{ij}$ . Человек в помещении представляется проекцией в виде круга и имеет следующие параметры: вектор координат

<sup>1</sup>Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 30.06.2009 г. № 382. Москва : МЧС России, 2009. 48 с.

<sup>2</sup>Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 14.11.2022 г. № 1140. Москва : МЧС России, 2022. 65 с.

$x(t)$ ; радиус проекции  $r$ , зависящий от рассматриваемой возрастной группы; масса  $m$  — случайная равномерно распределенная величина на отрезке 60–100 кг; вектор скорости  $v(t)$  и ускорения —  $a(t)$ ; максимально возможная скорость и ускорение  $v_{\max}$  и  $a_{\max}$  — случайная равномерно распределенная величина на отрезках 1–2 м/с и 1–2 м/с<sup>2</sup> соответственно. В начальный момент скорость и ускорение равны нулю.

Изменение координат местоположения людей описывается следующим образом:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t.$$

Скорость в последующий момент времени определяется так:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t)\Delta t.$$

Изменение скорости движения при столкновении двух людей рассчитывается по формулам

$$u_{1n} = -\epsilon v_{1n} + (1 + \epsilon) \frac{m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n}}{m_1 + m_2}, \quad u_{2n} = -\epsilon v_{2n} + (1 + \epsilon) \frac{m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n}}{m_1 + m_2},$$

где  $\epsilon$  — коэффициент восстановления при частично упругом ударе,  $v_{1n}$  и  $v_{2n}$  — нормальные проекции скоростей движения агентов к плоскости соударения до удара, а  $u_{1n}$  и  $u_{2n}$  — после удара;  $m_1$  и  $m_2$  — массы сталкивающихся агентов.

При столкновении агента со стеной проекция его скорости движения, параллельная стене, не изменяется, другая меняет знак на противоположный и уменьшает свое значение согласно коэффициенту  $\epsilon$ .

Ускорение агента принимается равным нулю, если он движется с оптимальной скоростью, и максимальным в противоположном случае, что обусловливается стремлением агента как можно скорее покинуть помещение. Если на пути нет препятствий, то  $|v_{opt}| = v_{\max}$ , где  $v_{opt}(t)$  — оптимальная скорость движения, для расчета направления вектора  $v_{opt}(t)$  в каждой клетке помещения определяется вектор  $e$ , который задает направление к ближайшему выходу. Алгоритм вычисления вектора  $e$  описан в [13].

Предположим, что центр проекции агента находится в клетке  $c_{ij}$ , тогда для этой клетки рассчитываются расстояния  $l(\alpha)$  до ближайшего препятствия в направлении движения под углом  $\alpha$  к вектору  $e$ , где  $\alpha \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ . Тогда модуль оптимальной скорости под углом  $\alpha$  к вектору  $e$  вычисляется по формуле

$$v_{opt}(\alpha) = \begin{cases} v_{\max}, & l_{\alpha} \geq L + r, \\ \frac{v_{\max}(l_{\alpha} - r)}{L}, & r \leq l_{\alpha} \leq L + r, \\ 0, & l_{\alpha} \leq r, \end{cases}$$

где  $L = 2$  м — критическое расстояние.

Далее вводится функция  $f(\alpha) = v_{\alpha opt}(\alpha) \cos(\alpha)$  и оптимальным выбирается тот угол  $\alpha$ , при котором значение функции  $f(\alpha)$  максимально. Таким образом, человек, имея угол обзора 180°, определяет в поле своего зрения наилучшее направление движения.

Отличительной особенностью реализации предложенной в [11] модели в данном исследовании является учет того, что в случае скопления людей движение в любом из направлений под углом  $\alpha$  к вектору  $e$  может оказаться невозможным. В таком случае предполагаем, что человек аналогично ищет наилучший  $v_{opt}$  в противоположном направлении. Такой подход обусловлен стремлением человека обойти скопление людей, движущихся к выходу, и быстрее добраться до выхода. В случае невозможности движения в любом из направлений вокруг себя человек останавливается и ждет, когда освободится пространство, что несколько уменьшает эффект разброса, возникающий от упругих ударов в модели [11]. Блок-схема разработанной программы представлена на рис. 1, фрагмент программы, отмеченный пунктирной линией, исполняется для каждого агента.

В данной статье мы не рассматриваем влияние факторов пожара, предполагая, что анализируется эвакуация по более общим причинам (тренировочная эвакуация, эвакуация в связи с сообщением о стихийном бедствии, угрозе взрыва и др.).



## 2. Результаты вычислительных экспериментов

При проведении эксперимента были учтены возрастные группы эвакуируемых людей: дети дошкольного возраста, дети и подростки школьного возраста, люди молодого и среднего возраста со средней площадью горизонтальной проекции 0.03, 0.06 и 0.1 м<sup>2</sup> соответственно (Приказ МЧС России от 14.11.2022 г. № 1140). Также, была смоделирована эвакуация смешанной группы. Экран работы программы показан на рис. 2.

Зависимость времени эвакуации от числа людей исследовалась в прямоугольном помещении размером 6 на 10 метров с единственным выходом аналогичном помещению, рассматриваемому в [10]. Проводились эксперименты для начального количества эвакуируемых людей от 5 до 100 для каждой возрастной группы. Для каждого значения количества людей эксперимент был проведен 20 раз, итоговое время эвакуации рассчитывалось путем усреднения полученных значений. Результаты вычислений представлены на рис. 3.

Как следует из полученного результата, при малом количестве людей (до 10 человек) время полной эвакуации различается незначительно. Эвакуация смешанной группы людей происходит за время, близкое к эвакуации группы подростков. С увеличением числа эвакуируемых большое значение для времени эвакуации имеет площадь проекции людей разного возраста.

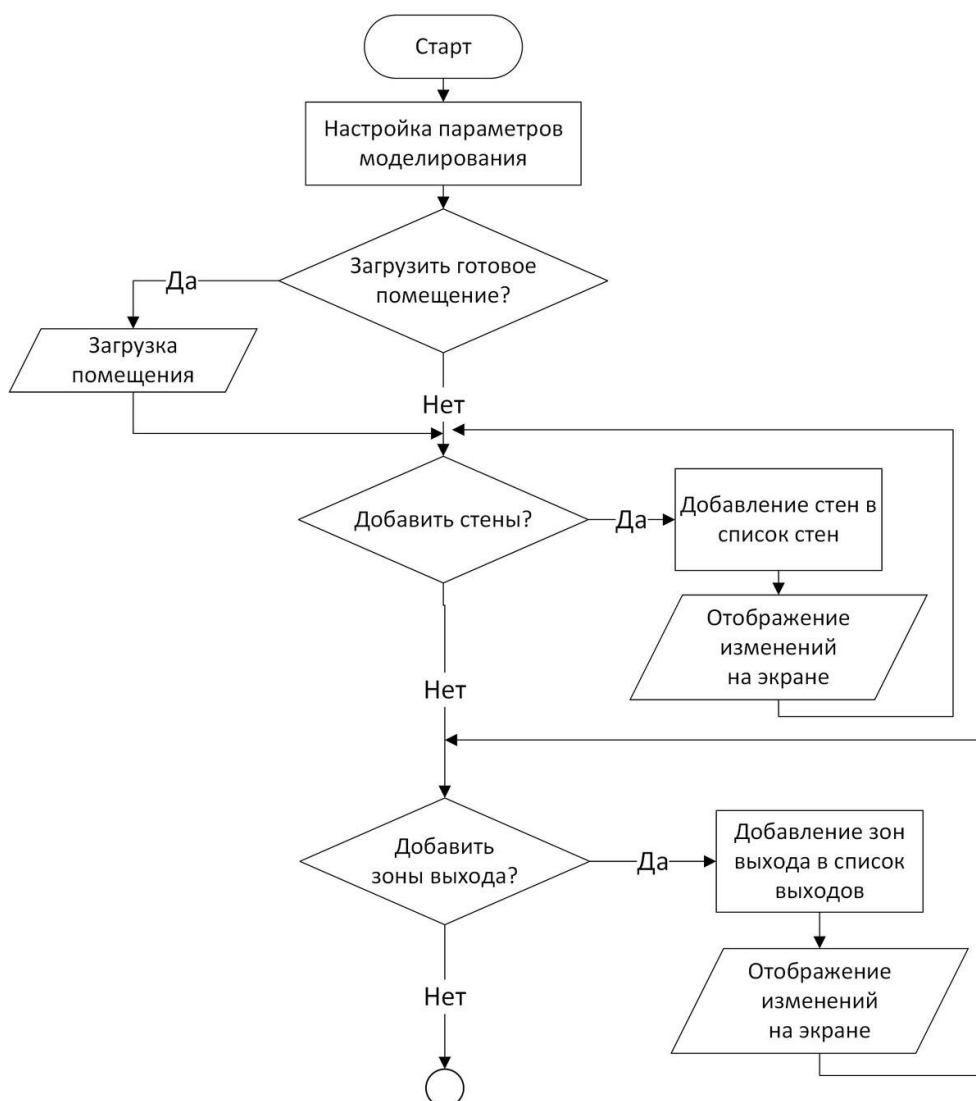
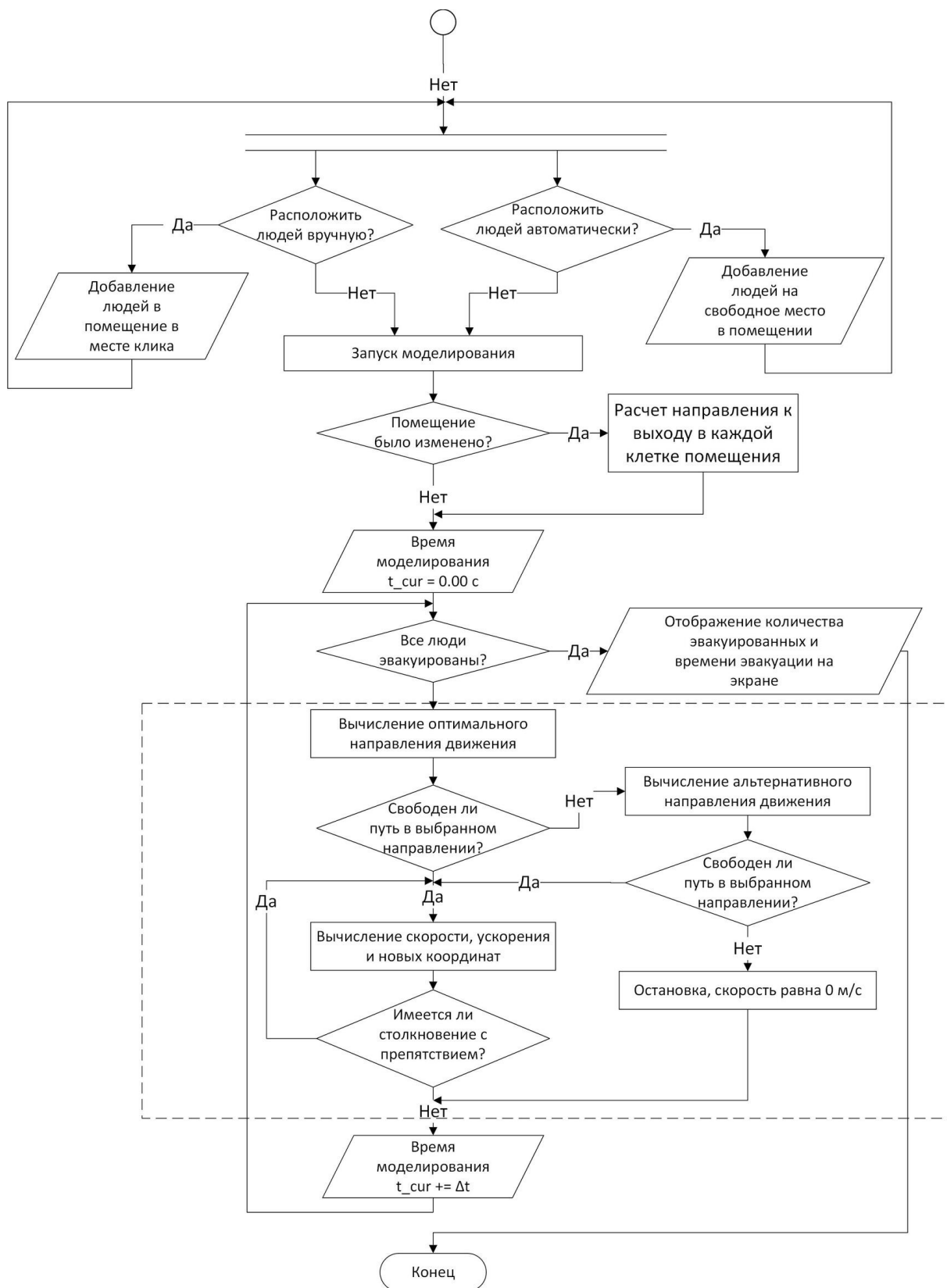


Рис. 1. Блок-схема разработанной программы  
Fig. 1. Block diagram of the developed program



Окончание рис. 1 / Continuation of Fig. 1

В сравнении с результатами, полученными в [10] с помещением такого же типа, отметим следующее. Для 100 взрослых человек время эвакуации составило 224 с, для подростков — около 60 с, а для детей — 34 с. В данном эксперименте время, затрачиваемое на эвакуацию 100 человек, составило 94, 60 и 38 с для этих возрастных групп, рис. 4.

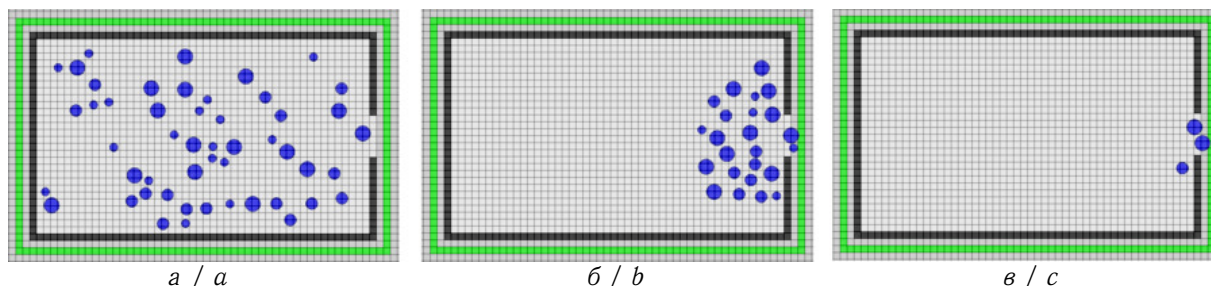


Рис. 2. Экран работы программы для смешанной группы из 50 эвакуируемых в моменты времени:  $a - t = 1$  с;  $b - t = 15$  с;  $c - t = 30$  с (цвет онлайн)  
 Fig. 2. Screen of the program for a mixed group of 50 evacuees at times:  $a - t = 1$  sec;  $b - t = 15$  sec;  $c - t = 30$  sec (color online)

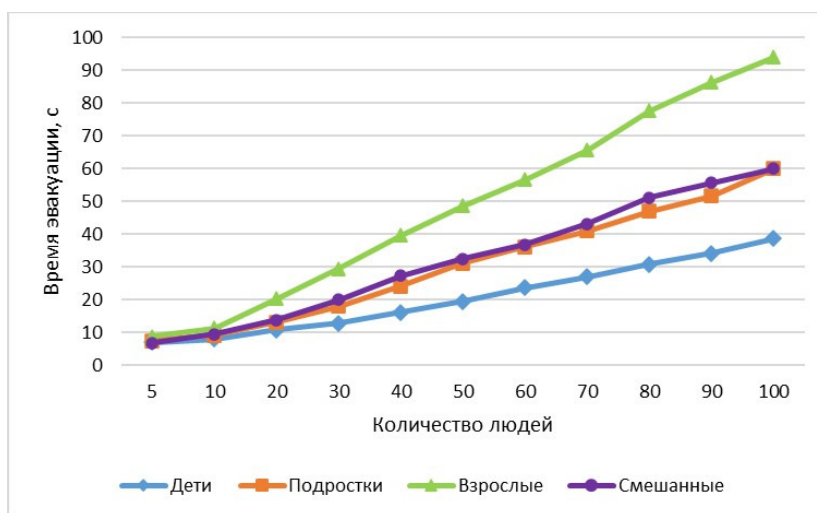


Рис. 3. Время полной эвакуации людей из рассматриваемого помещения (цвет онлайн)  
 Fig. 3. Time for complete evacuation of people from the premises in question (color online)

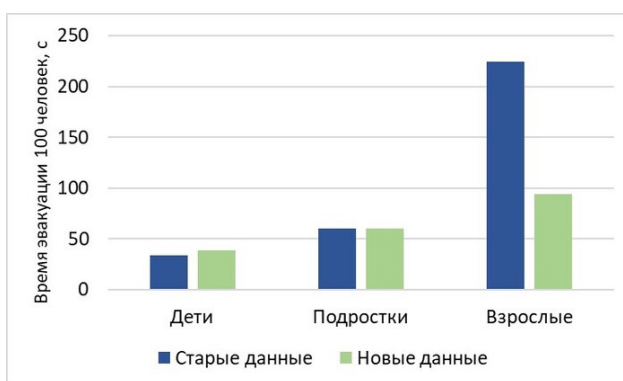


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования  
 Fig. 4. Comparison of simulation results

Значительное различие времени эвакуации для большого количества взрослых, как мы предполагаем, объясняется тем, что ожидание свободного пространства (аналог очереди) уменьшает хаотический характер движения толпы, придает ей большую организованность и поэтому скорее приближает эвакуацию к цели. У групп людей с меньшими проекциями (дети, подростки) данный эффект, как мы предполагаем, должен проявляться при большей численности и, возможно, в более больших помещениях.





## Заключение

В работе предлагается развитая мультиагентная модель эвакуации людей из помещения с учетом столкновений и ее компьютерная реализация. Разработанная программа позволяет строить помещения различной конфигурации, располагать людей в помещении как вручную, так и случайным образом, задавая необходимое количество людей. Процесс эвакуации визуализируется, подсчитывается количество эвакуированных в каждый момент времени и определяется время полной эвакуации людей из помещения. Особенностью предлагаемой модели является способность агентов сменить направление движения для обхода других агентов и ожидания при отсутствии возможности для перемещения.

Был проведен эксперимент по моделированию эвакуации дети, подростков, взрослых и смешанных групп из пустого помещения прямоугольной формы. Произведено сравнение полученных усредненных значений времени эвакуации с аналогичными данными, представленными в более раннем источнике с использованием программы «Moving to exit» [10]. Выявлены отличия, которые свидетельствуют о положительном влиянии элементов организации на скорость эвакуации людей.

## Список литературы

1. Самошин Д. А. Краткая история развития методов расчета процесса эвакуации людей в случае пожара // Ройтмановские чтения : сб. материалов 10-й науч.-практ. конф., г. Москва, 2022. Москва : Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. С. 130–132. EDN: EJYUIP
2. Purser D. A. Assessment of pre-warning, pre-travel and travel behavior interactions with smoke and toxic gases during fire incidents // Fire Safety Journal. 2023. Vol. 141. Art. 103938. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103938>
3. Гусев М. С., Гвоздик М. И. Формулировка модели социальной силы при движении толпы в процессе эвакуации при пожарах в развлекательных учреждениях // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 1. С. 220–224. EDN: XOOGKU
4. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // Nature. 2000. Vol. 407. P. 487–490. <https://doi.org/10.1038/35035023>
5. Антуков А. М., Брацун Д. А., Люшин А. В. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5, № 3. С. 491–508. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2013-5-3-491-508>, EDN: RVBMIP
6. Tong Y. Simulation investigation on crowd evacuation strategies for helping vulnerable pedestrians at different stages of egress // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023. Vol. 84. Art. 103479. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103479>
7. Cao R. F., Lee E. W., M., Wei X., Gao D. L., Chen Q., Yuen A. C. Y., Yeoh G. H., Yuen R. Development of an agent-based indoor evacuation model for local fire risks analysis // Journal of Safety Science and Resilience. 2023. Vol. 4, № 1. P. 75–92. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.09.006>
8. Ding N., Chen T., Zhang H., Gao D. L., Chen Q., Yuen A. C. Y., Yeoh G. H., Yuen R. Simulation of high-rise building evacuation considering fatigue factor based on cellular automata: A case study in China // Building Simulation. 2016. Vol. 10, № 3. P. 407–418. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0337-9>
9. Lopez-Carmona M. A. Adaptive cell-based evacuation systems for leader-follower crowd evacuation // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2022. Vol. 140. Art. 103699. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103699>
10. Максимова М. З., Барбин Н. М. Моделирование эвакуации людей различных возрастных групп // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5, № 3. С. 483–490. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2013-5-3-483-490>, EDN: RVBMIF
11. Цвиркун А. Д., Резчиков А. Ф., Самарцев А. А., Иващенко В. А., Богомолов А. С., Кушников В. А., Филимонюк Л. Ю. Система интегрированного моделирования распространения опасных факторов пожара и эвакуации людей из помещений // Автоматика и телемеханика. 2022. № 5. С. 26–42. <https://doi.org/10.31857/S0005231022050038>, EDN: ABHDT0
12. Samartsev A. A., Ivashchenko V. A., Kushnikova E. V. Combined modeling of fire and evacuation from premises // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf



2019. Vladivostok : Institute of Electrical and Electronics Engineers Publ., 2019. Art. 8725394. <https://doi.org/10.1109/Eastonf.2019.8725394>, EDN: VZUZYG
13. Samartsev A., Ivashchenko V., Rezchikov A., Kushnikov V., Filimonyuk L., Bogomolov A. Multiagent model of people evacuation from premises while emergency // *Advances in Systems Science and Applications*. 2019. Vol. 19, № 1. P. 98–115. <https://doi.org/10.25728/assa.2019.19.1.558>
14. Путилов К. А. Курс физики : в 3 т. Т. 1. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика. Москва : Физматгиз, 1963. 560 с.

### References

1. Samoshin D. D. A brief history of the development of methods for calculating the process of evacuation of people in case of fire. *Roitmanovskie chteniya* [Roitman Readings]: Collection of materials of the 10th scientific and practical conference. Moscow, Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2022, pp. 130–132 (in Russian). EDN: EJUUIP
2. Purser D. A. Assessment of pre-warning, pre-travel and travel behavior interactions with smoke and toxic gases during fire incidents. *Fire Safety Journal*, 2023, vol. 141, art. 103938. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103938>
3. Gusev M. S., Gvozdik M. I. Formulation of a social force model at the time of crowd movement in the process of evacuation during fires in entertainment facilities. *Fire and Technospheric Safety: Problems and Ways of Improvement*, 2020, iss 1, pp. 220–224 (in Russian). EDN: XOOGKU
4. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000, vol. 407, pp. 487–490. <https://doi.org/10.1038/35035023>
5. Aptukov A. M., Bratsun D. A., Lyushnin A. V. Modeling of behavior of panicked crowd in multi-floor branched space. *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, iss. 3, pp. 491–508 (in Russian). <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2013-5-3-491-508>, EDN: RVBMIP
6. Tong Y. Simulation investigation on crowd evacuation strategies for helping vulnerable pedestrians at different stages of egress. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, vol. 84, art. 103479. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103479>
7. Cao R. F., Lee E. W., M., Wei X., Gao D. L., Chen Q., Yuen A. C. Y., Yeoh G. H., Yuen R. Development of an agent-based indoor evacuation model for local fire risks analysis. *Journal of Safety Science and Resilience*, 2023, vol. 4, iss 1, pp. 75–92. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.09.006>
8. Ding N., Chen T., Zhang H., Gao D. L., Chen Q., Yuen A. C. Y., Yeoh G. H., Yuen R. Simulation of high-rise building evacuation considering fatigue factor based on cellular automata: A case study in China. *Building Simulation*, 2016, vol. 10, iss 3, pp. 407–418. <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0337-9>
9. Lopez-Carmona M. A. Adaptive cell-based evacuation systems for leader-follower crowd evacuation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, vol. 140, art. 103699. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103699>
10. Maksimova M. Z., Barbin N. M. Modeling of evacuation of people of various age groups. *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, iss 3, pp. 483–490 (in Russian). <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2013-5-3-483-490>, EDN: RVBMIF
11. Tsvirkun A. D., Rezchikov A. F., Samartsev A. A., Ivashchenko V. A., Bogomolov A. S., Kushnikov V. A., Filimonyuk L. Yu. Integrated simulation system for the spread of fire hazards and evacuation of people from premises. *Automation and Remote Control*, 2022, iss 5, pp. 26–42 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0005231022050038>, EDN: ABHDTO
12. Samartsev A. A., Ivashchenko V. A., Kushnikova E. V. Combined modeling of fire and evacuation from premises. *2019 International Science and Technology Conference "EastConf"*, *EastConf 2019*. Vladivostok, Institute of Electrical and Electronics Engineers Publ., 2019, art. 8725394. <https://doi.org/10.1109/Eastonf.2019.8725394>, EDN: VZUZYG
13. Samartsev A., Ivashchenko V., Rezchikov A., Kushnikov V., Filimonyuk L., Bogomolov A. Multiagent model of people evacuation from premises while emergency. *Advances in Systems Science and Applications*, 2019, vol. 19, iss 1, pp. 98–115. <https://doi.org/10.25728/assa.2019.19.1.558>
14. Путилов К. А. Курс физики. Т. 1. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика [Physics course. Vol. 1. Mechanics. Acoustics. Molecular physics. Thermodynamics]. Moscow, Fizmatgiz, 1963. 560 p. (in Russian).

Поступила в редакцию / Received 23.11.2023

Принята к публикации / Accepted 21.12.2023

Опубликована / Published 28.02.2025