

**А. В. Спиридонов**

(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;  
e-mail: sb177@yandex.ru)

## ТЕХНОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА КОЛИЧЕСТВА ЛЮДЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** В работе приводятся результаты имитационного моделирования на основе данных мониторинга для задачи обеспечения безопасности людей. Исходные данные для имитационного моделирования получены с помощью экспериментальной системы мониторинга распределения людей в здании. Результаты моделирования свидетельствуют о возможности накопления достоверных данных о распределении людей, которые в дальнейшем могут использоваться либо как источник исходных данных для проведения процедуры расчёта риска, либо как основа для разработки организационных мероприятий пожарной безопасности на объекте.

**Цели и задачи.** Целью настоящей работы является разработка технологии имитационного моделирования на основе данных мониторинга количества людей для задачи обеспечения их безопасности. Для этого последовательно решены следующие задачи: описание технологии имитационного моделирования применительно к задаче, основанной на мониторинге количества людей; построение имитационной модели, её валидация и верификация, а также анализ и интерпретация полученных результатов.

**Методы.** Для создания и построения модели объекта применены методы имитационного моделирования, в частности агентный подход.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты имитационного моделирования показали возможность применения предложенного подхода к задаче оценки распределения количества людей в различных зонах этажей. Построенная имитационная модель позволяет выявить наиболее загруженные участки и помещения в здании, являясь при этом инструментом принятия обоснованных организационных решений.

**Выводы.** Разработана технология имитационного моделирования, которая позволит лицу принимающему решения проводить более качественный анализ загруженности помещений внутри здания, выявлять критически участки внутри здания, оказывающие влияние на безопасность людей. Кроме того, данный подход может быть применён как основа для проведения оценки величин пожарного риска.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, мониторинг, имитационное моделирование, AnyLogic, эвакуация.

**Для цитирования:** Спиридонов А. В. Технология имитационного моделирования на основе данных мониторинга количества людей для задачи обеспечения их безопасности // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – Вып. 2 (92). – С. 116-127. <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.2.92.116-127>

Современный уровень развития информационных технологий ежегодно расширяет возможности их применения. Не осталась в стороне и область обеспечения пожарной безопасности. В настоящее время особенно сильно развивается направление, связанное с системами мониторинга уровня безопасности. Разрабатываются системы мониторинга для обеспечения безопасности как пожарно-спасательных подразделений, так и для эвакуирующихся в случае пожара.

В работе [1] предложена система мониторинга динамики пожара для оценки опасностей для пожарно-спасательных подразделений. Система мониторинга позволяет оценить такие параметры как температура, видимость.

Ещё одной системой является программно-аппаратный комплекс мониторинга распределения количества людей в здании, предложенный в работах [2-3]. Данный комплекс состоит из устройств детекции и фиксирует размещение людей на различных участках здания путём нахождения разницы между количеством вошедших и вышедших людей с соответствующего участка. Это позволяет формировать данные о распределении людей внутри здания и применять эти данные для задачи обеспечения пожарной безопасности.

Одним из направлений развития данного программно-аппаратного комплекса является использование получаемых в результате работы комплекса данных для построения [4] имитационной модели и проведения соответствующего моделирования, которые неоднократно применялись для решения задач пожарной безопасности [5-10]. Таким образом, целью настоящей работы является разработка технологии имитационного моделирования на основе данных мониторинга количества людей [2-3] для задачи обеспечения их безопасности.

Агентное моделирование – одно из видов имитационного моделирования, применено к решению рассматриваемой задачи. В результате чего выделены следующие этапы:

- I. Создание связей и зависимостей модели.
- II. Разработка модели пространства.
- III. Валидация модели.
- IV. Моделирование.
- V. Анализ и обсуждение результатов.

Рассмотрим данные этапы более подробно.

#### ***Этап I. Создание связей и зависимостей модели***

Этап включает в себя обзор данных, полученных в ходе подсчёта количества людей, выбор объекта моделирования, создание временной шкалы и др. На основании полученных данных разрабатывается дизайн-проект, содержащий исходную информацию о модели и выбранной для модели проектной среде. Также на этом этапе устанавливается зависимость между поведением агентов и вводятся данные о количестве людей и времени их появления/нахождения на рассматриваемых участках в здании.

## ***Этап II. Разработка модели пространства.***

Внутри данного этапа выделяют следующие подэтапы:

а) *Разработка*. На данном этапе создаётся модель, в том числе временная так как существующий функционал программного комплекса *AnyLogic* не позволяет проводить онлайн моделирование. Для этого необходимо выполнить приведение масштаба реального времени к внутреннему времени программы и разработать соответствующую шкалу пересчёта.

б) *Разметка*. На данном этапе необходимо создать трёхмерную модель объекта, задать правила учёта людей на каждом участке.

в) *Правила*. На данном этапе определяются процессные переходы модели и правил поведения агентов, принципы их передвижения, а также временная привязка. Эти процедуры выполняются на основе полученных результатов мониторинга.

г) *Визуализация*. На данном этапе в рабочую область интерфейса добавляются счетчики результатов, которые отображают статистические закономерности, полученные в ходе имитационного моделирования. К таким устройствам могут относиться поля, графики, диаграммы и гистограммы и др.

## ***Этап III. Валидация модели***

Этап включает в себя процедуру обеспечения соответствия данных, получаемых в результате имитационного моделирования. Они должны удовлетворять определённым объективным форматам и другим критериям ввода. Кроме того, проводится процедура верификации, в ходе которой устанавливается достоверность модели.

## ***Этап IV. Моделирование***

На данном этапе проводится имитационное моделирование созданной модели. Осуществляется визуальная оценка соответствия полученных результатов ожидаемым. В рамках настоящего исследования имитационное моделирование проводилось в программном комплексе *AnyLogic*.

## ***Этап V. Анализ и обсуждение результатов***

На данном этапе проводится обобщение результатов имитационного моделирования, их анализ и интерпретация. Результаты, полученные в ходе моделирования, могут указывать на необходимость принятия тех или иных организационных решений (например, ограничение количества или времени прибытия/нахождения людей в тех или иных помещениях).

Таким образом, определены основные этапы по созданию имитационной модели на основе данных со средств мониторинга. Данная технология позволяет оценить загруженность того или иного элемента в здании, выявить потенциально-опасные и критические элементы внутри здания. Кроме того, дальнейшим развитием этой технологии, в частности интеграции непрерывных данных непосредственно со средств мониторинга позволит создать цифровой двойник здания и исследовать различные аспекты пожарной и комплексной безопасности.

Апробацию предложенной технологии проведём на примере существующего объекта, оборудованного **программно-аппаратным комплексом "Мониторинг количества людей" (ПАК "Мониторинг")**. В качестве такого объекта выбран шестой этаж учебного корпуса Академии ГПС МЧС России, где в течение 4-х месяцев осуществлялся сбор данных о распределении людей на участках этажа (рабочие кабинеты, учебные аудитории и т.д.). Данные фиксировались в базе данных в числовом формате и позволяли узнать только количество людей в конкретном помещении/участке, без каких-либо персональных данных.

Далее в соответствии с ранее приведёнными этапами проведена разработка имитационной модели, непосредственно процедура имитационного моделирования, анализ и интерпретация полученных результатов. Имитационное моделирование проводилось в программном комплексе *AnyLogic* [11].

На рис. 1 показаны результаты построения модели этажа и разметка пространства.

После этого в соответствии с этапом II выполнена разработка временной модели объекта, проведена разметка пространства, определены процессные переходы модели и правил поведения агентов, а также выполнена визуализация полученной модели.

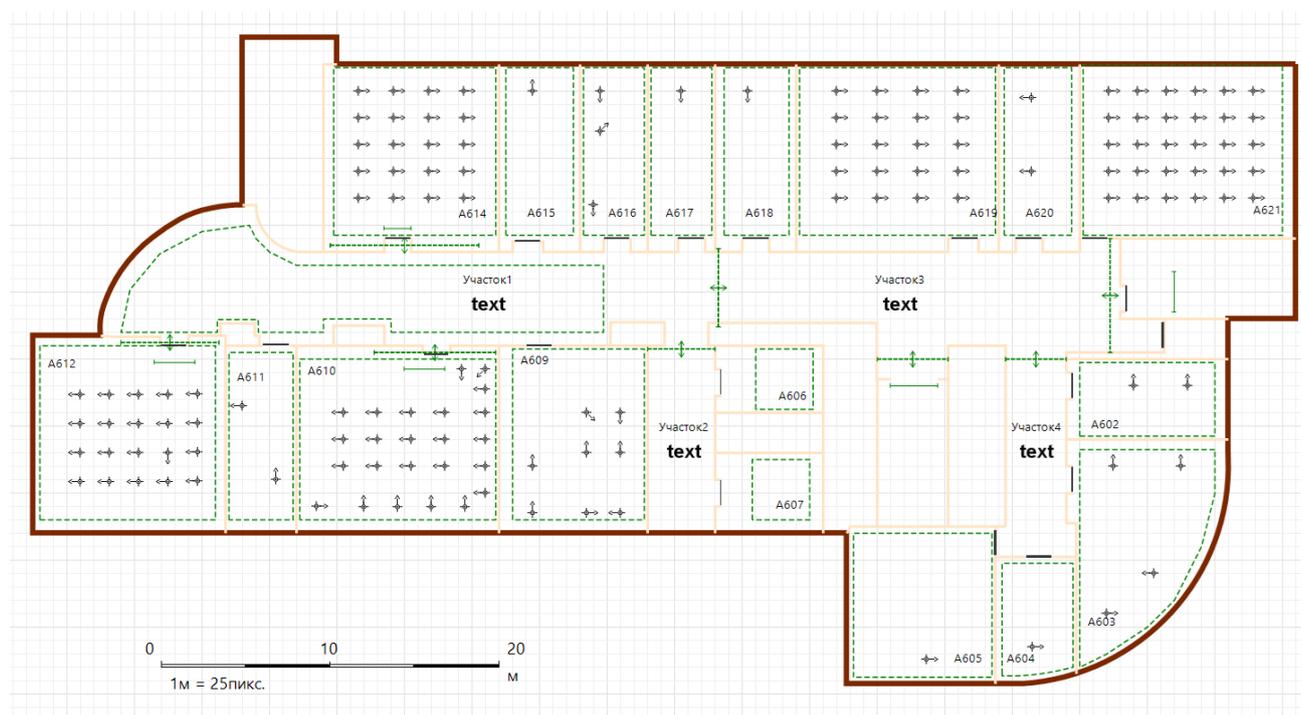


Рис. 1. Модель этажа в программном комплексе *AnyLogic*

На следующем этапе проведены несколько последовательных итераций моделирования. Один из этапов показан на рис. 2.



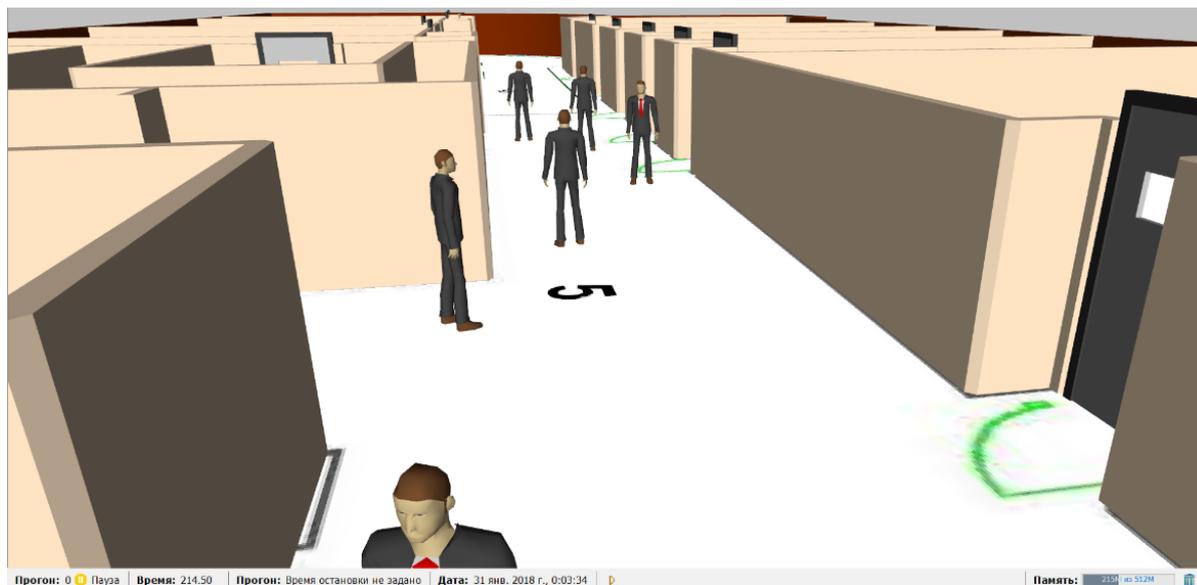
**Рис. 2.** Ход моделирования. Фрагмент этажа

Далее проведён графоаналитический анализ созданной модели путём сопоставления созданной и фактической топологии объекта, времени появления и нахождения людей на различных участках и др. Так, в ходе проведённой оценки установлено, что при создании топологии была допущена техническая ошибка, которая в дальнейшем была устранена, что позволило повысить точность модели.

Графическое отображение изменения количества людей на участках карты и в некоторых аудиториях представлено на рис. 3, 4.

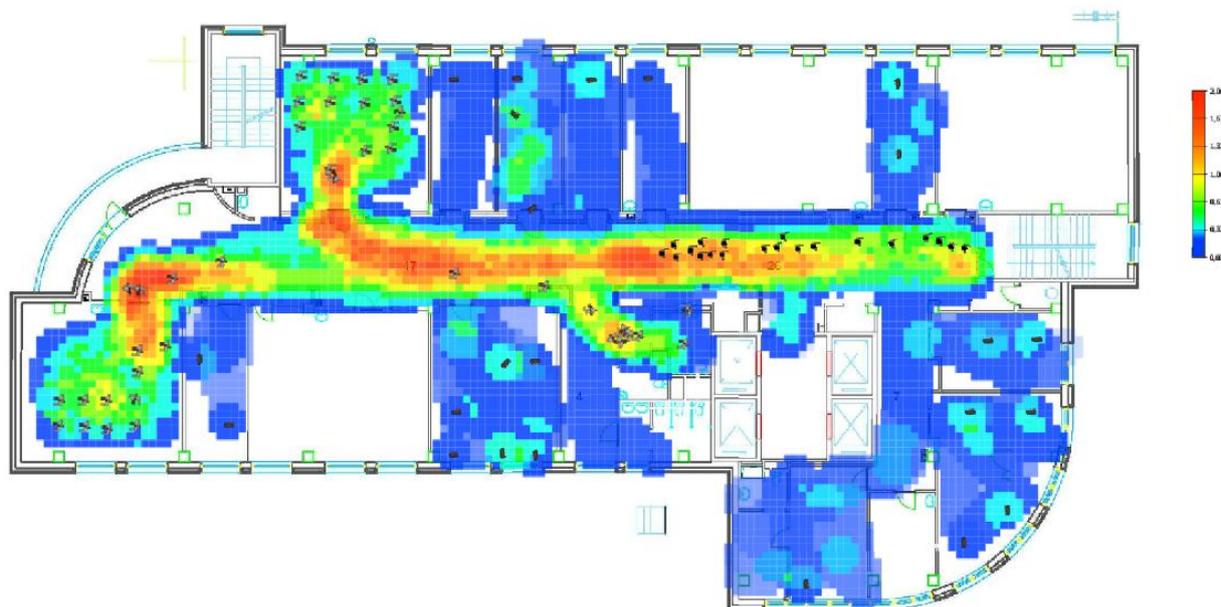


**Рис. 3.** Ход моделирования. Распределение по учебным аудиториям объекта моделирования.  
Время: 8 ч 37 мин 6 с

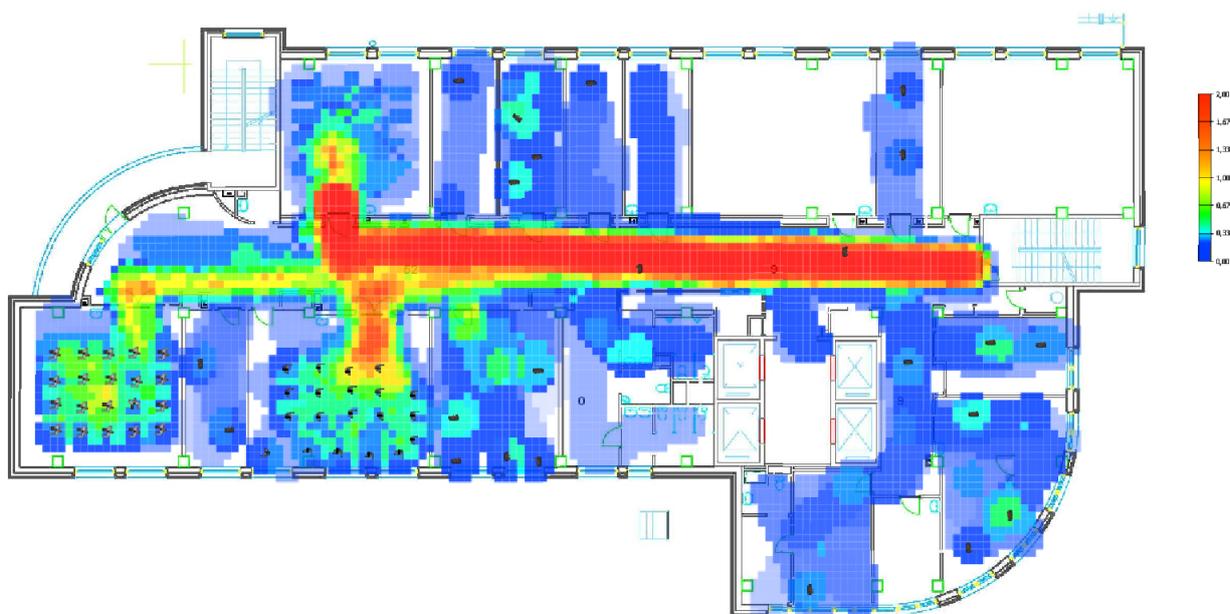


**Рис. 4.** Ход моделирования. Имитация входа людей в рабочие кабинеты на объекте моделирования.  
Время: 8 ч 51 мин 24 с

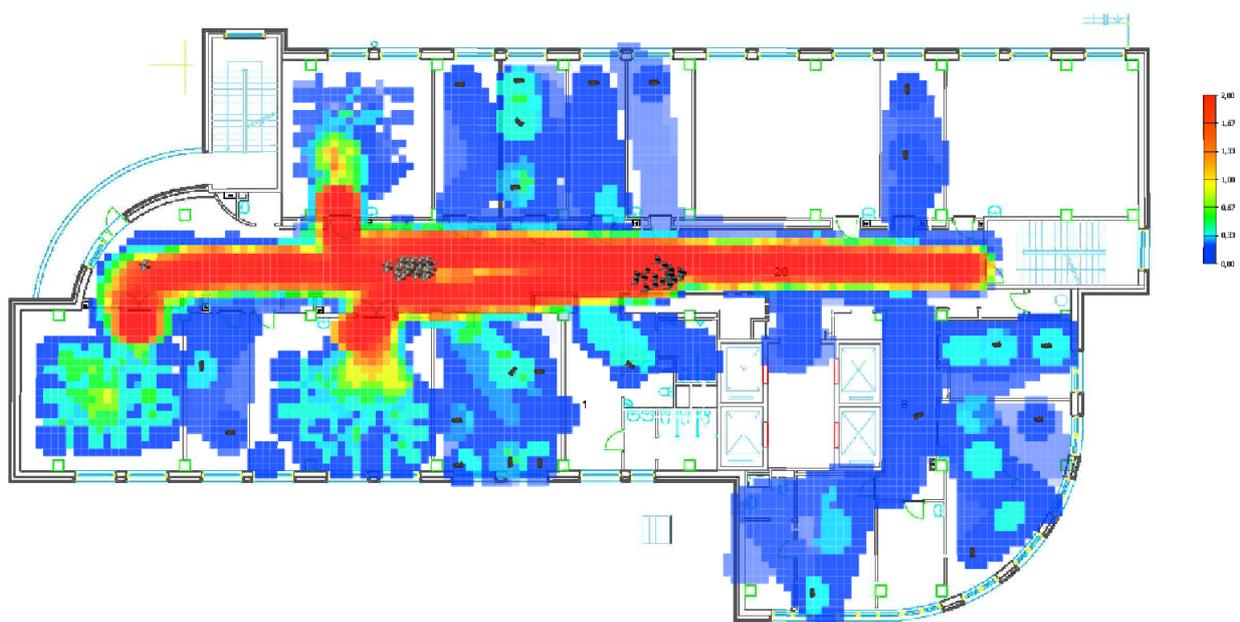
По результатам имитационного моделирования созданы тепловые карты движения и распределения людей на рассматриваемом этаже здания (рис. 5-7).



**Рис. 5.** Карта плотности загруженности участков на объекте моделирования. Красный – наиболее загруженный участок, синий – наименее загруженный участок.  
Реальное время: 10 ч 31 мин 40 с

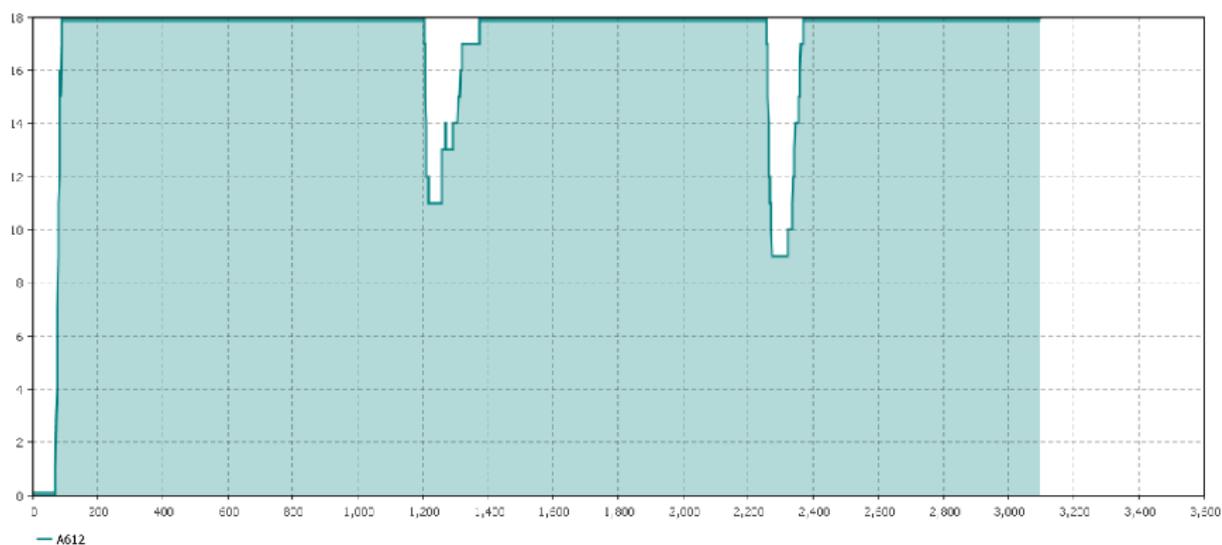


**Рис. 6.** Карта плотности загруженности участков на объекте моделирования.  
Красный – наиболее загруженный участок, синий – наименее загруженный участок.  
Реальное время: 12 ч 17 мин 33 с



**Рис. 7.** Карта плотности загруженности участков на объекте моделирования.  
Красный – наиболее загруженный участок, синий – наименее загруженный участок.  
Реальное время: 14 ч 26 мин 18 с

Данные результаты позволили сформировать и накопить базу данных о распределении количества людей по помещениям этажа в различные моменты времени. Статистические диаграммы показаны на рис. 8.



а) Учебная аудитория № 612. Ось абсцисс – модельное время<sup>1</sup>.  
Ось ординат – количество людей (ед.).



б) Учебная аудитория № 614. Ось абсцисс – модельное время<sup>1</sup>.  
Ось ординат – количество людей (ед.).

**Рис. 8.** Статистика изменения количества людей

Результаты имитационного моделирования показали возможность применения предложенного подхода к задаче оценки распределения количества людей в различных зонах этажей. Построенная имитационная модель позволяет выявить наиболее загруженные участки и помещения в здании, являясь при этом инструментом принятия решений, направленным на поиск обоснованных организационных мер.

Обобщив полученные результаты, сформулируем последовательность действий по созданию имитационной модели и представим её на рис. 9.

<sup>1</sup> Модельное время — условное логическое время, в единицах которого определено поведение всех объектов модели. Понятие модельного времени является базовым в системах имитационного моделирования



**Рис. 9.** Последовательность действий по созданию имитационной модели здания

Таким образом, разработана технология имитационного моделирования, которая позволит лицу, принимающему решения проводить более качественный анализ загруженности помещений внутри здания, выявлять критически участки внутри здания, оказывающие влияние на безопасность людей. Кроме того, данный подход может являться основой для процедуры проведения оценки величин пожарного риска в режиме реального времени, концепция которой были изложены в работе [12].

В ходе дальнейшей работы необходимо разработать информационную систему, которая позволит отображать рассматриваемые в настоящей работе данные в режиме реального времени, а затем интегрировать данную информационную систему с симулятором для проведения моделирования процесса эвакуации на основе реального распределения людей в текущий момент времени.

### Литература

1. *Тараканов Д. В.* Многокритериальные модели и методы поддержки управления пожарными подразделениями на основе мониторинга динамики пожара в здании: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.10. М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. 340 с.
2. *Шихалев Д. В., Корепанов В. О.* Мониторинг распределения людей в здании для задачи управления эвакуацией. Часть 1 // Технологии техносферной безопасности. Вып. 1 (83). 2019. С. 68-77. <https://doi.org/10.25257/TTS.2019.1.83.68-77>
3. *Шихалев Д. В., Корепанов В. О.* Мониторинг распределения людей в здании для задачи управления эвакуацией. Часть 2 // Технологии техносферной безопасности. Вып. 2 (84). 2019. С. 91-98. <https://doi.org/10.25257/TTS.2019.2.84.91-98>
4. *Горбунов А. Р., Лычкина Н. Н.* Парадигмы имитационного моделирования: новое в решении задач стратегического управления (объединённая логика имитационного моделирования) // Бизнес-информатика. 2007. № 2 (2). С. 60-66.
5. *Каменский Д. П., Гаряев Н. А.* Имитационное моделирование и система поддержки принятия решений // Вестник МГСУ. 2011. № 6. С. 359-362.
6. *Дегтярев С. В., Сазонов С. Ю., Миргалеев А. Т., Кужелева С. А.* Имитационное моделирование пожароопасных ситуаций в системе высшего профессионального образования. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2011. 228 с.
7. *Жуков Ю. И., Ключ В. В.* Комплексирование функционального и имитационного моделирования в задачах обеспечения пожарной безопасности (на примере организации аварийно-спасательных работ при пожаре на судне) // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2014. Т. 1, № 1 (5). С. 329-333.
8. *Lo S. M., Zhao C. M., Liu M., Coping A.* A simulation model for studying the implementation of performance-based fire safety design in buildings // Automation in Construction. 2008. Vol. 17, Issue 7. Pp. 852-863. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.02.014>
9. *Yang Y., Deng J., Xie C., Jiang Y.* Design and Implementation of Fire Safety Evacuation Simulation Software based on Cellular Automata Model // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 364-371. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.052>
10. *Worrell C., Luangkesorn L., Haight J., Congedo T.* Machine Learning of Fire Hazard Model Simulations for use in Probabilistic Safety Assessments at Nuclear Power Plants // Reliability Engineering & System Safety. 2018. Vol. 183. 2019. Pp. 128-142. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.014>
11. *Карпов Ю. Г.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 400 с.
12. *Григорян Р. А., Ефимов А. А., Шихалев Д. В.* Оценка возможности определения безопасности людей в режиме реального времени // Технологии техносферной безопасности. 2020. Вып. 4 (90). С. 62-73. <https://doi.org/10.25257/TTS.2020.4.90.62-73>

Материал поступил в редакцию 3 марта 2021 г.; принят к публикации 15 июня 2021 г.

**A. V. Spiridonov**

(Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia;  
e-mail: sb177@yandex.ru)

## SIMULATION TECHNOLOGY BASED ON MONITORING DATA OF THE NUMBER OF PEOPLE FOR THE TASK OF ENSURING THEIR SAFETY

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper presents the results of simulation based on monitoring data for the task of ensuring the safety of people. The initial data for the simulation was obtained using an experimental system for monitoring the distribution of people in the building. The simulation results indicate the possibility of accumulating reliable data on the distribution of people, which can later be used either as a source of initial data for the risk calculation procedure, or as a basis for the development of organizational fire safety measures at the facility.

**Goals and objectives.** The purpose of this work is to develop a simulation technology based on monitoring data on the number of people for the task of ensuring their safety. For this, the following tasks have been successively solved: description of the simulation technology in relation to the task based on monitoring the number of people; construction of a simulation model, its validation and verification, as well as analysis and interpretation of the results obtained.

**Methods.** To create and build a model of an object, the methods of simulation were used, in particular, the agent-based approach.

**Results and its discussion.** The results of simulation showed the possibility of applying the proposed approach to the problem of assessing the distribution of the number of people in different zones of the floors. The constructed simulation model makes it possible to identify the most congested areas and premises in the building, being at the same time a tool for making well-grounded organizational decisions.

**Conclusions.** The technology of simulation modeling has been developed, which will allow the decision-maker to conduct a better analysis of the congestion of premises inside the building, to identify critical areas inside the building that affect the safety of people. In addition, this approach can be applied as a basis for assessing the magnitude of fire risk.

**Key words:** fire safety, monitoring, simulation, AnyLogic, evacuation.

**For citation:** Spiridonov A. V. Simulation technology based on monitoring data of the number of people for the task of ensuring their safety. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, 2021, vol. 2 (92), pp. 116-127 (in Russian). <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.2.92.116-127>

## References

1. Tarakanov D. V. *Mnogokriterialnye modeli i metody podderzhki upravleniia pozharnymi podrazdeleniiami na osnove monitoringa dinamiki pozhara v zdanii* [Multi-criteria models and methods for supporting the management of fire departments based on monitoring the dynamics of a fire in a building]. Grand PhD in Tech. Sci. diss.: 05.13.10, Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2018. 340 p.
2. Shikhalev D. V., Korepanov V. O. Monitoring the distribution of people in the building for the evacuation management task. Part 1. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 1 (83), 2019, pp. 68-77 (in Russian). <https://doi.org/10.25257/TTS.2019.1.83.68-77>
3. Shikhalev D. V., Korepanov V. O. Monitoring the distribution of people in the building for the evacuation management task. Part 2. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 2 (84), 2019, pp. 91-98 (in Russian). <https://doi.org/10.25257/TTS.2019.2.84.91-98>.
4. Gorbunov A. R., Lychkina N. N. *Paradigmy imitacionnogo modelirovaniia: novoe v reshenii zadach strategicheskogo upravleniia (obedinennaia logika imitacionnogo modelirovaniia)* [Simulation paradigms: new in solving strategic management problems (combined logic of simulation)] *Biznes-informatika / Business Informatics*, 2007, no. 2 (2), pp. 60-66.
5. Kamensky D. P., Garyaev N. A. Simulation modeling and decision support. *Vestnik MGSU / Bulletin Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 6. pp. 359-362 (in Russian).
6. Degtiarev S. V., Sazonov S. Iu., Mirgaleev A. T., Kuzheleva S. A. *Imitacionnoe modelirovanie pozharoopasnykh situatsii v sisteme vysshego professionalnogo obrazovaniia* [Simulation modeling of fire hazardous situations in the system of higher professional education]. Kursk: Southwestern State University Publ., 2011, 228 p.
7. Zhukov Iu. I., Kliui V. V. *Kompleksirovanie funktsionalnogo i imitacionnogo modelirovaniia v zadachakh obespecheniia pozharnoi bezopasnosti (na primere organizatsii avariino-spasatelnykh работ pri pozhare na sudne)* [Integration of functional and simulation modeling in the tasks of ensuring fire safety (by the example of organizing emergency rescue operations in the event of a fire on a ship)]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy / Fire safety: problems and prospects*, 2014, vol. 1, no. 1 (5), pp. 329-333.
8. Lo S. M., Zhao C. M., Liu M., Coping A. A simulation model for studying the implementation of performance-based fire safety design in buildings. *Automation in Construction*, 2008, vol. 17, issue 7, pp. 852-863. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.02.014>
9. Yang Y., Deng J., Xie C., Jiang Y. Design and Implementation of Fire Safety Evacuation Simulation Software based on Cellular Automata Model. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 71, pp. 364-371. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.052>
10. Worrell C., Luangkesorn L., Haight J., Congedo T. Machine Learning of Fire Hazard Model Simulations for use in Probabilistic Safety Assessments at Nuclear Power Plants. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, vol. 183, 2019, pp. 128-142. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.11.014>
11. Karpov Yu. G. *Imitacionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic* [Imitating modeling of systems. Introduction to modeling with AnyLogic]. Saint Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2006, 400 p.
12. Grigoryan R. A., Efimov A. A., Shikhalev D. V. Assessment of the ability to determine the safety of people in real time. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, 2020, vol. 4 (90), pp. 62-73 (in Russian). <https://doi.org/10.25257/TTS.2020.4.90.62-73>

Received March 3, 2021; accepted June 15, 2021

### Информация об авторе

СПИРИДОНОВ Александр Викторович  
канд. техн. наук; старший научный сотрудник учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий; Академия Государственной противопожарной службы МЧС России; Российская Федерация, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; ORCID ID: 0000-0002-1476-2343; РИНЦ Author ID: 1086126; e-mail: sb177@yandex.ru

### Information about the author

SPIRIDONOV Aleksandr Viktorovich  
Candidate of Technical Sciences; Senior Researcher of the Educational and Scientific Complex of Automated Systems and Information Technologies; Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia; Russian Federation, 129366, Moscow, Borisa Galushkina St., 4; ORCID ID: 0000-0002-1476-2343; RSCI Author ID: 1086126; e-mail: sb177@yandex.ru