

Д.В. Шихалев¹, Р.Ш. Хабибулин¹, А.У. Кемлох Вагум², М. Крэйби²
(Россия, Германия)

(¹Академия ГПС МЧС России, ²Forschungszentrum Jülich GmbH;
e-mail: evacsystem@gmail.com)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕЗОПАСНЫХ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ

Компьютерное моделирование на примере топологии торгового центра показало, что применение предложенной методики определения безопасных маршрутов движения позволяет уменьшить время эвакуации примерно до 64 %.

Ключевые слова: управление эвакуацией, компьютерное моделирование, пожар.

D.V. Shikhalev, R. Sh. Khabibulin, A.U. Kemloh Wagoum, M. Chraibi
(Russia, Germany)

ASSESSMENT OF ALGORITHM OF DEFINITION OF THE SAFEST ROUTES BASED ON EVACUATION SIMULATIONS IN CASE OF FIRE

Evacuation simulations at an example of a shopping center showed a possibility to reduce the evacuation time up to 64 % if an approach of safest routes definitions is operated.

Key words: evacuation management, simulation, fire.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 15 августа 2015 г.

В предыдущем исследовании [1] сделан вывод об эффективности применяемого подхода к определению безопасного маршрута движения людей при пожаре, а также организации процесса эвакуации. Однако остался нерассмотренным ряд аспектов, в том числе частота работы алгоритма безопасного маршрута движения и сравнение алгоритмов поиска *кратчайшего (КМД)* и *безопасного (БМД) маршрутов движения*, на примере реальной топологии *торгового центра (ТЦ)*. Более подробная информация об упомянутых алгоритмах и непосредственно о подходе к управлению эвакуацией изложена в работах [1-3].

В данной статье рассмотрен предложенный подход на примере реальной топологии 1-го этажа здания торгового центра, включающего в себя множество пересечений маршрутов движения и содержащего семь эвакуационных выходов, ведущих непосредственно наружу. Некоторые геометрические характеристики выходов и прилегающих участков приведены в табл. 1, а план объекта показан на рис. 1. Зелёным цветом обозначены места принятия решений по определению направлений безопасной эвакуации.

**Геометрические характеристики выходов
и прилегающих к ним эвакуационных участков**

№ п/п	Наименование показателя	Эвакуационный выход						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Ширина, м	3,0	3,0	1,5	4,0	2,0	2,0	2,0
2	Ширины участка пути эвакуации перед выходом, м	6,4	6,4	2,0	10,1	2,2	2,2	2,2

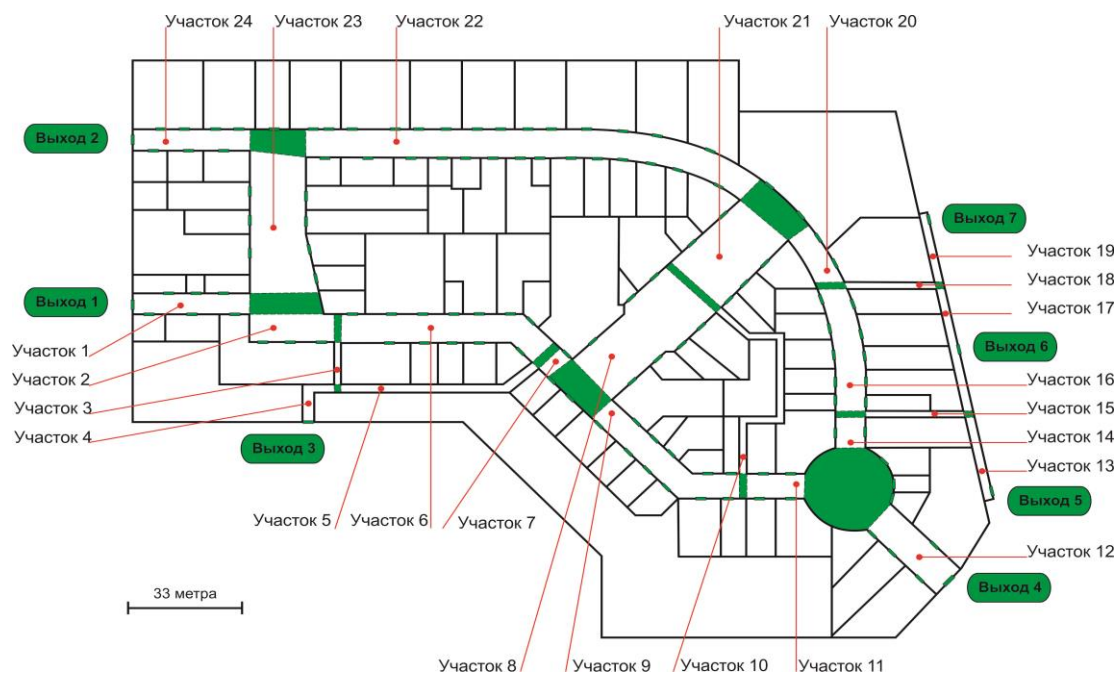
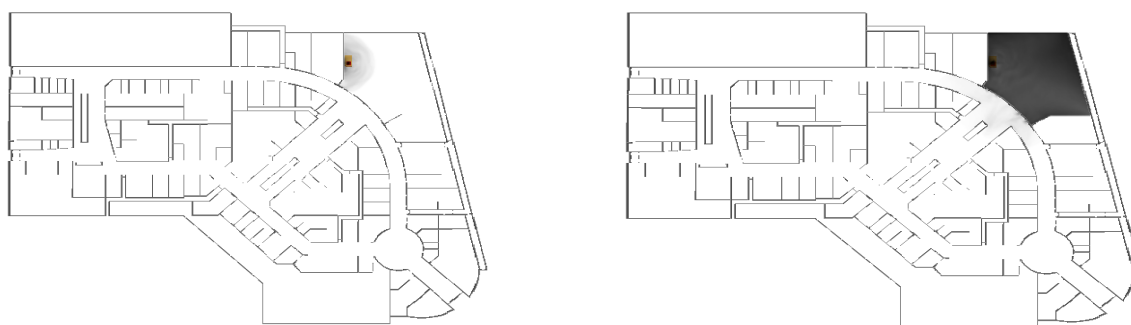


Рис. 1. План торгового центра

Рассматривая геометрические размеры эвакуационных выходов и соответствующих прилегающих участков вполне обоснованно можно предположить, что движение людей при эвакуации к более широким выходам приведёт к сокращению времени эвакуации. Количество людей при моделировании эвакуации примем из расчёта 1 человек на 1 м^2 торгового помещения (общее количество эвакуируемых – 2609). Для моделирования распространения **опасных факторов пожара (ОФП)** применена полевая модель развития пожара, реализованная в *Fire Dynamics Simulator (FDS)* [4]. Для фиксации времени возникновения ОФП размещены регистраторы на различных высотах (4,5 и 1,7 м соответственно). Регистраторы, размещенные на высоте 4,5 м, выполняют роль пожарных извещателей, которые фиксируют первоначальное появление ОФП. Регистраторы, размещённые на высоте 1,7 м, фиксируют появление ОФП на опасном для человека уровне, в соответствии с Методикой [5].

Ввиду того, что для определения безопасных маршрутов движения при пожаре в алгоритме БМД необходимо знать динамику распространения ОФП на рассматриваемом объекте, в первую очередь, проведём моделирование распространения ОФП, динамика которых показана на рис. 2.



а) 71,4 с после начала пожара

б) 285,8 с после начала пожара

Рис. 2. Развитие опасных факторов пожара при моделировании в ТЦ

Результаты моделирования распространения ОФП показали, что при принятом сценарии и начальных условиях критические значения ОФП не достигались за время моделирования. Это обусловлено рядом факторов. Во-первых, объём помещения очага возгорания достаточно большой. Во-вторых, в здании ТЦ предусмотрен атриум, через который продукты горения распространяются на вышележащий этаж и не фиксируются регистраторами. Ввиду того, что значения ОФП на путях движения не зафиксированы, в дальнейшем моделировании принимаем значение показателя b равным нулю.

Перейдём к моделированию эвакуации. На рис. 3-4 показана загруженность эвакуационных выходов при применении алгоритма КМД, а также алгоритма БМД с *частотой работы алгоритма (ЧР)*, равной 5 (определение безопасного маршрута происходит 1 раз в 5 с – лучший результат работы алгоритма БМД), и ЧР, равной 13 (определение безопасного маршрута происходит 1 раз в 13 с – худший результат работы алгоритма БМД).

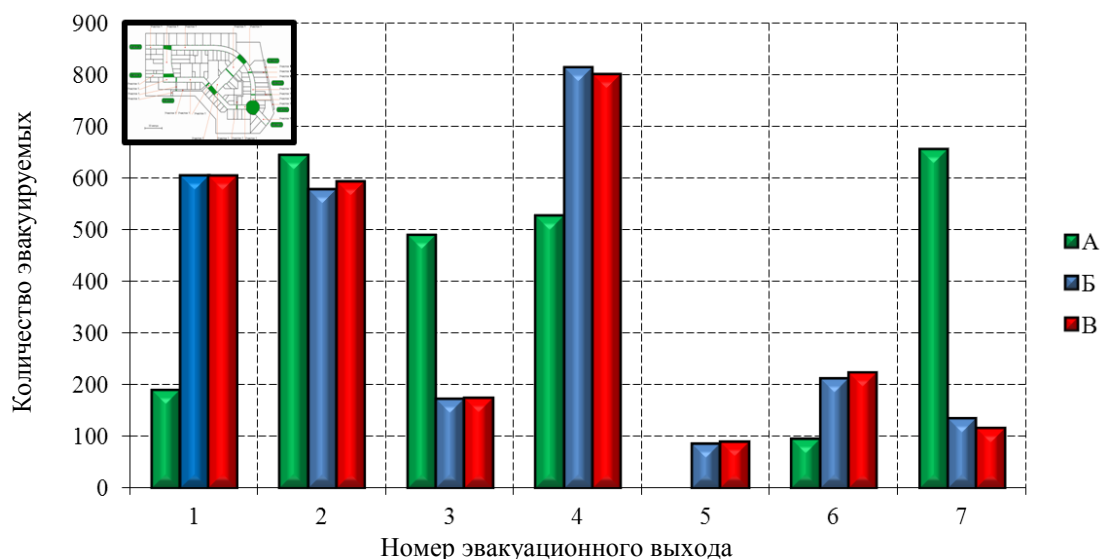
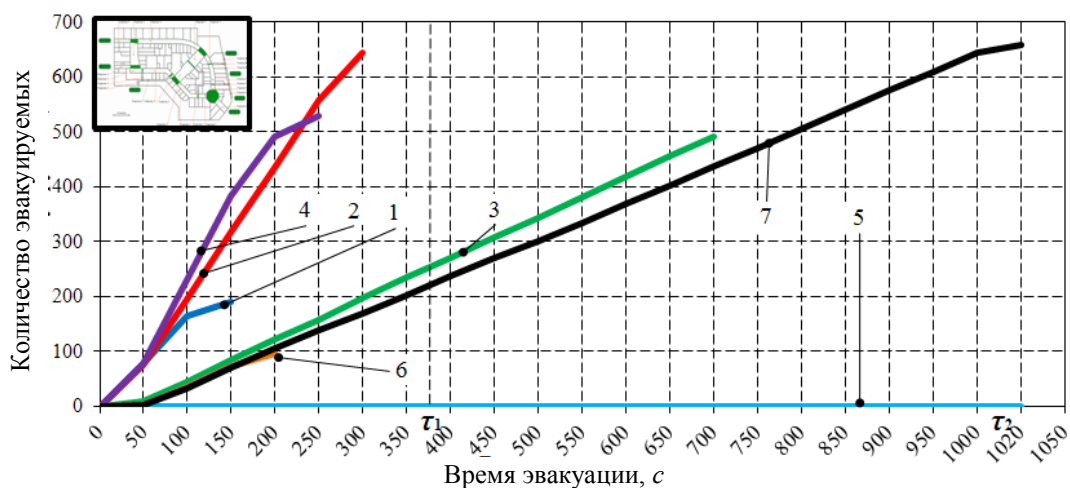
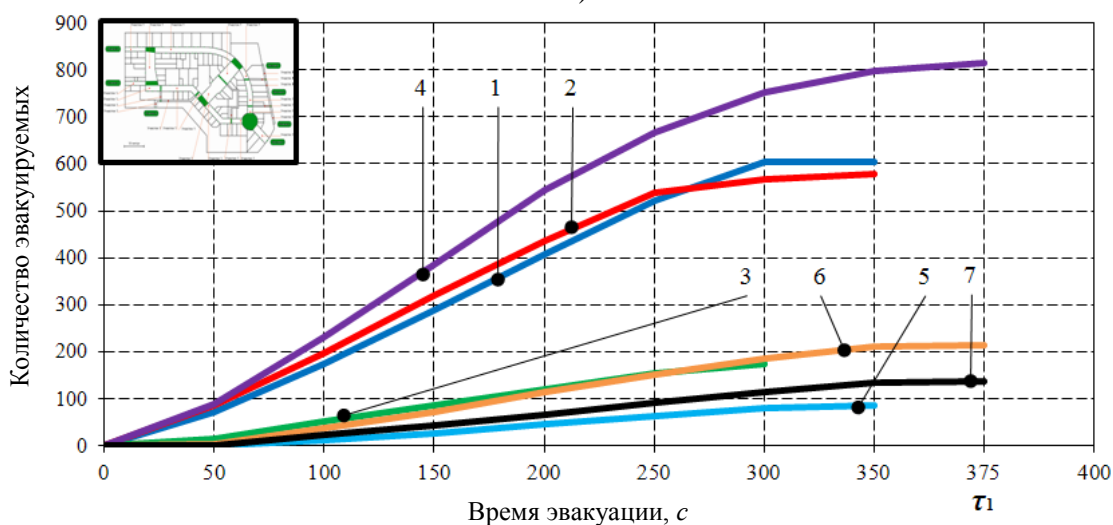


Рис. 3. Распределение людей по эвакуационным выходам:
 А – алгоритм КМД; Б – алгоритм БМД с ЧР = 5 (результат работы алгоритма БМД, наименьшее время эвакуации); В – алгоритм БМД с ЧР = 13 (результат алгоритма БМД, наибольшее время эвакуации)



а)



б)

Рис. 4. Количество эвакуируемых через эвакуационные выходы (1 – выход 1; 2 – выход 2; 3 – выход 3; 4 – выход 4; 5 – выход 5; 6 – выход 6; 7 – выход 7) в ходе моделирования эвакуации с применением:

а) алгоритма КМД; б) алгоритма БМД;

τ_1 – время окончания эвакуации с применением алгоритма БМД;

τ_2 – время окончания эвакуации с применением алгоритма КМД

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что применение алгоритма БМД существенно сокращает время эвакуации, по сравнению с алгоритмом КМД. Сокращение времени эвакуации достигается за счёт предотвращения образования скоплений людей высокой плотности либо сведению таких скоплений к минимуму. Этот результат достигается и за счёт равномерной загрузки эвакуационных выходов.

Анализ данных (рис. 7) показал, что для большинства людей ближайшим эвакуационным выходом является выход 7. Однако, исходя из его геометрических характеристик, он не является предпочтительным из-за небольшой ширины (табл. 1). При применении алгоритма БМД, большинство эвакуируемых

распределено между выходами 1, 2, 4 (наиболее широкие выходы), несмотря на то, что ближайшим эвакуационным выходом является выход 7. Таким образом, направление всех эвакуируемых к ближайшим эвакуационным выходам не всегда является обоснованным и может привести к значительному увеличению времени эвакуации.

Применение алгоритма БМД позволяет сократить время эвакуации до 64 %, в зависимости от принятой частоты работы алгоритма БМД.

Перейдём к рассмотрению влияния ЧР на ход эвакуации. Результаты моделирования показаны на рис. 5.

В первую очередь, необходимо отметить, что в случае установления частоты работы алгоритма БМД в пределах от 1 до 5 не происходит существенного влияния на общее время эвакуации. Время эвакуации варьируется в пределах 374-376 с. Увеличение частоты работы алгоритма (более 5) может привести как к незначительному снижению общего времени эвакуации (в пределах 10-11 с), так и к увеличению времени эвакуации (в пределах 27-61 с).

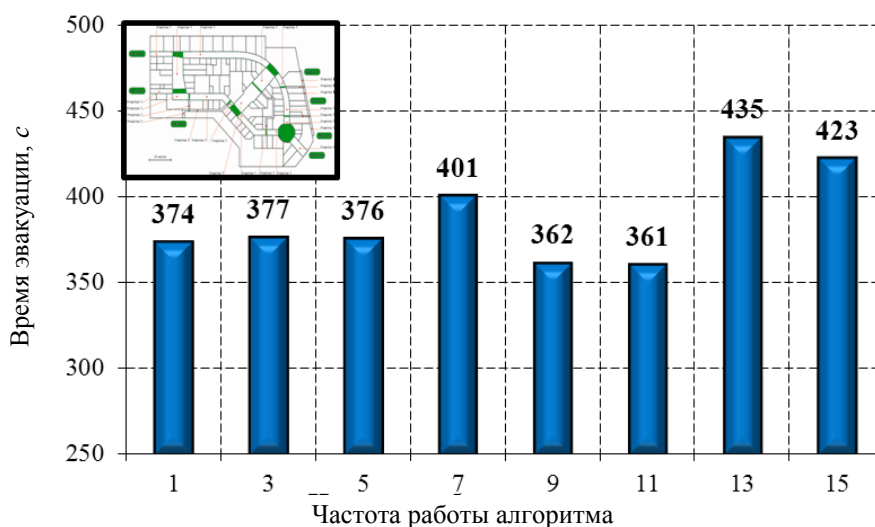


Рис. 5. Гистограмма зависимости времени эвакуации людей от частоты работы алгоритма БМД

С другой стороны, результаты предыдущего исследования [1] показали, что ЧР алгоритма, равная 1 (определение безопасного маршрута происходит 1 раз в 1 с), при малом количестве людей оказывает отрицательное влияние на время эвакуации. Следовательно, оптимальную частоту работы алгоритма принимаем равной 5 (определение безопасного маршрута происходит 1 раз в 5 с).

Результаты моделирования на T-образном пересечении эвакуационных участков свидетельствуют [1], что применение весовых коэффициентов позволяет сократить время эвакуации. Проведём анализ влияния весовых коэффициентов на распределение эвакуируемых по эвакуационным выходам. Результаты моделирования показаны на рис. 6, и подтверждают ранее полученные данные о влиянии весовых коэффициентов на время эвакуации.

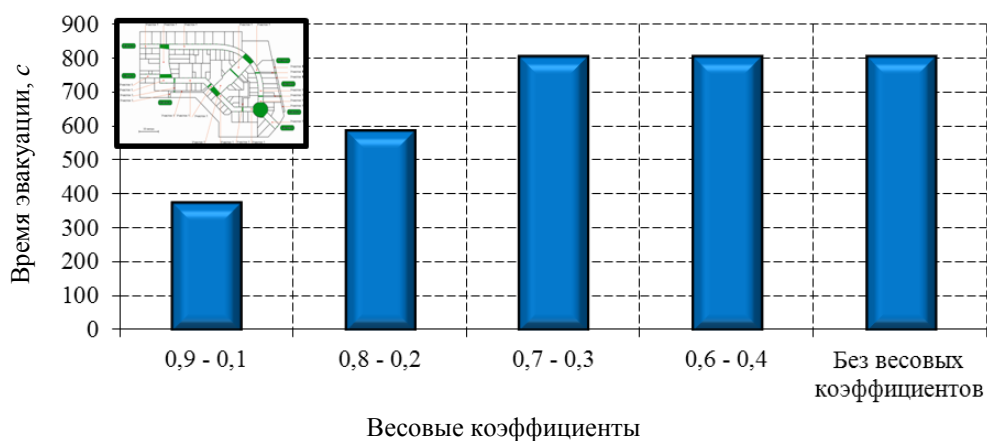


Рис. 6. Гистограмма зависимости времени эвакуации людей от частоты работы алгоритма БМД

Следует отметить, что при заданных условиях, применение весовых коэффициентов 0,7 – 0 – 0,3 или 0,6 – 0 – 0,4 эквивалентно случаю, когда весовые коэффициенты не применялись. Тем не менее, данные условия (весовые коэффициенты: 0,7 – 0 – 0,3; 0,6 – 0 – 0,4; без весовых коэффициентов) способствуют сокращению времени эвакуации, по сравнению с алгоритмом КМД, на 20,9 %. Основное различие между весовыми коэффициентами 0,7 – 0 – 0,3 или 0,6 – 0 – 0,4, впрочем, как и между всеми весовыми коэффициентами, заключается в распределении людей к эвакуационным выходам.

На рис. 7 более подробно представлены данные о распределении людей к эвакуационным выходам.

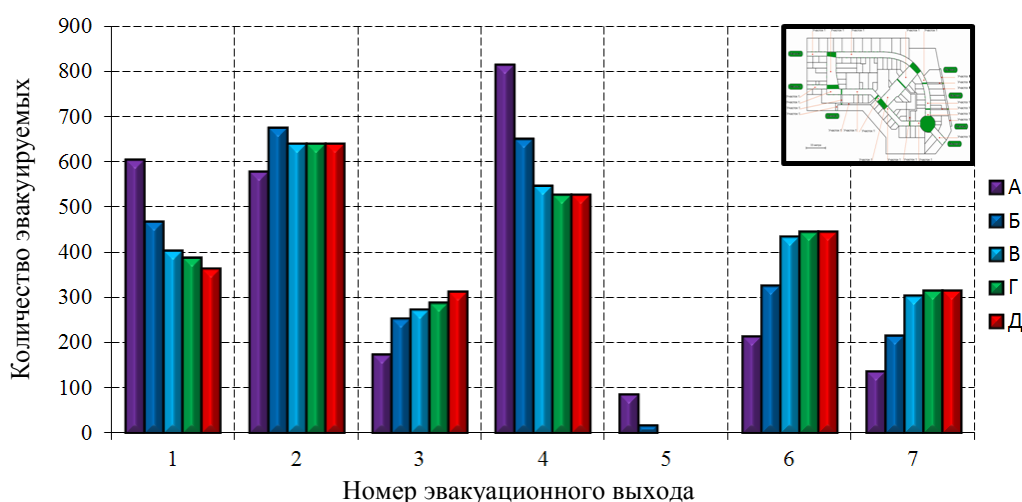


Рис. 7. Гистограмма распределения эвакуируемых по эвакуационным выходам в зависимости от применения весовых коэффициентов в алгоритме БМД:
 А – весовые коэффициенты: 0,9-0-0,1; Б – весовые коэффициенты: 0,8-0-0,2;
 В – весовые коэффициенты: 0,7-0-0,3; Г – весовые коэффициенты: 0,6-0-0,4;
 Д – без весовых коэффициентов

Анализ данных (рис. 7) показал, что наибольшего сокращения времени эвакуации удалось достичь при направлении эвакуируемых к выходам, содержащим более широкие эвакуационные участки, и наоборот, максимальное время эвакуации достигалось при "загрузке" узких маршрутов движения большим количеством людей.

В качестве примера рассмотрено довольно частое утверждение исследователей в области поведения людей при пожаре о том, что в случае пожара люди будут следовать по основным путям эвакуации, которыми они попали в здание [6-8]. Вполне вероятно, что посетители попадают в здание по выходам, ведущим от станций метро, мест парковок и т.д. На рис. 1 это соответствует выходам 1, 2, 4. Для проведения моделирования заблокируем все выходы (выходы 3, 5, 6, 7), которые маловероятно используются большей частью посетителей для входа в здание. Рассмотрен случай, когда все выходы открыты, а затем поочерёдно блокируется один из выходов.

Результаты моделирования при различных положениях эвакуационных выходов показаны на рис. 8.

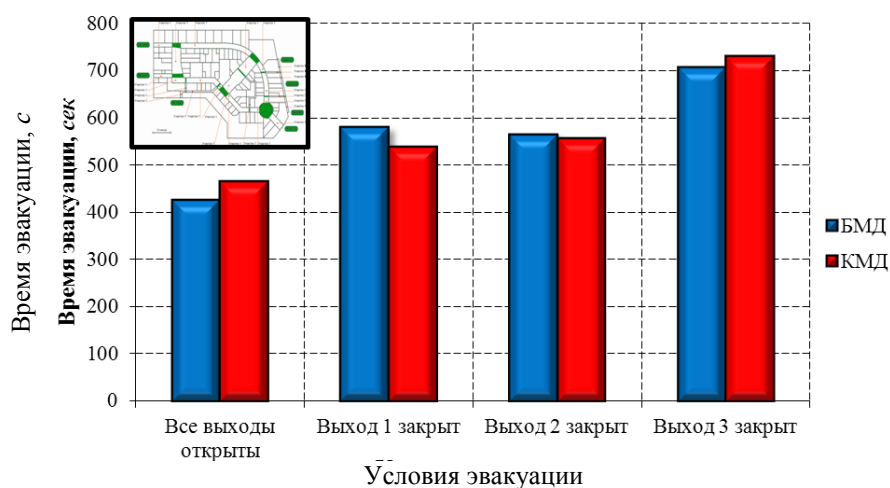


Рис. 8. Гистограмма зависимости времени эвакуации людей при применении алгоритмов БМД и КМД: красный цвет – алгоритм кратчайшего маршрута движения; синий цвет – алгоритм безопасного маршрута движения

Результаты моделирования показывают, что направление всех эвакуируемых только лишь к основным эвакуационным выходам, позволяет значительно сократить время эвакуации даже при блокировании одного из трёх выходов. На рис. 9 показана зависимость времени эвакуации от принятой стратегии.

Применение алгоритма БМД (весовые коэффициенты 0,9 – 0 – 0,1) в нормальных условиях (доступны все эвакуационные выходы) позволяет достичь минимального сокращения времени эвакуации. Если доступны лишь основные эвакуационные выходы, алгоритм БМД по-прежнему предпочтительнее алгоритма КМД. Если представляется возможным только лишь направление людей по кратчайшему маршруту, то для сокращения времени эвакуации необходимо всех эвакуируемых направлять по маршруту, который проходит по наиболее широким эвакуационным участкам, а не по кратчайшему пути эвакуации. Данное утверждение хорошо согласуется с условием беспрепятственности эвакуации людей, приведённым в работе [9].

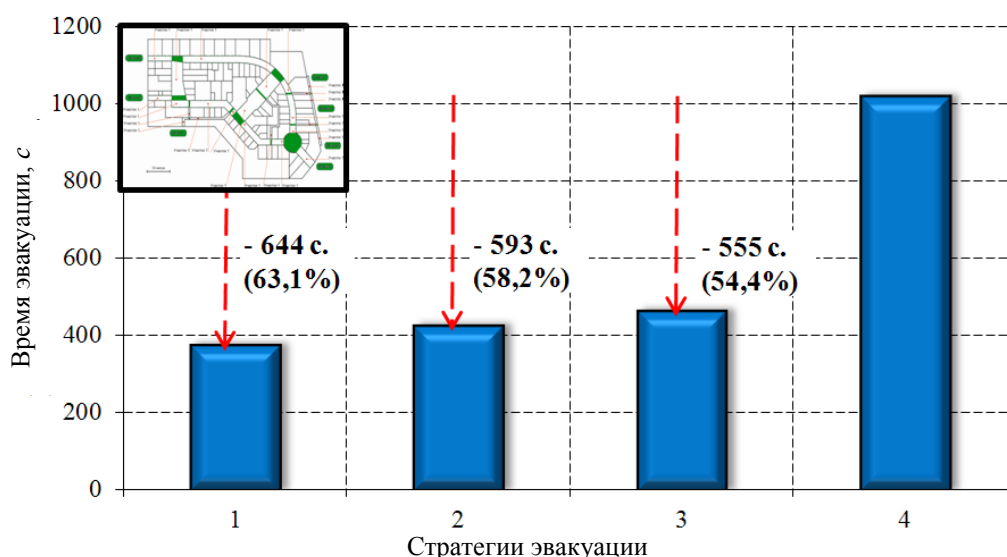


Рис. 9. Гистограмма зависимости времени эвакуации людей от стратегии эвакуации: 1 – алгоритм БМД (весовые коэффициенты 0,9-0-0,1) при условии, что все выходы открыты; 2 – алгоритм БМД (весовые коэффициенты 0,9-0-0,1) при условии, что открыты только основные выходы (1, 2, 4); 3 – алгоритм КМД при условии, что открыты только основные выходы (1, 2, 4); 4 – алгоритм КМД при условии, что все выходы открыты

Результаты, полученные при моделировании эвакуации в торговом центре, позволили разработать 4 стратегии эвакуации, которые целесообразно применять при организации эвакуации людей при пожаре в зданиях ТЦ (табл. 2), а также алгоритм их выбора (рис. 10).

Таблица 2

Стратегии управления эвакуацией при пожаре в зданиях торговых центров

Стратегии эвакуации	Свойства стратегии	Способы оповещения и управления	
		Персонал	Посетители
Стратегия № 1	Направление всех эвакуируемых по безопасным маршрутам движения Параметры расчёта безопасного маршрута: весовые коэффициенты: 0,9 – 0 – 0,1; частота работы алгоритма – 5	Оповещение персонала о направлениях безопасного движения с помощью динамических указателей и радиоканальной связи	Оповещение посетителей о направлениях безопасного движения с помощью персонала и динамических указателей
Стратегия № 2	Направление всех эвакуируемых по кратчайшему маршруту движения, ведущему к наиболее широкому эвакуационному выходу	Оповещение персонала о направлениях безопасного движения с помощью динамических указателей и радиоканальной связи	Оповещение посетителей о направлениях безопасного движения с помощью персонала и динамических указателей
Стратегия № 3	Направление всех эвакуируемых по кратчайшему маршруту движения, ведущему к наиболее широкому эвакуационному выходу	Оповещение персонала о направлениях безопасного движения с помощью радиоканальной связи и речевого оповещения	Оповещение посетителей о направлениях безопасного движения с помощью персонала и речевого оповещения
Стратегия № 4	Направление всех эвакуируемых по кратчайшему маршруту движения, ведущему к наиболее широкому эвакуационному выходу	Оповещение персонала о направлениях безопасного движения с помощью радиоканальной связи	Оповещение посетителей о направлениях безопасного движения с помощью персонала

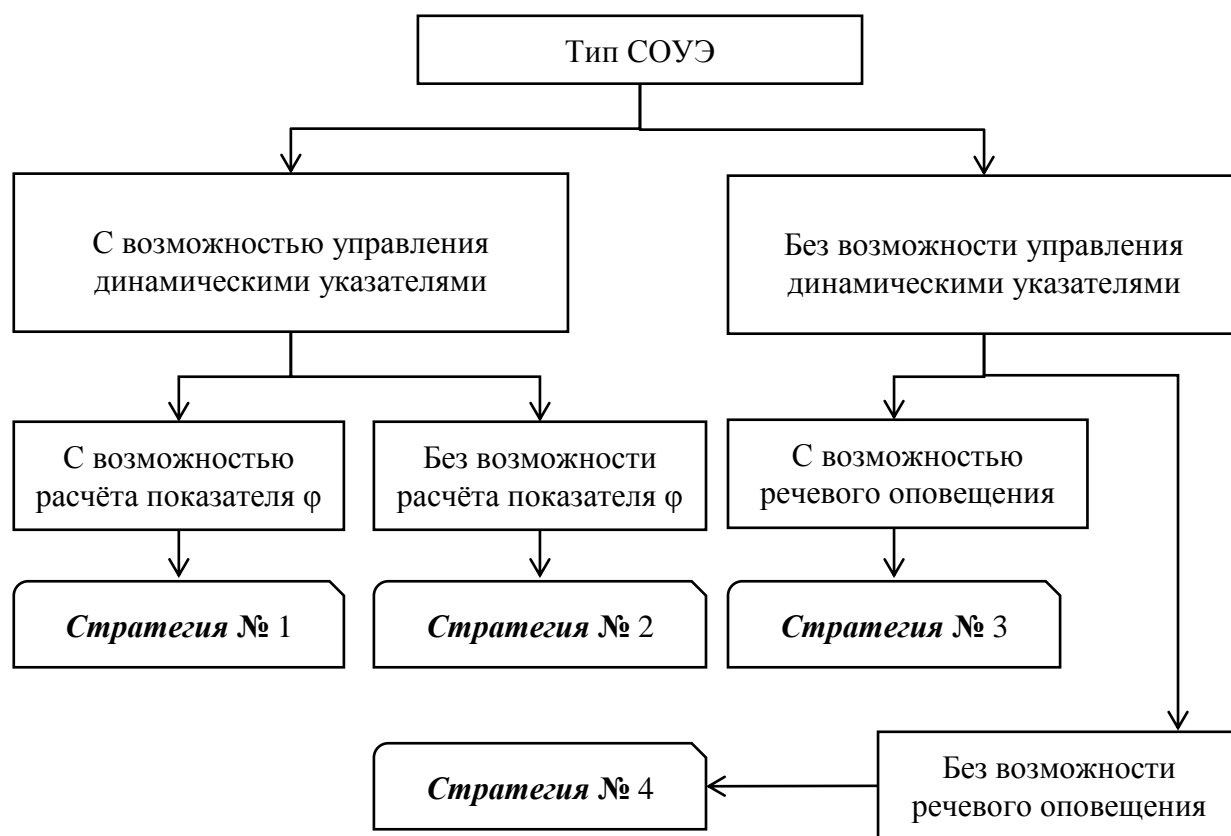


Рис. 10. Блок-схема алгоритма выбора стратегии управления эвакуацией людей при пожаре в зданиях ТЦ

По результатам проведённой работы можно сделать следующие **выводы**:

1. Для предотвращения образования скоплений людских потоков высокой плотности как на участках маршрутов движения, так и в местах их пересечения необходимо применять весовые коэффициенты $0,9 - 0 - 0,1$.

2. Для своевременного направления людей по безопасным маршрутам движения необходимо установить частоту работы алгоритма, равную 5.

3. Установлено, что применение предложенного подхода к управлению эвакуацией людей при пожаре позволяет уменьшить время эвакуации до 64 % за счёт равномерного распределения людей к эвакуационным выходам и отсутствия образования скоплений людей высокой плотности.

4. Применение алгоритма безопасного маршрута движения целесообразно для случаев, когда существуют нераспределённые эвакуационные выходы, неравномерное распределение эвакуационных потоков к выходам, а также для предотвращения образования скопления людей высокой плотности.

5. Разработанные стратегии управления эвакуацией, а также алгоритм их выбора позволят более обоснованно и целенаправленно управлять эвакуацией при пожаре, дают информационную основу для принятия решений ЛПР.

Полученные результаты открывают новые, перспективные области исследований. В дальнейшем планируется провести экспериментальные исследования с целью оценки влияния реакции эвакуируемых на динамические указатели, а также непосредственно аппаратное функционирование системы поддержки управления эвакуацией [10].

Литература

1. **Шихалев Д.В., Хабибулин Р.Ш., Кемлох Вагум А.У., Крэйби М.** Алгоритм определения безопасных маршрутов движения людей при пожаре // Технологии техносферной безопасности. Вып. 4 (62). 2015. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
2. **Шихалев Д.В., Хабибулин Р.Ш.** Математическая модель определения направлений безопасной эвакуации людей при пожаре // Пожаровзрывобезопасность. № 4. 2014. С. 51-60.
3. **Shikhalev D., Khabibulin R., Kemloh U.** Development of a Safest Path Algorithm for Evacuation Simulation in Case of fire // Proceedings of IV international conferences on agents and artificial intelligence – ICAART 2014. Anger, France. Pp. 685-690.
4. **McGrattan K. et al.** Fire dynamics simulator (version 5): technical reference guide. NIST Special publication 1018-5. U.S. government printing office, 2007. 86 p.
5. **Приказ** МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 "Об утверждении методики определения расчётных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности".
6. **Kobes M., Helsloot I. et al.** Research Article. Building safety and human behaviour in fire: A literature review // Fire Safety Journal. Vol. 45. Issue 1. January 2010. Pp 1-11.
7. **Самошин Д.А.** Применение концепции "Человек-Среда-Пожар" для понимания поведения персонала торговых комплексов при пожаре: дис. ... докт. фил. 2004. 187 с.
8. **Sandberg A.** Unannounced evacuation of large retail-stores. An evaluation of human behaviour and the computer model Simulex. Scientific report. Lund University. October, 1997.
9. **Холщевников В.В.** Оптимизация путей движения людских потоков. Высотные здания: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ. 1969.
10. **Шихалев Д.В.** О структуре и функциях системы управления эвакуацией людей при пожарах в зданиях // Технологии техносферной безопасности. Вып. 4 (61). 2014. С. 75-80. <http://ipb.mos.ru/ttb>.