

Моделирование процесса эвакуации из высотных зданий и сооружений с использованием пассажирских лифтов

© М. В. Гравит¹, И. Н. Карькин², И. И. Дмитриев^{1(✉)}, К. А. Кузенков¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29)

² FireCat (ИП "Карькин И. Н.") (Россия, 620062, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 66, кв. 4)

РЕЗЮМЕ

Введение. В связи с возрастанием количества многоэтажных зданий и сооружений и тенденцией увеличения числа пожилых людей особенно остро встает вопрос об эвакуации людей с ограниченной мобильностью из таких зданий. В высотных зданиях пути эвакуации очень протяженные, что делает процесс эвакуации для данных групп не только трудным и опасным, но и физически невозможным. При этом большинство препятствий для использования лифтов в качестве основного пути эвакуации устранено если не полностью, то частично.

Цель статьи — моделирование эвакуации людей из высотного здания с применением лифтов в качестве одного из основных путей. При этом поставлены следующие задачи: 1) определить зависимость времени эвакуации от параметров движения людей разных групп мобильности; 2) сравнить расчетное время эвакуации по лестничной клетке и с использованием лифтов.

Методика. Программный комплекс Pathfinder применялся для расчета эвакуации людей из смоделированного здания. Время эвакуации рассчитывалось для случаев эвакуации как исключительно по лестницам, так и при частичном использовании лифтовых узлов. Расчеты проводились с учетом наличия маломобильной группы населения.

Результаты и обсуждение. Определено влияние на расчетное время эвакуации с использованием лифтов параметров времени (начала эвакуации и задержки подачи сигнала), состава потока (моделирование с учетом различных групп мобильности), а также этажа начала эвакуации для каждой группы. Выполнено сравнение времени эвакуации по лестничной клетке и с использованием лифтов. Получены зависимости наиболее оптимального процентного соотношения количества людей, использующих первый и второй варианты эвакуации.

Заключение. Требования к пожаробезопасности лифтов столь же высоки, как и для незадымляемых лестничных клеток. В 60-этажных офисных зданиях (в отличие от 20-этажных) использование лифтов и меры по управлению людским потоком существенно сокращают расчетное время эвакуации. Для высотных зданий в перспективе необходимо рассматривать организацию эвакуации с применением лифтов.

Ключевые слова: многоэтажные здания и сооружения; пожарная безопасность; моделирование пожара; эвакуация; параметры движения людей; опасные факторы пожара; пожарный лифт; группы мобильности.

Для цитирования: Гравит М. В., Карькин И. Н., Дмитриев И. И., Кузенков К. А. Моделирование процесса эвакуации из высотных зданий и сооружений с использованием пассажирских лифтов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 2. — С. 66–80. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.66-80.

✉ Дмитриев Иван Игоревич, e-mail: i.i.dmitriev@yandex.ru

Simulation of evacuation process in high-rise buildings and structures with using passenger elevators

© Marina V. Gravit¹, Ilya N. Karkin², Ivan I. Dmitriev^{1(✉)}, Kirill A. Kuzenkov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Polytechnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation)

² FireCat (PE "I. N. Karkin") (Pervomayskaya St., 66, Apartment 4, Ekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620062, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The number of multi-storey buildings and structures increases every year. Now there is an improving tendency of elderly people who remains be able to work even in old age. The issue of evacuation people with reduced mobility is especially acute. In high-rise buildings, evacuation paths are very long, which makes the evacuation process for these groups not only difficult and dangerous, but also physically impossible. At the same time, most problems with using elevators as the main evacuation path have been almost solved.

The article's purpose is to simulate the evacuation process from a high-rise building with using elevators as one of the main path. Tasks: 1) determine the evacuation time dependence on the movement parameters of people different mobility groups; 2) compare the evacuation time on the staircase and through the elevators.

Methods. The Pathfinder PC was used to calculate the people evacuation from a modeled building. The evacuation time was calculated using both ladders exclusively and with partial use of vertical elevator units. The calculations were carried out taking into account the presence of the reduced mobility population group.

Results and discussion. The evacuation time was obtained using only the ladder and compared with the theoretical computation. The effect on evacuation time with time parameters (the evacuation start and signal delay), the flow composition (various mobility groups), and the evacuation base level for each group are calculated. The evacuation time is compared on the staircase and through elevators. Optimal percentage dependences of people, who use the first and second versions of evacuation, are obtained.

Conclusion. The requirements for fire elevators safety are as high as for non-smoke-free staircases. In 60-storey office buildings (in contrast to the 20-storey), the use of elevators and manage measures for the human flow significantly reduce the evacuation time. For high-rise buildings in the future, it is necessary to consider the organization of evacuation with the use of elevators.

Keywords: multi-storey buildings and structures; fire safety; fire simulation; evacuation; movement parameters of people; dangerous fire factors; fire lift; mobility group.

For citation: M. V. Gravit, I. N. Karkin, I. I. Dmitriev, K. A. Kuzenkov. Simulation of evacuation process in high-rise buildings and structures with using passenger elevators. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 66–80 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.66-80.

✉ Ivan Igorevich Dmitriev, e-mail: i.i.dmitriev@yandex.ru

Введение

Несмотря на развитие строительных технологий и наличие “умной” электроники в уникальных и высотных зданиях и сооружениях, выполнение требований пожарной безопасности, а также принятие дополнительных мер по ее усилению продолжает оставаться одним из важнейших аспектов как на этапе проектирования зданий и сооружений, так и в процессе эксплуатации объекта. С ростом этажности зданий увеличивается количество людей, проживающих в пределах одного объекта, что прямо пропорционально сказывается на плотности людского потока при эвакуации и, в свою очередь, отрицательно влияет на показатель индивидуального пожарного риска. И хотя по данным МЧС России наблюдается тенденция ежегодного снижения количества пожаров и числа погибших (табл. 1), данная тема продолжает оставаться актуальной [1].

Важным параметром, влияющим на скорость движения людского потока при эвакуации из здания, является возрастной состав, тип и количество маломобильных групп населения (МГН). По оценкам World Health Organization [2] к 2050 г. на планете число по-

жилых людей (в возрасте 60 лет и старше) увеличится в 3 раза и достигнет 2 млрд. чел., а в России — 50 млн. чел.

Существует общемировая направленность на модернизацию инфраструктуры с целью обеспечить ее адаптацию для маломобильных групп населения. Современные нормы пожарной безопасности должны учитывать доступность эвакуации для лиц пожилого возраста и МГН. Однако вопрос об эффективной эвакуации маломобильных групп населения недостаточно изучен [3]. В первую очередь это касается высотных зданий, из которых инвалиды из-за своих физических особенностей (низкая скорость движения, нарушение равновесия, рассеяние внимания, недостаточная выносливость) не способны эвакуироваться наравне со здоровыми людьми [4, 5]. Кроме того, динамические габариты инвалида (зона, которую человек занимает при движении с учетом вспомогательных средств передвижения) практически в 2 раза превышают габариты здорового человека, что обуславливает определенные трудности при движении людей с ограниченными физическими возможностями в плотном потоке, особенно в местах локальных сужений [6].

Протяженность путей эвакуации в высотных зданиях и сооружениях достаточно велика, превышает порой сотню метров. Это даже у здоровых людей может вызвать усталость, рассеяние внимания, неосторожность, что в конечном счете станет причиной травматизма. Для пожилых людей и МГН данный способ эвакуации становится особенно трудным, опасным и порой физически невозможным [7].

В [8] отмечается, что лестницы не обеспечивают достаточную пропускную способность для безопасной эвакуации людей из высотного здания. Запрет на использование лифтовых шахт аргументируется не только тем, что шахта лифта является

Таблица 1. Тенденция снижения количества пожаров и числа жертв в период 2015–2017 гг.

Table 1. The tendency to reduce the number of fires and victims in the period 2015–2017

Показатель / Index	Год / Year		
	2015	2016	2017
Количество пожаров Number of fires	145942	139475	132406
Число погибших при пожарах, чел. People died in fires, pers.	9405	8749	7782
В том числе детей, чел. Including children, pers.	462	426	358

по сути дополнительным каналом для распространения дыма и продуктов горения, но и возможностью деформации самой конструкции, что приведет к аварийной остановке устройства в межэтажном пространстве, заклиниванию дверей. Однако при правильной внутренней планировке внутреннего пространства и требуемом пределе огнестойкости конструкций лифтового узла [9] шахта будет изолирована от воздействия пожара, что обеспечит безопасность ее использования. В настоящее время проектируются пожарные лифты с применением специальных огнестойких материалов [7], однако в качестве путей эвакуации их рассматривать нельзя, так как согласно ст. 89 [10] лифт не является средством эвакуации при пожаре (за исключением МГН группы мобильности М4).

Анализ источников, рассматривающих процесс эвакуации [11–13], позволил сформулировать ряд причин, препятствующих эффективной эвакуации людей из высотного здания:

1) образование скоплений людей на входе в лестничную клетку из-за ее ограниченной пропускной способности и невозможности обеспечить беспрепятственное движение людей на нижних этажах из-за высокой плотности потока. Большое скопление людей в замкнутом пространстве приводит к нехватке воздуха, что может служить причиной гибели от компрессионной асфиксии;

2) отсутствие хорошей физической формы у людей, что не позволяет им преодолевать большие расстояния по лестнице и является причиной ее низкой пропускной способности;

3) сложность транспортирования людей с физическими ограничениями категории МГН, в том числе лиц пожилого возраста.

В качестве негативного примера, иллюстрирующего вышесказанное, можно привести эвакуацию при пожаре 1993 г. в ВТЦ в Нью-Йорке, длившуюся 6 ч. Движение по лестничной клетке людского потока высокой плотности привело к травмированию и гибели большого количества людей [14].

Существует ряд причин, препятствующих внедрению эвакуационных лифтов, часть которых приведена в [7], а именно:

- задымление шахты и кабин лифтов;
- отключение электроснабжения;
- остановка лифта на этаже, охваченном огнем;
- деформация и заклинивание дверей лифтов на этаже пожара;
- попадание воды при тушении пожара в шахту лифтов;
- возможное переполнение кабин лифтов эвакуирующимися людьми.

Большинство из перечисленных проблем решено, если не полностью, то частично. К пожарной без-

опасности лифтов предъявляются требования столь же жесткие, как и для лестничных клеток [7]. Эффективные объемно-планировочные решения позволяют рационально распределять человеческие потоки по всем путям эвакуации [15], убирая возможные непроходимые препятствия на пути движения, негативно влияющие на психоэмоциональное состояние человека и шансы его эвакуации в целом [16, 17]. Исследования поведения людей во время пожара [18, 19] выявили, что, если при пожаре лифты продолжают функционировать, часть людей использует их при эвакуации. В пятиэтажных домах доля людей, использующих лифты, достигает 15 %, а в 20-этажных зданиях (в статье рассматривались здания гостиниц) — 67 %. Стоит отдельно отметить, что эвакуация из башен-близнецов после теракта 11 сентября 2001 г. при помощи лифтов обеспечила спасение около 3000 чел. [20].

В настоящее время, когда устранено большинство причин, не позволяющих использовать лифт в качестве одного из основных путей эвакуации, исследования поведения людей в ситуации пожара подтверждают предрасположенность их к использованию лифта в качестве пути эвакуации. Известны также реальные случаи успешного спасения жизней с помощью данного технического средства. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность применения лифтов, особенно в высотных зданиях и сооружениях, в качестве основного пути эвакуации и перейти к комбинированной системе эвакуации людей.

Программные комплексы, использующие в основе расчета индивидуально-поточную модель движения, получили широкое распространение во многих странах. В статье [21] описаны наиболее известные представители расчетных программ данного класса, среди которых Simulex (Англия), Pathfinder (США), FDS+Evac (США – Финляндия), СИТИС (Россия), Сигма ПБ (Россия), Fenix 2+ (Россия) и др. [22–28].

В [29] подчеркивается, что из вышеперечисленных программных комплексов именно в модели Pathfinder реализован наиболее точный алгоритм, предусматривающий интеллектуальное движение людей в потоке (маневрирование, уклонение от столкновения, ускорение при наличии свободного пространства). В более поздних исследованиях [30] обращается внимание на то, что к результатам динамики эвакуации, полученным в программных комплексах, стоит подходить с осторожностью, так как данный процесс сильно зависит от алгоритма программы. Так, например, алгоритм программного комплекса Pathfinder может завышать интенсивность движения людского потока в местах локального сужения, в ре-

в результате чего может быть занижено расчетное время эвакуации.

Одним из примеров успешного моделирования эвакуации в программе Pathfinder является расчет пожаробезопасности библиотеки университета в Нанкине [31].

В статье [32] уделяется особое внимание тому, что наличие специальных транзитных зон (убежищ) внутри здания превращает высотное сооружение в сеть пожаробезопасных отсеков. Промежуточные технические этажи, помимо основного назначения — расположения сетей и коммуникаций здания, превращаются в зоны для отдыха людей при эвакуации и безопасные места, в которых люди могут укрыться от пожара. В проекте предусмотрено две зоны безопасности — 20-й и 40-й этажи.

Стоит отметить, что для получения окончательных данных по расчетному времени эвакуации, более соответствующих реальности, к полученному результату стоит прибавить время, затраченное на начало эвакуации. В статье [33] подчеркивается, что человек тратит часть времени на анализ аварийной ситуации, попытки собрать вещи. Данная задержка, по мнению авторов [34], является одной из основных причин травмирования и гибели людей.

Особенно актуальна данная поправка для офисных зданий и торговых комплексов. Несмотря на тот факт, что люди находятся в бодрствующем состоянии, много времени уходит на реакцию людей на оповещение о пожаре [35, 36], которая в офисных зданиях составляет примерно 170 с после срабатывания системы оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) [37]. При этом в [38] доказывается, что среднее время начала эвакуации может составлять всего 17 с при профессиональной работе обслуживающего персонала бизнес-центров. Данный параметр является комплексным и зависит от множества факторов, включающих как пожарно-технические характеристики здания, так и косвенные, например уровень противопожарной политики руководства (культуры пожаробезопасности) [39].

При организации процесса эвакуации важно рассматривать решения, направленные не только на сокращение времени эвакуации, но и на снижение плотности людских потоков. Это даст возможность минимизировать риски травматизма людей и образования помех в процессе движения. В качестве наиболее эффективного решения стоит рассматривать поэтапную эвакуацию [11]. Схема организации поэтапной эвакуации основана на разделении потоков эвакуирующихся людей и предотвращении их пересечения. Пример инструкции по организации пешей поэтапной эвакуации (без использования лифтов) приведен в [40]. На основе результатов моделирования рассчитана таблица временных задержек для каждого этажа рассматриваемой секции.

Цель настоящей статьи — моделирование эвакуации людей из высотного здания с применением лифтов в качестве одного из основных путей эвакуации.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- определены зависимости времени эвакуации от параметров движения людей разных групп мобильности в смоделированном высотном многоэтажном офисном здании в ПК Pathfinder;
- проведено сравнение времени эвакуации по лестничной клетке и с использованием лифтов.

Методика

Программный комплекс Pathfinder применялся для расчета эвакуации людей из смоделированного здания. Расчетное время эвакуации вычислялось для случаев эвакуации как исключительно по лестницам, так и при частичном использовании лифтовых узлов. Расчеты проводились с учетом наличия маломобильной группы населения. За единицу времени (временной шаг), отвечающую за точность моделирования, принято 0,50 с. Время начала эвакуации $t_{нач.эв} = 170$ с.

Смоделировано высотное здание (рис. 1 и 2) со следующими параметрами:

- количество этажей — 60;
- количество секций — три по 20 этажей;
- количество жилых этажей в секции — 19 (20-й этаж — технический);
- высота этажа — 3 м;
- полезная площадь этажа — 600 м²;
- плотность 100 чел. на этаж (из расчета 1 чел. на 6 м² полезной площади). Соотношение людей групп мобильности М1, М2, М3, М4 принято соответственно 90, 4, 4 и 2 %. При расчете принято избыточное количество лиц МГН (10 %)

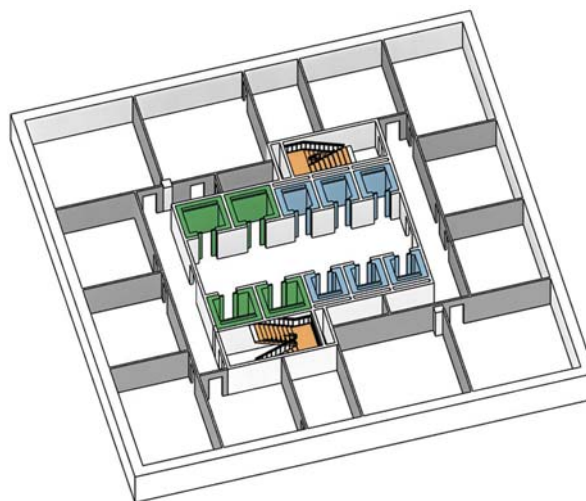


Рис. 1. План типового этажа моделируемого здания офисного центра

Fig. 1. The standard floor plan of the simulated office building

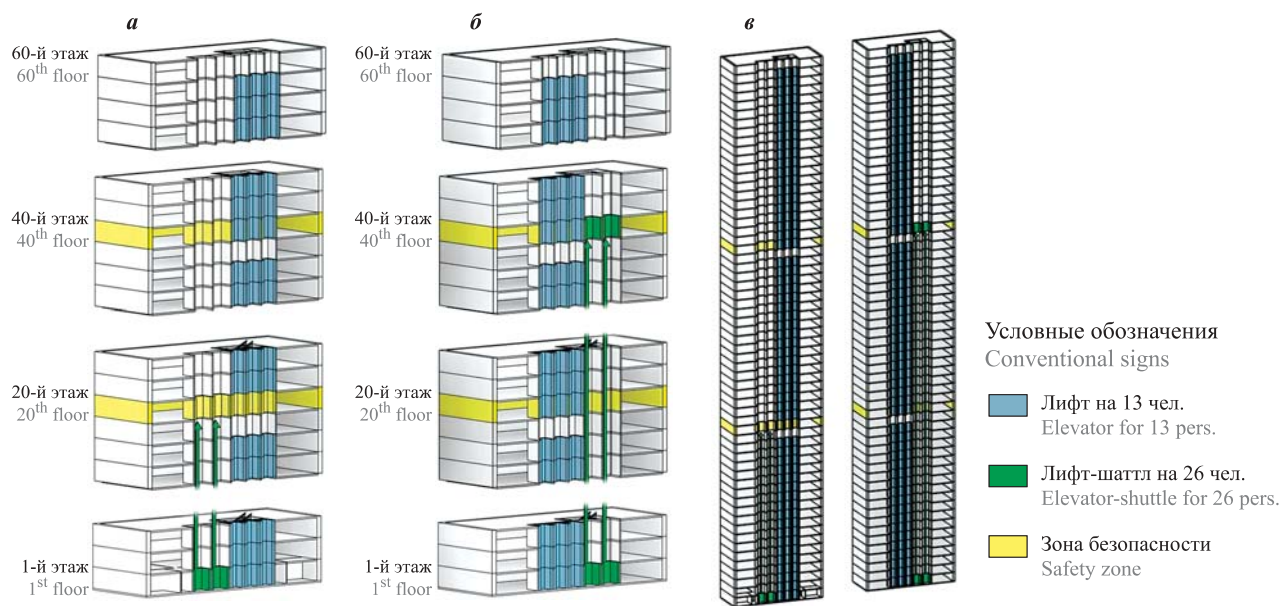


Рис. 2. Разрез моделируемого здания офисного центра: *а* — движение лифта-шаттла с 1-го по 20-й этаж; *б* — движение лифта-шаттла с 1-го по 40-й этаж; *в* — общий разрез здания для обоих случаев

Fig. 2. Simulated office-building section: *a* — elevator-shuttle movement from the 1st to the 20th floor; *b* — elevator-shuttle movement from the 1st to the 40th floor; *v* — common building section for both cases

из-за демографической тенденции сохранения работоспособности населения пенсионного возраста и в условиях доступности среды;

- количество людей в каждой секции — по 1900 чел.; всего людей в здании — 5700 чел.;
- две П-образные лестницы типа НЗ, марш — 1350 мм;
- 6 лифтов на 13 чел., перемещающиеся в пределах секции (ускорение $a = 1,2 \text{ м/с}^2$, максимальная скорость движения $v_{\text{max}} = 2,5 \text{ м/с}$);
- 4 лифта-шаттла на 26 чел., по 2 на секцию ($a = 1,2 \text{ м/с}^2$, $v_{\text{max}} = 4 \text{ м/с}$), которые являются вертикальными связями между 1-м этажом здания и 1-м этажом 2-й и 3-й секций (20-м и 40-м этажами соответственно).

Подбор лифтов представлен в табл. 2.

Методика расчета вертикального транспорта в общественных зданиях приводится в прил. 2 неактуализированного нормативного документа “Пособие по проектированию общественных зданий и сооружений к СНиП 2.08.02–85”. Представленный в Пособии расчет аналогичен расчету в ГОСТ Р 52941–2008 (Лифты пассажирские. Проектирование систем вертикального транспорта в жилых зданиях), поэтому, несмотря на то что расчет приведен для жилых зданий, используем его и для общественных.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим эвакуацию отдельной секции (1–19-й этажи).

Согласно ст. 89 [10] для эвакуации людей, относящихся к группе мобильности М4, используются

лифты, предусмотренные для транспортировки пожарных команд, остальным же группам населения пользоваться лифтами запрещено. Их эвакуация идет только по лестничным клеткам. Расчетное время эвакуации для групп М1–М3 для секции представлено в табл. 3.

Полученное расчетное время эвакуации не противоречит теоретическим результатам, представленным в статье [41] для одной лестницы и приведенным в табл. 4. В секции находится 1900 чел., следовательно, на одну лестницу приходится 950 чел. При этом стоит учитывать, что в табл. 4 указана нижняя граница временного интервала.

Рассмотрим изменение скорости эвакуации при использовании лифтов группами мобильности М2 и М3 при различных вариантах уровня посадочного этажа (табл. 5).

Из табл. 5 видно, что, помимо сокращения времени эвакуации лиц групп М2 и М3 при использовании ими лифта, наиболее рационально забирать людей, начиная с первых этажей. Примем за эффективный уровень начала эвакуации лиц групп М2 и М3 4-й этаж.

Рассмотрим влияние временной задержки начала эвакуации на общее время эвакуации в пределах одной секции (табл. 6). Данная мера должна обеспечить уменьшение плотности людского потока и, как следствие, предотвратить образование заторов, препятствующих его эффективному движению. Задержка достигается за счет задержки подачи сигнала СОУЭ на определенных этажах.

Таблица 2. Подбор лифтов по ГОСТ Р 52941–2008

Table 2. Elevator selection in according to National Standard of the Russian Federation 52941–2008

№ п/п No.	Показатель / Index	Внутри- секционные лифты Inside section elevator	Лифты-шаттлы Elevator-shuttles	
			1-19-й этажи 1–19 th floors	1–40-й этажи 1–40 th floors
I	Коэффициенты / Coefficients			
1	Коэффициент вероятной высоты подъема лифта / Coefficient of the probable height of the elevator	0,7	0,7	0,7
2	Коэффициент заполнения кабины лифта при подъеме / Coefficient of the elevator car filling during the ascent	0,8	0,8	0,8
3	Коэффициент заполнения кабины лифта при спуске / Coefficient of the elevator car filling during descent	1	1	1
4	Показатель интенсивности пассажиропотока ¹ / Indicator of the passenger traffic intensity ¹	4	4	4
II	Параметры лифта / Lift parameters			
1	Грузоподъемность, кг / Elevator capacity, kg	1000	2000	2000
2	Номинальная вместимость кабины ² , чел. / Nominal capacity of the cabin ² , pers.	13,0	26,0	26,0
3	Скорость движения лифта, м/с / Elevator speed, m/sec	2,5	4,0	4,0
4	Путь, проходимый лифтом при разгоне до номинальной скорости и торможении от номинальной скорости до полной остановки, м / Elevator path during acceleration to nominal speed and braking to the full stop, m	7,0	16,0	16,0
III	Результаты расчета количества лифтов / Calculation results of the elevator number			
1	Высота подъема лифта от уровня пола основного посадочного этажа до уровня пола верхнего обслуживаемого этажа, м / Lifting elevator height from the base level to the upper served floor, m	54,00	60,00	120,00
2	Вероятная высота подъема лифта, м / Probable elevator lifting, m	37,80	42,00	84,00
3	Число вероятных остановок лифта выше основного посадочного этажа при подъеме / The possible elevator stops number above the base floor during lifting	8,17	2,00	2,00
4	Число вероятных остановок лифта выше основного посадочного этажа при спуске / The possible elevator stops number above the base floor during descent	9,59	2,00	2,00
5	Число вероятных остановок лифта за круговой рейс выше основного посадочного этажа / The possible elevator stops number of circular voyage is higher than the main landing	17,76	4,00	4,00
6	Затраты времени на разгон лифта до номинальной скорости, торможение от номинальной скорости до полной остановки, пуск лифта, открывание и закрывание дверей, с / The acceleration elevator time to the nominal speed, deceleration from the nominal speed to a complete stop, the elevator start, the opening and closing of the doors, sec	12,00	12,00	12,00
7	Время на вход и выход пассажиров при подъеме, с / The entry and exit passenger time during the ascent, sec	16,64	33,28	33,28
8	Время на вход и выход пассажиров при спуске, с / The entry and exit passenger time during the descent, sec	20,80	41,60	41,60
9	Время на вход (выход) одного пассажира при ширине дверного проема более 1000 мм, с / Time to enter (exit) for one passenger with a doorway width more than 1000 mm, sec	0,80	0,80	0,80
10	Суммарное время задержки, с / The total delay time, sec	262,61	134,88	134,88
11	Время кругового рейса, с / Circular voyage time, sec	279,53	158,37	188,37
12	Расчетный пятиминутный пассажиропоток при равномерной заселенности этажей, чел./5 мин / Estimated five-minute passenger flow with uniform floor occupancy, pers. per 5 min	72,00	76,00	76,00
13	Расчетный часовой пассажиропоток, с / Estimated hourly passenger traffic, sec	864,00	912,00	912,00
14	Провозная способность лифта, чел.-ч / Elevator carrying capacity, pers. per hour	150,68	531,93	447,21

№ п/п No.	Показатель / Index	Внутри- секционные лифты Inside section elevator	Лифты-шаттлы Elevator-shuttles	
			1-19-й этажи 1–19 th floors	1–40-й этажи 1–40 th floors
15	Необходимое число лифтов в здании / Required elevator number in the building	5,73	1,71	2,04
16	Принимаемое количество лифтов / Accepted number of elevators	6,00	2,00	2,00
17	Интервал движения лифтов, с / The interval of elevator movement, sec	46,59	79,18	94,18
¹ Показатель интенсивности пассажиропотока характеризует число человек, подлежащих перевозке в течение 5 мин, % от числа людей, пользующихся лифтами в здании. / The indicator of passenger traffic intensity characterizes the number of people to be transported for 5 minutes, % of the number of people using elevators in the building. ² Определяется делением номинальной грузоподъемности лифта на 75 (вес одного пассажира). / It is determined by ratio the nominal elevator capacity to 75 (passenger weight).				

Таблица 3. Расчетное время эвакуации из секции с 1-го по 19-й этаж без использования лифтов

Table 3. Estimated evacuation time of a section 1–19 floor without the use of elevators

Сценарий Scenario	Группа, не использующая лифт The group that does not use the elevator	Использование лифта Using the elevator		Время, с Time, sec
		Группа Group	Посадочный этаж Boarding floor	
1	M1, M2, M3	M4 (100 %)	1–19	1043

Показано, что наличие задержки благоприятно сказывается на общем времени эвакуации ($830 < 859$) (см. табл. 6). Впоследствии при расчете модели можно найти наиболее рациональное соотношение времени задержки сигнала СОУЭ для каждого этажа.

При анализе графика зависимости количества эвакуировавшихся людей от расчетного времени эвакуации (рис. 3) отмечена точка перегиба, после прохождения которой функция нарастает более полого, что связано с неодновременным завершением эвакуации по лестнице и на лифтах.

По завершении использования лифтов (M2, M3 и M4) еще какое-то время люди группы мобильности M1 продолжают спускаться по лестнице, что приводит к увеличению общего времени эвакуации.

Для его минимизации необходимо сократить длительность движения по лестнице, т. е. линеаризовать график.

Рассмотрим ситуацию, когда часть людей группы M1 также использует лифт для спуска к базовому этажу (табл. 7). Данная мера должна привести в идеальном случае к одновременному окончанию эвакуации по лестничным клеткам и на лифтах.

Вышеприведенные расчеты показали, что решение назначить 4-й этаж уровнем начала эвакуации людей групп M2 и M3 не является оптимальным для запроектированного здания. Большое скопление людей, ожидающих прибытия лифта, при уменьшении числа эвакуирующихся по лестнице создает суммарную задержку, приводящую к тому, что лифты приезжают на базовый этаж позже окончания эвакуации по лестничным клеткам.

Учитывая данные табл. 6, в качестве уровня, с которого должна осуществляться эвакуация граждан групп мобильности M2 и M3, принимаем 7-й этаж. Подберем такое соотношение людей группы M1 для эвакуации на лифте, чтобы обеспечить минимальное суммарное время эвакуации (табл. 8).

Самым быстрым по времени стал сценарий с частичной эвакуацией 30 % людей группы M1, которые были направлены на лифт с 7-го по 14-й этаж, и 40 % группы M1 — с 15-го по 19-й этаж (рис. 4).

Таблица 4. Минимальное расчетное время эвакуации из высотного офисного здания

Table 4. Minimum evacuation time of a high-rise office building

Ширина марша, мм, проектная/эффективная Width of the march, mm, project / effective	Минимальное расчетное время эвакуации, мин, при количестве людей, эвакуирующихся по одной лестнице, чел. The minimum evacuation time, min, with the number of evacuating people on one staircase, pers.							
	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
1078/882	9	17	33	50	66	83	99	115
1372/1176	7	13	25	36	48	60	72	84
1666/1470	6	10	19	29	38	48	57	66

Таблица 5. Влияние на суммарное расчетное время эвакуации использования лифтов группами М2 и М3 в секции с 1-го по 19-й этаж

Table 5. Influence on the total time of groups M2 and M3 people evacuation through elevators in a separate section 1–19 floor

Сценарий Scenario	Группа мобильности, использующая лифт Mobility group, using the elevator	Посадочный этаж Boarding floor	Время, с Time, sec
2	М4 (100 %)	1–19	867
	М2, М3 (100 %)	2–19	
3	М4 (100 %)	1–19	859
	М2, М3 (100 %)	4–19	
4	М4 (100 %)	1–19	888
	М2, М3 (100 %)	7–19	
5	М4 (100 %)	1–19	930
	М2, М3 (100 %)	10–19	
6	М4 (100 %)	1–19	985
	М2, М3 (100 %)	13–19	

Таблица 6. Влияние на суммарное расчетное время эвакуации задержки сигнала тревоги в секции с 1-го по 19-й этаж

Table 6. Influence on the total evacuation time of the alarm delay in a separate section 1–19 floor

Сценарий Scenario	Схема задержки сигнала*, с Scheme of the delay signal*, sec	Группа мобильности, использующая лифт Mobility group, using the elevator	Посадочный этаж Boarding floor	Время, с Time, sec
7	0-0-0	М4 (100 %)	1–19	859
		М2, М3 (100 %)	4–19	
8	0-120-240	М4 (100 %)	1–19	850
		М2, М3 (100 %)	4–19	
9	0-120-0-240-0-360	М4 (100 %)	1–19	830
		М2, М3 (100 %)	4–19	

* Согласно ранее принятым допущениям эвакуация лиц групп М2 и М3 осуществляется начиная с 4-го этажа. Сигнал запаздывает циклично, начиная со 2-го этажа, с различными промежутками. Например, схема задержки сигнала СОУЭ в сценарии 9 описывается как: 0-120-0-240-0-360, где 0 — задержка на 2-м этаже, 120 с — на 3-м этаже, 0 — на 4-м этаже, 240 с — на 5-м этаже, 0 — на 6-м этаже и 360 с — на 7-м этаже. / According to previously accepted assumptions, the evacuation of M2 and M3 mobility groups is carried out starting from the 4th floor. The signal is delayed cyclically with various intervals beginning from the 2nd floor. For example, the delayed evacuation alert in Scenario 9 is described as: 0-120-0-240-0-360, where 0 is the delay on the 2nd floor, 120 sec — on the 3rd floor, 0 — on the 4th floor, 240 sec — on the 5th floor, 0 — on the 6th floor, and 360 sec — on the 7th floor.

График на рис. 4 представляет собой практически линейную функцию, что свидетельствует об одновременном завершении эвакуации по лестничной клетке и на лифте. Более детально и точно вычислять процентное соотношение людей группы М1 нерационально, так как при эвакуации большая точность (несмотря на расчеты) не будет достигнута.

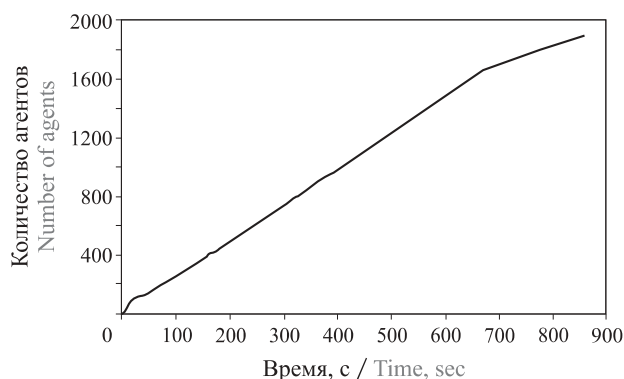


Рис. 3. Зависимость количества эвакуировавшихся людей от расчетного времени эвакуации при использовании лифта группами М2 и М3 начиная с 4-го этажа

Fig. 3. Dependence of the number of people evacuated from the estimated time of evacuation when using the elevator by groups M2 and M3 from the 4th floor

Таблица 7. Влияние на суммарное время эвакуации частичного использования лифта группой М1 в секции с 1-го по 19-й этаж

Table 7. Influence on the total evacuation time at partial using elevators by group M1 in a section from 1st to 19th floor

Сценарий Scenario	Группа мобильности, использующая лифт Mobility group, using the elevator	Посадочный этаж Boarding floor	Время, с Time, sec
10	М4 (100 %)	1–19	780
	М2, М3 (100 %)	4–19	
11	М1 (30 %)	7–19	723
	М4 (100 %)	1–19	
	М2, М3 (100 %)	7–19	
12	М1 (30 %)	7–19	735
	М4 (100 %)	1–19	
	М2, М3 (100 %)	7–19	
13	М1 (30 %)	10–19	791
	М4 (100 %)	1–19	
	М2, М3 (100 %)	7–19	
14	М1 (40 %)	13–19	788
	М4 (100 %)	1–19	
	М2, М3 (100 %)	7–19	
15	М1 (40 %)	7–19	742
	М4 (100 %)	1–19	
	М2, М3 (100 %)	7–19	

Таблица 8. Влияние на суммарное расчетное время эвакуации распределенного движения потока M1 через лифты в секции с 1-го по 19-й этаж

Table 8. Influence on the total evacuation time by distributed partial movement of the M1 human flow through elevators in a section 1–19 floor

Сценарий Scenario	Группа мобильности, использующая лифт Mobility group, using the elevator	Посадочный этаж Boarding floor	Время, с Time, sec
16	M4 (100 %)	1–19	691
	M2, M3 (100 %)	7–19	
	M1 (30 %)	10–14	
	M1 (40 %)	15–19	
17	M4 (100 %)	1–19	754
	M2, M3 (100 %)	4–19	
	M1 (30 %)	7–14	
	M1 (40 %)	15–19	
18	M4 (100 %)	1–19	687
	M2, M3 (100 %)	7–19	
	M1 (30 %)	7–14	
	M1 (40 %)	15–19	

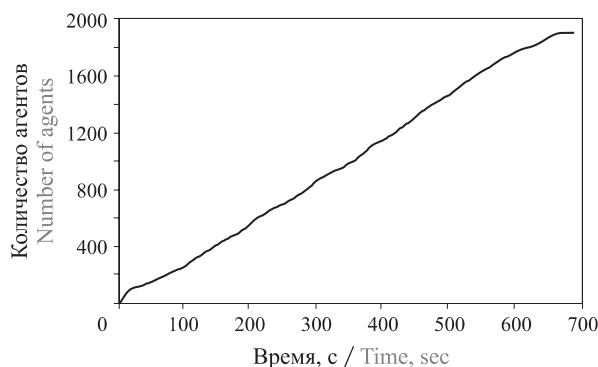


Рис. 4. Зависимость количества эвакуированных людей от расчетного времени эвакуации при использовании лифта группами M2 и M3 начиная с 7-го этажа, 30 % M1 с 7-го по 14-й этаж, 40 % M1 — с 15-го по 19-й этаж

Fig. 4. Dependence of the number of people evacuated on the estimated time of evacuation when using the elevator by groups M2 and M3 from the 7th floor, 30 % M1 — 7–14 floors, 40 % M1 — 15–19 floors

Вычислим расчетное время эвакуации из исходного высотного здания. Результаты расчета представлены в табл. 9.

Рассмотрим график движения людских потоков при эвакуации из всего здания (рис. 5). Неравномерность в конце графика обусловлена отсутствием настроек людского потока относительно шаттлов, связывающих базовый этаж секции и первый этаж здания.

Если продлить график до идеального случая линейной зависимости, то можно получить время, когда эвакуирующиеся на лифтах-шаттлах и по лестницам достигают 1-го этажа одновременно. Таким

Таблица 9. Расчетное время эвакуации из всего высотного здания

Table 9. Estimated evacuation time from the entire high-rise building

Сценарий Scenario	Использование лифта Using the elevator		Время, с Time, sec
	Обычный лифт Ordinary elevator	Лифт-шаттл ¹ Elevator-shuttle	
19 M1-M3 — только лестница / only the stairs	M4 (100 %) 1–19, 20–39, 40–59		2998
20 с выбранными ранее параметрами (внутри секции) / with the previously selected parameters (inside the section)	M4 (100 %) 1–19, 20–39, 40–59	M2, M3, M4 (100 %) M1 (~30 %)	2032 ²

¹ Лифты-шаттлы доставляют людей из вестибюля каждой из секций на первый этаж здания / Elevators-shuttles deliver people from the lobby sections to the first floor.

² Без подбора настроек для шаттлов / No choice of settings for shuttles.

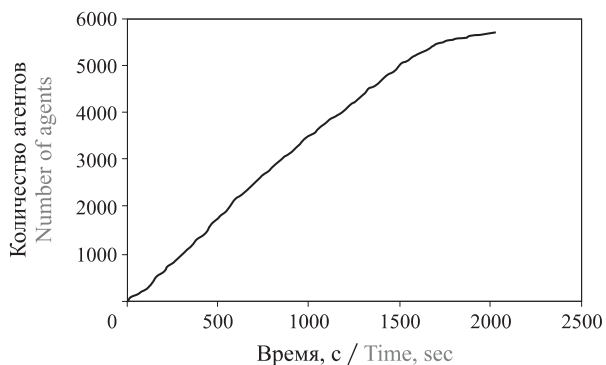


Рис. 5. Зависимость количества эвакуированных людей от расчетного времени эвакуации для всего здания

Fig. 5. Dependence of the number evacuated people from estimated evacuation time for the whole building

образом, можно путем последовательной интерполяции значений графика определить минимальное расчетное время эвакуации с одновременным использованием обычных лифтов и лифтов-шаттлов, равное 1770 с [42, 43]. Параметры эвакуации из секции с 1-го по 19-й этаж приведены в табл. 10.

Сценарии с использованием лифтов получены с учетом схемы задержки сигнала СОУЭ (0–120–0–240–0–360), оказавшейся по результатам табл. 6 наиболее эффективной.

Исходя из результатов, представленных в табл. 10, видно последовательное уменьшение суммарного времени эвакуации при использовании мер, регулирующих людской поток.

Таблица 10. Сводная таблица параметров эвакуации из секции с 1-го по 19-й этаж**Table 10.** Summary of evacuation parameters for the section 1–19 floor

Сценарий Scenario	Только лестница Only the ladder	Использование лифта Using the elevator		Время, с Time, sec
		Группа мобильности Mobility group	Посадочный этаж Boarding floor	
1	M1, M2, M3	M4 (100 %)	1–19	1043
4		M4 (100 %)	1–19	888
		M2, M3 (100 %)	7–19	
11		M4 (100 %)	1–19	723
		M2, M3 (100 %)	7–19	
		M1 (30 %)	7–19	
18		M4 (100 %)	1–19	687
		M2, M3 (100 %)	7–19	
		M1 (30 %)	7–14	
		M1 (40 %)	15–19	

Таблица 11. Итоговая таблица параметров эвакуации из отдельной секции (1–19 этажи) и всего здания (1–60 этажи)**Table 11.** Summary table of evacuation parameters of the section (1–19 floors) and the whole building (1–60 floors)

Объект Object	Время эвакуации, с Evacuation time, sec		Улучшение времени Time of improvement	
	только по лестнице ladder only	с использованием лифтов with elevators	с (мин) sec (min)	%
Секция Section	1043	687	356	34
Здание Building	2998	2032 (1770)*	966 (1228)	32 (41)

* В скобках указано потенциально возможное минимальное значение расчетного времени эвакуации после настройки системы эвакуации и реализации баланса между людьми, спускающимися пешком по лестнице и использующими лифты. Получено путем линеаризации графика, приведенного на рис. 5. / The potential minimum value of the estimated evacuation time after setting up the evacuation system and the implementation of a balance between people walking down the stairs and using elevators is presented in parentheses. It is obtained by graph linearizing from Fig. 5.

Результаты сравнения времени эвакуации по лестничной клетке и с использованием лифтов све-

дены в табл. 11. В качестве параметров движения людей при использовании лифтов примем распределение, определяемое следующей схемой: M4 (100 %) 1–19; M2 и M3 (100 %) 7–19; M1 (30 %) 7–14; M1 (40 %) 15–19.

Применение лифтов в среднем позволяет сократить расчетное время эвакуации на 30 %. Для 20-этажного здания использование лифтов и управление людским потоком уменьшает длительность эвакуации всего на 6 мин, что ставит под сомнение необходимость применения данного технического средства в качестве основного эвакуационного пути. Однако в высотном 60-этажном офисном здании с большой плотностью людей улучшение результата превышает 15 мин (а при дополнительной настройке людских потоков при использовании лифтов-шаттлов до 20 мин).

Выводы

Требования к пожаробезопасности лифтов столь же высоки, как и для незадымляемых лестничных клеток. Большинство проблем, являющихся причинами запрета использования лифтов в качестве основного эвакуационного пути, решено если не полностью, то частично. Опыт мирового проектирования подтверждает эффективность использования лифтов при организации эвакуации во время пожара.

Сравнение расчетного времени эвакуации по лестничной клетке и с использованием лифтов показало, что для 20-этажного здания использовать лифтовую систему в качестве одного из основных эвакуационных путей нерационально. Для 60-этажного офисного здания, напротив, меры по управлению людским потоком существенно сокращают время пребывания людей в здании с очагом пожара, поэтому для высотных зданий в перспективе необходимо рассматривать организацию эвакуации с применением лифтов.

Для подтверждения результатов моделирования необходимо проведение натурных исследований, так как любое предположение в области новых технических решений должно обосновываться экспериментальной сходимостью результатов с теоретическими выкладками. Новые технические решения по использованию лифтов, повышающие безопасность людей в условиях чрезвычайной ситуации, после теоретического обоснования и экспериментального доказательства могут быть получены и усовершенствованы с помощью вычислительной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистика пожаров в Российской Федерации за 2017 от 03.02.2018 // Электронная энциклопедия пожарного дела. URL: wiki-fire.org/Статистика-пожаров-РФ-2017.ashx (дата обращения: 07.09.2018).

2. World health statistics 2014. — Geneva : World Health Organization, 2014. — 180 p. URL: http://www.sociologiadellasalute.org/rapporti/world_health_statistics_2014.pdf (дата обращения: 07.09.2018).
3. Холицевников В. В., Самошин Д. А., Истратов Р. Н. Эвакуация людей с физическими ограничениями // Технологии техносферной безопасности. — 2012. — № 3(43). — 5 с.
4. Холицевников В. В., Самошин Д. А., Истратов Р. Н. Исследование проблем обеспечения пожарной безопасности людей с нарушением зрения, слуха и опорно-двигательного аппарата // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2013. — Т. 22, № 3. — С. 48–56.
5. Холицевников В. В., Самошин Д. А. Проблемы обеспечения пожарной безопасности людей с ограниченными возможностями в зданиях с их массовым пребыванием // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2014. — Т. 23, № 8. — С. 37–52.
6. Самошин Д. А., Слюсарев С. В. К вопросу о статических и динамических габаритах пешеходов различных групп мобильности // Вестник МГСУ. — 2016. — № 4. — С. 84–93.
7. Холицевников В. В., Самошин Д. А. К вопросу безопасности использования лифтов при эвакуации из высотных зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2006. — Т. 15, № 5. — С. 45–47.
8. Patton R. M. Fire-safety for the high-rise building // ASHRAE Journal. — 1973. — Vol. 15, No. 14. — P. 34–41.
9. Gravit M., Dmitriev I., Ishkov A. Quality control of fireproof coatings for reinforced concrete structures // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — Vol. 90. — Article No. 012226. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012226.
10. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 29.07.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/90211644> (дата обращения: 05.10.2018).
11. Холицевников В. В., Самошин Д. А. Анализ процесса эвакуации людей из высотных зданий // Жилищное строительство. — 2008. — № 8. — С. 24–26.
12. Серков Б. Б., Самошин Д. А. Безопасная эвакуация людей при строительстве и эксплуатации высотных зданий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2009. — № 2. — С. 32–36.
13. Холицевников В. В. Терминология или идеология — препятствие безопасной эвакуации людей из высотных зданий при пожаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 1. — С. 5–26. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.5-26.
14. Isner M. S., Klem T. J. Fire investigation report: World trade center explosion and fire, New York, February 26, 1993. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 1993.
15. Ройтман В. Обеспечение безопасности людей при пожаре в высотных зданиях // Алгоритм безопасности. — 2006. — № 4. — С. 46–51.
16. Гравит М. В., Недрышкин О. В. Расчет пожарного риска с применением моделирования психоэмоционального состояния человека // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. — 2014. — Т. 1, № 1(5). — С. 135–139.
17. Гравит М. В., Недрышкин О. В. Расчет пожарного риска с учетом психологических факторов // Наука и инновации в технических университетах : материалы Восьмого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. — С. 71–72.
18. Siikonen M.-L., Barlund K., Kontturi R. Transportation design for building evacuation // ASME Workshop to Focus on Elevator Emergencies in High-Rise Buildings. — New York, December 11, 2003.
19. Sekizawa A., Nakahama S., Notake H. Study on feasibility of evacuation using elevators in a high-rise building // ASME Workshop to Focus on Elevator Emergencies in High-Rise Buildings. — New York, December 11, 2003.
20. Final report on the collapse of the World Trade Center towers / NIST NCSTAR 1. — Washington : NIST, 2005. — 302 p. DOI: 10.6028/nist.ncstar.1.
21. Самошин Д. А., Дерюгин Д. П. Анализ математических моделей пешеходных потоков эвакуируемых людей (часть 1) // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 5(63). — С. 90–97.
22. Thompson P., Wu J., Marchant E. Simulex 3.0: Modeling evacuation in multi-story buildings // Fire Safety Science. — 1997. — Vol. 5. — P. 725–736. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-725.
23. Pathfinder: Technical reference. Thunderhead engineering, 2009. URL: <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder> (дата обращения: 05.10.2018).
24. Korhonen T., Hostikka S. Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac — Technical Reference and User's Guide / VTT Working Papers 119. — Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2009.

25. Гравит М. В., Недрышкин О. В. Анализ моделей расчета опасных факторов пожара // Безопасность в чрезвычайных ситуациях : сборник научных трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. — С. 210–214.
26. Карькин И. Н., Скочилов А. Л., Зверев В. В., Контарь Н. А. Валидация и верификация эвакуационной модели СИТИС: Эватек. №. 4152-ТТ2.5. — Екатеринбург : СИТИС, 2008. — 29 с.
27. Яковлев В. В., Гравит М. В., Недрышкин О. В. Перспективы развития программных комплексов расчета пожарного риска и проектирования процессов пешеходной динамики в условиях пожара // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2014. — № 1(190). — С. 224–230.
28. Недрышкин О. В., Гравит М. В. Программные комплексы моделирования опасных факторов пожара // Пожарная безопасность. — 2018. — № 2. — С. 38–46.
29. Самошин Д. А. Современные программные комплексы для моделирования процесса эвакуации людей // Пожарная безопасность в строительстве. — 2011. — № 1. — С. 60–63.
30. Самошин Д. А., Дерюгин Д. П. Анализ математических моделей пешеходных потоков эвакуируемых людей (часть 2) // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 6(64). — С. 110–119.
31. Li Ming-xin, Zhu Shun-bing, Wang Jing-hong, Zhou Zheng. Research on fire safety evacuation in a University Library in Nanjing // Procedia Engineering. — 2018. — Vol. 211. — P. 372–378. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.025.
32. Cowlard A., Bittern A., Abecassis-Empis C., Torero J. Fire safety design for tall buildings // Procedia Engineering. — 2013. — Vol. 62. — P. 169–181. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.053.
33. Самошин Д. А. Расчет времени эвакуации людей. Проблемы и перспективы // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2004. — Т. 13, № 1. — С. 33–46.
34. Brennan P., Tomas I. Predicting evacuation response and fire fatalities // Proceedings of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire. — London : Interscience Communications Ltd., 2001. — P. 321–332.
35. Samochine D. A., Boyce K. E., Shields T. J. An investigation into staff behaviour in unannounced evacuations of retail stores — implications for training and fire safety engineering // Fire Safety Science. — 2005. — Vol. 8. — P. 519–530. DOI: 10.3801/iafss.fss.8-519.
36. Шильдс Т. Дж., Бойс К. Е., Холщевников В. В., Самошин Д. А. Поведение персонала торговых комплексов при пожаре. Часть 1. Анализ реальных пожаров и видеозаписей неанонсированных эвакуаций с целью количественного и качественного описания влияния персонала на ход эвакуации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2005. — Т. 14, № 1. — С. 44–52.
37. Меркушкина Т. Г., Самошин Д. А., Хасуева З. С., Зыкова М. Ю. Особенности эвакуации людей из современных офисных зданий при пожаре // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 5(63). — С. 73–81.
38. Шильдс Т. Дж., Бойс К. Е., Самошин Д. А. Исследование эвакуации из торговых комплексов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2002. — Т. 11, № 6. — С. 57–66.
39. Самошин Д. А., Холщевников В. В. Проблемы нормирования времени начала эвакуации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 5. — С. 37–51. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.37-51.
40. Gravit M., Dmitriev I., Kuzenkov K. Phased evacuation algorithm for high-rise buildings // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 245. — Article No. 11012. DOI: 10.1051/mateconf/201824511012.
41. Pauls J. Elevator and stairs for evacuation: Comparison and Combination // ASME Workshop to Focus on Elevator Emergencies in High-Rise Buildings. — New York, December 11, 2003.
42. Dmitriev I., Kuzenkov K., Kankhva V. The use of elevators in the evacuation of high-rise buildings // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 193. — Article No. 03030. DOI: 10.1051/mateconf/201819303030.
43. Gravit M., Dmitriev I., Kuzenkov K. Estimation of evacuation time with elevator application in high-rise buildings // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 245. — Article No. 11011. DOI: 10.1051/mateconf/201824511011.

REFERENCES

1. Fire statistics in the Russian Federation for 2017. Elektronnaya entsiklopediya pozhnogo dela / Electronic Encyclopedia of Fire (in Russian). Available at: wiki-fire.org/Статистика-пожаров-РФ-2017.ashx (Accessed 7 September 2018).

2. World health statistics 2014. Geneva, World Health Organization, 2014. 180 p. Available at: http://www.sociologiadellasalute.org/rapporti/world_health_statistics_2014.pdf (Accessed 7 September 2018).
3. V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin, R. N. Istratov. Evacuation of people with physical disabilities. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2012, no. 3(43), 5 p. (in Russian).
4. V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin, R. N. Istratov. The study of fire safety provision for people with seeing, hearing and moving disabilities. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 3, pp. 48–56 (in Russian).
5. V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin. Problems of fire safety of disabled people in buildings with their mass presence. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 37–52 (in Russian).
6. D. A. Samoshin, S. V. Slyusarev. To a question of static and dynamic dimensions of pedestrians of various groups of mobility. *Vestnik MGSU / Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2016, no. 4, pp. 84–93 (in Russian).
7. V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin. To the issue of safety of using elevators during evacuation from high-rise buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2006, vol. 15, no. 5, pp. 45–47 (in Russian).
8. R. M. Patton. Fire-safety for the high-rise building. *ASHRAE Journal*, 1973, vol. 15, no. 14, pp. 34–41.
9. M. Gravit, I. Dmitriev, A. Ishkov. Quality control of fireproof coatings for reinforced concrete structures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 90, art. no. 012226. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012226.
10. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22 July 2008 No. 123-FZ (ed. on 29 July 2017) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 5 October 2018).
11. V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin. Analysis of the evacuation process of people from high-rise buildings. *Zhilishchnoe Stroitelstvo / Housing Construction*, 2008, no. 8, pp. 24–26 (in Russian).
12. B. B. Serkov, D. A. Samoshin. Safe evacuation during construction and operation of high-rise buildings. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2009, no. 2, pp. 32–36 (in Russian).
13. V. V. Kholshchevnikov. Terminology or ideology — obstruction to safe evacuation of people from high-rise buildings in case of fire. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 5–26 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.01.5-26.
14. M. S. Isner, T. J. Klem. *Fire investigation report: World Trade Center Explosion and Fire, New York, February 26, 1993*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 1993.
15. V. Roytman. Ensuring the safety of people in case of fire in high-rise buildings. *Algoritm bezopasnosti / Security Algorithm*, 2006, no. 4, pp. 46–51 (in Russian).
16. M. V. Gravit, O. V. Nedryshkin. Calculation of fire risk with the application of modeling the psycho-emotional state of human. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy / Fire Safety: Problems and Prospects*, 2014, vol. 1, no. 1(5), pp. 135–139 (in Russian).
17. M. V. Gravit, O. V. Nedryshkin. Calculation of fire risk with account of psychological factors. In: *Nauka i innovatsii v tekhnicheskikh universitetakh: materialy Vosmogo Vserossiyskogo foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Science and Innovations in Technical Universities. Proceedings of the Eighth All-Russian Forum of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Saint Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2014, pp. 71–72 (in Russian).
18. M.-L. Siikonen, K. Barlund, R. Kontturi. Transportation design for building evacuation. In: *ASME Workshop to Focus on Elevator Emergencies in High-Rise Buildings*. New York, December 11, 2003.
19. A. Sekizawa, S. Nakahama, H. Notake. Study on Feasibility of Evacuation using Elevators in a High-rise Building. In: *ASME Workshop to Focus on Elevator Emergencies in High-Rise Buildings*. New York, December 11, 2003.
20. *Final report on the collapse of the World Trade Center towers. NIST NCSTAR 1*. Washington, NIST, 2005. 302 p. DOI: 10.6028/nist.ncstar.1.
21. D. A. Samoshin, D. P. Deryugin. Analysis of mathematical models of the pedestrian flow of people evacuated (part 1). *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, no. 5(63), pp. 90–97 (in Russian).
22. P. Thompson, J. Wu, E. Marchant. Simulex 3.0: Modeling evacuation in multi-story buildings. *Fire Safety Science*, 1997, vol. 5, pp. 725–736. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-725.

23. *Pathfinder: Technical reference*. Thunderhead engineering, 2009. Available at: <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder> (Accessed 5 October 2018).
24. T. Korhonen, S. Hostikka. *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac — Technical Reference and User's Guide. VTT Working Papers 119*. Espoo, VTT Technical Research Centre of Finland, 2009.
25. M. V. Gravit, O. V. Nedryshkin. Analysis of models for calculating dangerous fire factors. In: *Bezopasnost v chrezvychaynykh situatsiyakh: sbornik nauchnykh trudov VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Safety in Emergency Situations. Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2016, pp. 210–214 (in Russian).
26. I. N. Karkin, A. L. Skochilov, V. V. Zverev, N. A. Kontar. *Validatsiya i verifikatsiya evakuatsionnoy modeli SITIS: Evatek. No. 4152-TT2.5* [Validation and verification of the evacuation model CITIS: Evatech. No. 4152-TT2.5]. Yekaterinburg, SITIS Publ., 2008. 29 p. (in Russian).
27. V. V. Yakovlev, M. V. Gravit, O. V. Nedryshkin. Development prospects software complex fire hazard calculations pedestrian and design process dynamics under fire. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU / St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2014, no. 1(190), pp. 224–230 (in Russian).
28. O. V. Nedryshkin, M. V. Gravit. Software complexes for modeling of dangerous fire factors. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2018, no. 2, pp. 38–46 (in Russian).
29. D. A. Samoshin. Modern program complexes for modeling the process of people evacuation. *Pozharnaya bezopasnost v stroitelstve / Fire Safety in Construction*, 2011, no. 1, pp. 60–63 (in Russian).
30. D. A. Samoshin, D. P. Deryugin. Analysis of mathematical models of the pedestrian flow of people evacuated (part 2). *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, no. 6(64), pp. 110–119 (in Russian).
31. Ming-xin Li, Shun-bing Zhu, Jing-hong Wang, Zheng Zhou. Research on fire safety evacuation in a University Library in Nanjing. *Procedia Engineering*, 2018, vol. 211, pp. 372–378. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.025.
32. A. Cowlard, A. Bittern, C. Abecassis-Empis, J. Torero. Fire safety design for tall buildings. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 62, pp. 169–181. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.053.
33. D. A. Samoshin. Calculation of people's evacuation time. Problems and perspectives. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 33–46 (in Russian).
34. P. Brennan, I. Tomas. Predicting evacuation response and fire fatalities. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire*. London, Interscience Communications Ltd., 2001, pp. 321–332.
35. D. A. Samochine, K. E. Boyce, T. J. Shields. An investigation into staff behaviour in unannounced evacuations of retail stores — implications for training and fire safety engineering. *Fire Safety Science*, 2005, vol. 8, pp. 519–530. DOI: 10.3801/iafss.fss.8-519.
36. T. J. Shields, K. E. Boyce, V. V. Kholshchevnikov, D. A. Samoshin. Behavior of the supermarket personnel at fire. Part 1. The analysis of real fires and video records of non-announced evacuations with the aim of quantitative and qualitative description of the influence of the personnel on the evacuation process. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2005, vol. 14, no. 1, pp. 44–52 (in Russian).
37. T. G. Merkushkina, D. A. Samoshin, Z. S. Khasueva, M. Yu. Zyкова. Features evacuation of people from modern office buildings in case of fire. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, no. 5(63), pp. 73–81 (in Russian).
38. T. J. Shields, K. E. Boyce, D. A. Samoshin. Study of evacuation from retail stores. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2002, vol. 11, no. 6, pp. 57–66 (in Russian).
39. D. A. Samoshin, V. V. Kholshchevnikov. Problems of regulation of time to start evacuation. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 5, pp. 37–51 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.37-51.
40. M. Gravit, I. Dmitriev, K. Kuzenkov. Phased evacuation algorithm for high-rise buildings. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 245, article no. 11012. DOI: 10.1051/mateconf/201824511012.
41. J. Pauls. Elevator and stairs for evacuation: Comparison and combination. *ASME Workshop to Focus on Elevator Emergencies in High-Rise Buildings*. New York, December 11, 2003.
42. I. Dmitriev, K. Kuzenkov, V. Kankhva. The use of elevators in the evacuation of high-rise buildings. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 193, art. no. 03030. DOI: 10.1051/mateconf/201819303030.

43. M. Gravit, I. Dmitriev, K. Kuzenkov. Estimation of evacuation time with elevator application in high-rise buildings. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 245, art. no. 11011. DOI: 10.1051/mateconf/201824511011.

Поступила 09.10.2018; после доработки 06.03.2019; принята к публикации 25.03.2019
Received 9 October 2018; received in revised form 6 March 2019; accepted 25 March 2019

Информация об авторах

ГРАВИТ Марина Викторовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры “Строительство уникальных зданий и сооружений”, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: marina.gravit@mail.ru

КАРЬКИН Илья Николаевич, канд. физ.-мат. наук, директор ИП “Карькин И. Н.”, Свердловская обл., г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: ilya@pyrosim.ru

ДМИТРИЕВ Иван Игоревич, студент кафедры “Строительство уникальных зданий и сооружений”, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: i.i.dmitriev@yandex.ru

КУЗЕНКОВ Кирилл Александрович, студент кафедры “Строительство уникальных зданий и сооружений”, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: kuzenkovk@yandex.ru

Information about the authors

Marina V. GRAVIT, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Construction of Unique Buildings and Structures Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: marina.gravit@mail.ru

Ilya N. KARKIN, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of FireCat (PE “I. N. Karkin”), Ekaterinburg, Sverdlovsk Region, Russian Federation; e-mail: ilya@pyrosim.ru

Ivan I. DMITRIEV, Student of Construction of Unique Buildings and Structures Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: i.i.dmitriev@yandex.ru

Kirill A. KUZENKOV, Student of Construction of Unique Buildings and Structures Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: kuzenkovk@yandex.ru