

УДК 004.942

© В. М. Колодкин, Б. В. Чирков, В. К. Вахтиев

## МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ В ЗДАНИИ<sup>1</sup>

В работе представлена модель движения людских потоков, которая ориентирована на применение в системе управления эвакуацией людей из здания в условиях пожара — RINTD-Evac. Модель поддерживает расчет скоростей и направлений движения людских потоков в каждой точке в зависимости от обстановки в здании. В модели используется экспериментально установленная зависимость скорости перемещения людей от их количества в ближайшем окружении. Направление движения в каждой точке здания определяется из условия минимальности достижения людьми безопасной зоны. Представлено краткое описание программной реализации модели. Приводится сопоставление результатов моделирования эвакуации людей из здания, полученных на основе модели RINTD-Evac и общеизвестных моделей FDS+Evac и Pathfinder.

*Ключевые слова:* управление эвакуацией, модель движения людских потоков, моделирование эвакуации, проектирование ограничений.

### Введение

Современные модели движения людских потоков в здании направлены на описание движения, максимально приближенного к действительному. Это позволяет оценить время эвакуации людей, при условии свободного перемещения людей по зданию, и выявить некоторые недостатки конструктивных решений здания, наблюдая за возникновением скоплений людей.

Приближение к действительности достигается за счет учета поведения людей. Учет поведенческих особенностей людей добавляет в модель неопределенность направления движения, так как направление движения человека определяется очень многими факторами и не всегда отвечает условию максимальной скорости эвакуации, что создает помехи для использования данных моделей в системе динамического управления людскими потоками во время эвакуации из здания при пожаре.

Система динамического управления людскими потоками формирует команды управления, направляющие людские потоки в каждый момент времени в соответствии с данными мониторинга состояния среды в здании. Предполагается, что люди в процессе эвакуации подчиняются указаниям системы. Поддерживается возможность перестроения путей движения к эвакуационным выходам под воздействием внешних факторов (блокирование помещений опасными факторами пожара, директивное управление процессом эвакуации).

Модель движения людских потоков, ориентированная на использование в системе динамического управления эвакуацией, не учитывает особенностей поведения людей, но базируется на экспериментально установленной зависимости скорости перемещения людей от количества людей в ближайшем окружении. Модель, получившая название RINTD-Evac, призвана проектировать такие траектории, движение людей по которым приведет к минимальному времени эвакуации.

### § 1. Моделирование эвакуации людей из здания при пожаре

Моделирование эвакуации людей из здания зависит от того, как в нем распространяется пожар. Развитие пожара и движение людских потоков — взаимозависимые процессы. При движении людских потоков в здании (открывание и закрывание дверей, окон) изменяются

<sup>1</sup>Работа поддержана грантом Минобрнауки № RFMEFI57414X0038 в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

воздушные потоки, которые оказывают влияние на развитие пожара. В свою очередь, опасные факторы пожара оказывают влияние на движение людей, блокируя эвакуационные пути.

Для прогнозирования развития опасных факторов пожара существует ряд моделей:

- 1) интегральные модели;
- 2) зонные модели;
- 3) полевые модели.

Широко распространенные программные продукты, которые позволяют моделировать развитие опасных факторов пожара (ОФП), — FDS [1], CFAST [2], «Ситис: ВИМ» [3].

FDS реализует полевую модель пожара. Особое внимание уделяется распространению дыма и теплопередаче при пожаре. В CFAST реализована двухзонная модель пожара.

«Ситис: ВИМ» проводит расчет динамики развития опасных факторов пожара по интегральной модели. Имеется возможность создания нескольких расчетных сценариев с неограниченным количеством элементов топологии. Реализована возможность 2D/3D-анимации распространения опасных факторов пожара с возможностью пошагового просмотра.

Каждый программный комплекс моделирования пожара в здании и эвакуации людей из здания [4–8] имеет собственный формат представления информации о здании. Для моделирования движения людских потоков в зависимости от типа и требуемой точности могут применяться различные пространственно-информационные модели (ПИМ) здания. В качестве входных данных любой модели требуется как минимум:

- 1) информация о форме, размере, типе и связанности помещений;
- 2) информация о распределении людей в здании по зонам и помещениям.

## § 2. Модели свободного движения людей при эвакуации

Исследования свободного движения людей в России прошло длительный путь. Начало исследованиям было положено работами С. В. Беляева [9]. Современное состояние исследований отражено в работе В. В. Холщевникова и Д. А. Самошина [10]. Математические модели частично реализованы в программных комплексах. Из российских программных комплексов моделирования процесса эвакуации можно выделить «СИТИС: Флоутек» и «СИТИС: Эватек» [4]. Процесс эвакуации в рамках комплекса «СИТИС: Флоутек» анализируется на основе упрощенной аналитической модели движения людского потока [11]. В основе моделирования эвакуации в рамках комплекса «СИТИС: Эватек» лежит математическая модель индивидуально-поточного движения людей из здания [4] (аналог программы Simulex [5] Эдинбургского университета).

В общем случае можно выделить три типа моделей движения людей в здании:

- 1) агентные модели;
- 2) потоковые модели;
- 3) гибридные модели.

В агентных моделях движения людей из зданий объектом моделирования является отдельно взятый человек, что позволяет учитывать индивидуальные особенности людей и особенности их поведения в процессе эвакуации из зданий. Построение агентных моделей основано на введении эффективных сил, описывающих взаимодействие между агентами, между агентом и различными препятствиями. Вводится так называемая социальная составляющая сил, отвечающая за особенности в поведении агента. Направление движения агента в каждый момент времени определяется по направлению результирующего вектора сил.

Необходимо отметить, что возможности описания индивидуальных особенностей движения агентов в процессе эвакуации сделали программные комплексы, построенные на основе агентных моделей, весьма распространенными в мире. Наиболее известными и распространенными являются программные продукты Pathfinder [6], FDS+Evac [7], STEPS [8].

В программном продукте Pathfinder реализован алгоритм движения, учитывающий маневрирование людей в потоке. Программный продукт Pathfinder поддерживает процедуру многоагентного имитационного моделирования эвакуации, использующую управляемое поведение для моделирования передвижения людей. Задается начальное распределение людей по зданию, указываются особенности каждого агента. Для каждого агента прокладывается траектория, отвечающая минимальному расстоянию до ближайшего выхода. Для прокладывания траектории

в программном продукте Pathfinder используется поисковый алгоритм  $A^*$  [12] и триангулированная навигационная сетка [13]. Триангулированная навигационная сетка выделяет в здании так называемые области проходимости агентов.

Программный продукт Pathfinder состоит из трех модулей: графического интерфейса пользователя, моделирующей программы и программы трехмерной визуализации результатов.

В программном продукте FDS+Evac временной интервал моделируемых процессов разделен на элементарные интервалы, на каждом из которых моделируются два процесса: процесс пожара в здании и процесс движения людей по зданию. Пространство, ограниченное конфигурацией здания, разделено пространственной разностной сеткой.

Распространение пожара моделируется на пространственно-временной разностной сетке в рамках программного комплекса FDS. Процесс эвакуации рассматривается как квази-2D-система, где автономные агенты, имитирующие эвакуирующихся людей, движутся в соответствии с уравнениями движения и процессами принятия решений. Модель отслеживает каждого агента индивидуально, и каждый агент имеет свои персональные свойства, такие как масса, скорость движения, знакомые двери/выходы и т. д. Влияние пожара в здании на процесс эвакуации происходит через воздействие на агентов растущих концентраций дыма и газов.

Программный комплекс SIMULEX предназначен в основном для моделирования пешеходного движения людей при эвакуации. Программный комплекс STEPS имеет возможность учитывать лифты для эвакуации.

Потоковая модель использует некоторую аналогию с описанием движения сплошной среды. Обычно моделируется движение группы людей. В модели движения не выделяются координаты отдельных людей, а вводится понятие плотности людского потока в  $\epsilon$ -окрестности каждой точки. Тогда если поверхность, по которой перемещаются люди, аппроксимируется некоторой разностной сеткой, то на сетке формулируются уравнения движения в терминах плотности людского потока, которые подобны уравнениям непрерывности в механике сплошной среды. Направление движения людского потока обычно направлено в сторону ближайшего выхода из здания.

В работах [14, 15] представлена модель для управления эвакуацией людскими потоками при пожаре, основанная на представлении здания в виде графа. Вершины графа — места слияния людских потоков; ребра графа — участки путей эвакуации с постоянными характеристиками. Модель предназначена для определения путей эвакуации на основе минимизации расстояния от произвольной вершины графа до вершины, отвечающей зоне безопасности.

Для решения большинства инженерных задач потоковая модель является достаточно эффективным инструментом. Однако модель не учитывает различия между людьми ни по физическим возможностям, ни по различию поведения в экстремальных ситуациях.

### **§ 3. Модель движения людских потоков, предназначенная для управления эвакуацией, — RINTD-Evac**

Модель RINTD-Evac описывает людские потоки в здании, отвечающие условию минимальности времени освобождения здания людьми (по времени выхода последнего человека из здания). Траектории движения людских потоков проектируются в динамическом режиме исключительно по помещениям, где опасные факторы пожара (температура, концентрация дыма, концентрации газов, выделяющихся при пожаре, концентрация кислорода) находятся в допустимых границах.

Программный комплекс, реализующий модель эвакуации людей RINTD-Evac, функционирует с использованием предварительно заданной пространственно-информационной модели (RINTD-ПИМ) здания и с результатами моделирования динамики пожара в здании. Результаты моделирования пожара в здании (прогнозирование последствий развития аварийного сценария) передаются в программный комплекс RINTD-Evac в виде временной функции блокирования помещений здания опасными факторами пожара.

Пространственно-информационная модель (RINTD-ПИМ) здания представляется в виде совокупности полигонов и связей между полигонами. Каждый полигон имеет набор характеристик в зависимости от его типа (внутренний дверной проем, эвакуационный выход, лестница,

помещение), заданный при формировании модели здания. Для создания ПИМ здания используется геоинформационная система QGIS [16] со специализированным модулем (RINTD-QGIS). Результат работы модуля RINTD-QGIS хранится в формате JSON.

Для моделирования движения людских потоков при управляемой эвакуации модель здания преобразуется в совокупность поэтажных разностных сеток и совокупность разностных сеток на переходах между этажами.

Модель RINTD-Evac базируется на экспериментально установленной зависимости скорости перемещения людей от количества людей в ближайшем окружении [10]:

$$V_{Dj} = V_{0j} * \left( 1 - a_j * \ln \frac{D_j}{D_{0j}} \right), \tag{1}$$

где  $V_{Dj}$  — случайная величина скорости свободного движения (при отсутствии влияния окружающих людей), зависящая от вида пути  $j$ ;

$a_j$  — коэффициент, определяющий степень влияния плотности людского потока при движении по  $j$ -му виду пути;

$D_j$  — текущее значение плотности потока;

$D_{0j}$  — пороговое значение плотности потока, по достижении которого плотность становится фактором, влияющим на скорость движения.

Коэффициенты, входящие в (1), представлены в таблице 1 [10].

**Таблица 1.** Значения коэффициентов  $a_j$  и  $D_{0j}$  в зависимости от вида пути

Вид пути	$a_j$	$D_{0j}$
Горизонтальный в зданиях	0.295	0.51
Проем	0.295	0.65
Лестница вниз	0.400	0.86
Лестница вверх	0.305	0.67

Предельная плотность людей принимается равной  $D_{\max} = 5$  чел./м<sup>2</sup>, так как при этом значении отсутствует силовое воздействие между людьми и компрессионное сдавливание [10].

Разностные сетки, используемые в модели RINTD-Evac, можно представить в виде совокупности неориентированных графов с выделенными вершинами (корневой граф)  $G_m = (V, E)$ ,  $m \in N$ , где  $m$  — номер графа,  $N$  — количество элементов разностной сетки, принадлежащих эвакуационным выходам,  $V$  — непустое множество вершин,  $E$  — множество ребер.

Поиск путей по каждому графу  $G$  от произвольной вершины до корня (до элемента эвакуационного выхода) осуществляется по модифицированному алгоритму Дейкстры [17], где вес ребра рассчитывается по следующим правилам.

1. Вес первого ребра, которое соединяет элемент эвакуационного выхода с пространством вне здания, рассчитывается по формуле:

$$t_{ijk,m}^p = \frac{h}{V_m^p}, \tag{2}$$

где  $i, j, k$  — координаты элемента на разностной сетке;  $h$  — шаг разностной сетки;  $V_m^p$  — скорость движения через эвакуационный выход, рассчитанная по соотношению (1);  $m$  — номер графа;  $p$  — номер ребра,  $p \geq 0$ .

2. Вес последующих, после первого, ребер рассчитывается по рекуррентной формуле:

$$t_{ijk,m}^p = t_{ijk,m}^{p-1} + \frac{h}{V_m^p}, \tag{3}$$

где  $V_m^p$  — скорость движения, рассчитанная по соотношению (1);  $p \geq 1$ .

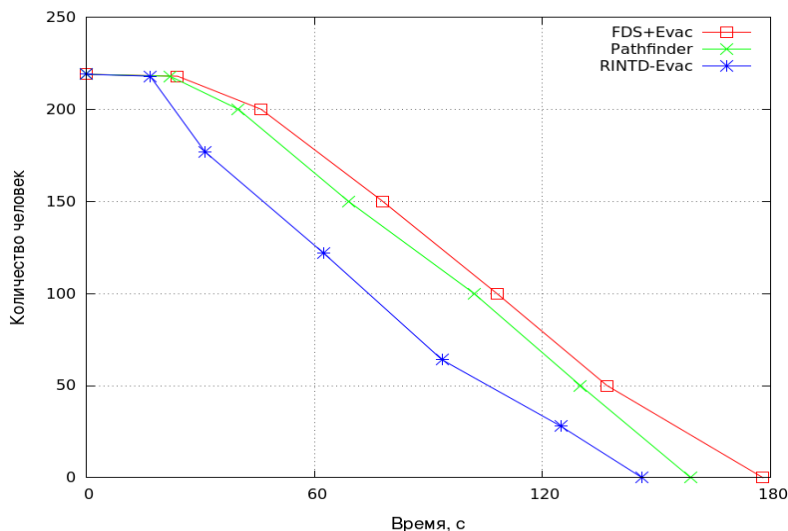


Рис. 1. Зависимость количества людей в здании от времени

Обновление значений весов ребер по формулам (2) и (3), в пределах графа, происходит на каждом расчетном шаге.

Программный комплекс RINTD-Evac реализован на языке программирования java 8 и содержит три модуля: графический интерфейс пользователя, моделирующую программу и интерфейс двумерной визуализации результатов в режиме моделирования.

Графический интерфейс пользователя выполнен с использованием графической библиотеки Swing. После запуска пользователю представляется ПИМ здания, которая показывается поэтажно, инструмент для задания начального распределения людей в здании. Также из графического интерфейса реализуется запуск моделирования. Моделирующая программа реализует представленный выше алгоритм и является ядром программного комплекса. Интерфейс визуализации результатов в режиме моделирования дает возможность наблюдать за процессом эвакуации поэтажно.

На вход комплекс RINTD-Evac принимает RINTD-ПИМ. На выходе — файл, который содержит информацию о плотности людского потока в каждом помещении в моменты времени с установленным шагом, об итоговом времени эвакуации и дополнительную информацию (количество людей в здании, плотность в каждом помещении при начальном распределении).

#### § 4. Тестирование модели

Для тестирования модели движения людских потоков при эвакуации людей из здания были использованы результаты, представленные в работе [18]. В работе [18] сравнивались результаты моделирования процесса эвакуации людей из здания, полученные на основе двух широко используемых моделей FDS+Evac и Pathfinder. Были использованы сопоставимые пространственно-информационные модели здания и совпадающее распределение людей по помещениям здания. Площадь горизонтальной проекции человека принята равной  $f = 0.12 \text{ м}^2$ .

На рисунке 1 представлены графики зависимости количества людей в здании от времени, а в таблице 2 (где  $t_1$  — время выхода из здания первого человека, с;  $t_{\text{эв}}$  — время выхода из здания последнего человека, с) — численные значения характерных интервалов времени применительно к использованию моделей FDS+Evac, Pathfinder и RINTD-Evac.

Сопоставление численных значений для параметров эвакуационных процессов, полученных в рамках различных моделей, показывает, что характеристики различаются незначительно. По крайней мере, для относительно простого здания, на котором сравнивались модели FDS+Evac и Pathfinder [18]. Вместе с тем, как и следовало ожидать, специализированная модель RINTD-Evac приводит к минимальным временам эвакуации людей из здания.

**Таблица 2.** Время эвакуации первого и последнего человека исследуемых моделей

Модель	Время, с	
	$t_1$	$t_{эв}$
FDS+Evac	24	178
Pathfinder	22	159
RINTD-Evac	16.8	146

**§ 5. Применение программного комплекса RINTD-Evac при проектировании эксплуатационных ограничений**

Здание подлежит эксплуатации, если, в соответствии со статьей 6 ФЗ-123, оно отвечает требованиям пожарной безопасности либо пожарный риск для здания не превышает допустимого значения. Но возникают ситуации, когда здание в той или иной части не отвечает требованиям пожарной безопасности. При этом иногда удается найти такие эксплуатационные параметры для здания, при которых для любого сценария, связанного с пожаром помещения, выполняется условие

$$t_{эв} \leq k * t_{бл}, \tag{4}$$

где  $t_{эв}$  — время выхода последнего человека из помещения;  $t_{бл}$  — время блокирования путей эвакуации;  $k$  — коэффициент надежности, принимаемый равным  $k = 0.8$ .

Фактически задача сводится к поиску ограничений на распределение пожарной нагрузки по помещениям здания и поиску ограничений на распределение людей по помещениям здания, чтобы для любого аварийного сценария и любого помещения выполнялось неравенство (4).

Рассматривалось шестиэтажное здание учебного корпуса общей площадью  $\approx 10000$  м<sup>2</sup> и числом студентов более двух тысяч человек. Для здания была построена пространственно-информационная модель и выделены три десятка сценариев, которые, по предварительным оценкам, являются наиболее опасными с точки зрения последствий.

Расчет времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара для каждого сценария производился по интегральной математической модели [19]. Расчет времени эвакуации, с учетом динамики блокирования путей эвакуации, проводился с использованием программного комплекса RINTD-Evac.

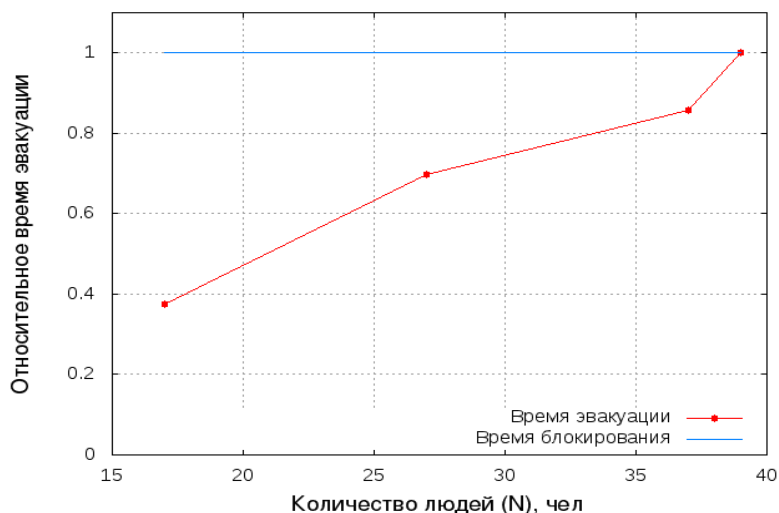
В результате проведенных исследований были выявлены помещения, наличие людей в которых нарушает условие (4), то есть если мы планируем использовать здание, то эти помещения должны быть исключены для нахождения в них людей.

Для других помещений было определено предельное количество человек, которые могут находиться в помещении. Так, на рисунке 2 показана зависимость относительного времени эвакуации от количества людей в помещении. Из рисунка следует, что предельное количество человек, которые могут находиться в данном помещении, составляет 35 человек.

Программный комплекс RINTD-Evac применялся при анализе пожарной безопасности многих зданий [20–22]; был использован при ранжировании районов Удмуртской Республики по уровню пожарной опасности зданий общеобразовательных учреждений. При этом исследовалось 160 зданий общеобразовательных учреждений, расположенных на территориях 24 районов Удмуртской Республики [23].

**Заключение**

Модель движения людских потоков для эвакуации людей из здания при пожаре RINTD-Evac и построенный на базе модели программный комплекс позволяют решать практически значимые задачи. Его использование вне рамок управления процессом эвакуации находит ограниченное применение, так как приводит к занижению времени эвакуации (по сравнению с другими математическими моделями).



**Рис. 2.** Зависимость времени освобождения помещения от количества людей в нем

Однако модель и соответствующий программный комплекс найдут широкое применение в динамических системах управления эвакуацией, так как они обеспечивают минимальное время эвакуации людей из здания. При этом в динамическом режиме строятся траектории людских потоков в направлении к эвакуационным выходам. Это определяет дальнейшее развитие комплекса в направлении представления команд эвакуации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J.E. Fire dynamics simulator (version 5), user's guide // NIST special publication. 2010. Vol. 1019. № 5. P. 1–186.
2. Jones W.W., Peacock R.D., Forney G.P., Reneke P.A. CFAST — consolidated model of fire growth and smoke transport (version 6): technical reference guide // NIST Special Publication. 2009. Vol. 1026. № 6. P. 1–125.
3. Руководство по валидации «СИТИС: ВИМ». Екатеринбург: ООО «СИТИС», 2011. 25 с.
4. СИТИС [Электронный ресурс]. <http://www.sitis.ru/> (дата обращения: 15.05.2015).
5. Thompson P.A., Marchant E.W. A computer model for the evacuation of large building populations // Fire Safety Journal. 1995. Vol. 24. № 2. P. 131–148.
6. Pathfinder [Электронный ресурс]. <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder/pathfinder-features/> (дата обращения: 15.05.2015).
7. Korhonen T., Hostikka S. Fire dynamics simulator with evacuation: FDS+ Evac / Technical Reference and User's Guide. VTT Technical Research Centre of Finland, 2009.
8. STEPS [Электронный ресурс]. <http://www.steps.mottmac.com/> (дата обращения: 15.05.2015).
9. Беляев С.В. Эвакуация зданий массового назначения. М.: Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1938. Т. 2.
10. Холщевников В.В., Самошин Д.А. Эвакуация и поведение людей при пожарах. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. 212 с.
11. Техническое руководство «СИТИС: Флоутек ВД 2.70». Екатеринбург: ООО «СИТИС», 2013. 38 с.
12. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. Vol. 4. № 2. P. 100–107.
13. Техническое руководство к программе Pathfinder. Екатеринбург: ООО «СИТИС», 2013. 23 с.
14. Шихалев Д.В., Хабибулин Р.Ш. Математическая модель определения направлений безопасной эвакуации людей при пожаре // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 4. С. 51–60.
15. Шихалев Д.В. О структуре и функциях системы управления эвакуации людей при пожаре в зданиях / Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». 2014. Вып. 4 (56). С. 1–9. <http://www.ipb.mos.ru/ttb>
16. QGIS [Электронный ресурс]. <http://www.qgis.org/ru/site/> (дата обращения: 15.05.2015).

17. Ахо А.В., Хопкрофт Д.Э., Ульман Д.Д. Структуры данных и алгоритмы. Издательский дом Вильямс, 2000.
18. Grigoras Z.C. Analysing the human behavior in a fire drill. Comparison between two evacuation software: FDS+Evac and Pathfinder // Proceedings of the International Scientific Conference CIBv. Brasov. 2014. P. 273–280.
19. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
20. Колодкин В.М., Варламов Д.В., Яценко А.А. Современные технологии расчета и управления пожарными рисками в зданиях и сооружениях // Проблемы анализа риска. 2013. Т. 10. № 5. С. 28–37.
21. Колодкин В.М., Морозов О.А., Варламов Д.В. Количественная оценка пожарного риска общественных зданий территориального образования // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8. № 3. С. 50–56.
22. Колодкин В.М., Варламов Д.В., Малых Д.М. Количественная оценка пожарного риска образовательных учреждений // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 4. С. 4–7.
23. Колодкин В.М., Морозов О.А. Ранжирование территорий по уровню пожарной опасности общественных зданий // Пожарная безопасность. 2013. № 1. С. 112–118.

Поступила в редакцию 15.05.2015

Колодкин Владимир Михайлович, д. т. н., профессор, директор Института гражданской защиты, Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.  
E-mail: kolodkin@rintd.ru

Чирков Борис Владимирович, аспирант, кафедра математического моделирования и прогнозирования, Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.  
E-mail: b.v.chirkov@gmail.com

Ваштиев Василий Константинович, ассистент, кафедра безопасности жизнедеятельности, Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.  
E-mail: vashtiev@ya.ru

*V. M. Kolodkin, B. V. Chirkov, V. K. Vashtiev*

#### **A foot traffic model for the fire evacuation control in a building**

*Keywords:* management of evacuation, model of foot traffic, modeling of evacuation, restrictions design.

MSC: 97N80, 81T80

The paper presents a model of foot traffic which is designed for using in a system of evacuation out of a building in case of fire — RINTD-Evac. The model supports the calculation of velocities and direction of people flows at each point depending on a situation in the building. The model uses experimentally established dependence of the rate of people movement from the number of people in near surroundings. The direction of motion at each point of the building is determined by the condition of minimality of achieving a safe zone. A brief description of software implementation of the model is given. A comparison of simulation results describing evacuation of people from a building, based on the model RINTD-Evac and well-known models FDS + Evac and Pathfinder is performed.

#### REFERENCES

1. McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J.E. *Fire dynamics simulator (version 5), user's guide*, NIST special publication, 2010, vol. 1019, no. 5. pp. 1–186.
2. Jones W.W., Peacock R.D., Forney G.P., Reneke P.A. *CFAST — consolidated model of fire growth and smoke transport (version 6): technical reference guide*, National Institute of Standards and Technology, Special Publication, 2009, vol. 1026, no. 6, pp. 1–125.
3. *Validation Guide "SITIS: VIM"*, Yekaterinburg: SITIS, 2011 (in Russian).
4. *SITIS* [electronic resource]. <http://www.sitis.ru/> (accessed 15/05/2015).



5. Thompson P.A., Marchant E.W. A computer model for the evacuation of large building populations, *Fire Safety Journal*, 1995, vol. 24, no. 2, pp. 131–148.
6. *Pathfinder* [electronic resource]. <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder/pathfinder-features/> (accessed 15/05/2015).
7. Korhonen T., Hostikka S. *Fire dynamics simulator with evacuation: FDS+ Evac*, Technical Reference and User's Guide, VTT Technical Research Centre of Finland, 2009.
8. *STEPS* [electronic resource]. <http://www.steps.mottmac.com/> (accessed 15/05/2015).
9. Belyaev S.V. *Evakuatsiya zdaniy massovogo naznacheniya* (Evacuation of buildings with many people), Moscow: All-Union Academy of Architecture, 1938, vol 2.
10. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A. *Evakuatsiya i povedenie lyudei pri pozharakh* (Evacuation and human behavior in fires), Moscow: Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2009.
11. *Technical Manual "SITIS: Flowtech WA 2.70"*, Yekaterinburg: SITIS, 2013, 38 p. (In Russian).
12. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, vol. 4, no. 2, pp. 100–107.
13. *Technical Reference Pathfinder*, Thunderhead Engineering, Manhattan, USA, 2012, 41 p.
14. Shikhalev D.V., Khabibulin, R.Sh. Mathematical model of definition of safe evacuation directions in case of fire, *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 51–60.
15. Shikhalev D.V. About structure and functions of an escape route system in buildings in case of a fire, *Tekhnologii Tekhnosfernoi Bezopasnosti*, 2014, no. 4 (56), pp. 1–9. <http://www.ipb.mos.ru/ttb>
16. *QGIS* [electronic resource]. <http://www.qgis.org/ru/site/> (accessed 15/05/2015).
17. Aho A.V., Hopcroft J.E., Ullman J.D. *Data structures and algorithms*, Amsterdam: Addison-Wesley, 1983.
18. Grigoras Z.C. Analysing the human behavior in a fire drill. Comparison between two evacuation software: Fds+ Evac and Pathfinder, *Proceedings of the International Scientific Conference CIBv*, Brasov, 2014, pp. 273–280.
19. Koshmarov Yu.A. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* (Prediction of fire hazards in the room), Moscow: Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2000.
20. Kolodkin V.M., Varlamov D.V., Yatsenko A.A. Modern technologies of calculation and management of fire risk in buildings, *Issues of Risk Analysis*, 2013, vol. 10, no. 5, pp. 28–37 (in Russian).
21. Kolodkin V.M., Varlamov D.V., Morozov O.A. Quantitative assessment of fire risk public buildings territorial, *Issues of Risk Analysis*, 2011, vol. 8, no. 3, pp. 50–56 (in Russian).
22. Kolodkin V.M., Varlamov D.V., Malykh D.M. Quantitative assessment of fire risk of educational institutions, *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 4, pp. 4–7 (in Russian).
23. Kolodkin V.M., Morozov O.A. Ranking areas of fire danger level of public buildings, *Pozharnaya bezopasnost'*, 2013, no. 1, pp. 112–118 (in Russian).

Received 15.05.2015

Kolodkin Vladimir Mikhailovich, Doctor of Engineering, Professor, Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia  
E-mail: kolodkin@rintd.ru

Chirkov Boris Vladimirovich, Post-Graduate Student, Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia.  
E-mail: b.v.chirkov@gmail.com

Vashtiev Vasilii Konstantinovich, Assistant Lecturer, Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia.  
E-mail: vashtiev@ya.ru