

В. М. КОЛОДКИН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования и прогнозирования, Удмуртский государственный университет (Россия, Республика Удмуртия, 426000, г. Ижевск, Университетская ул., 1; e-mail: kolodkin@rintd.ru)

М. Э. ГАЛИУЛЛИН, ст. преподаватель кафедры математического моделирования и прогнозирования, Удмуртский государственный университет (Россия, Республика Удмуртия, 426000, г. Ижевск, Университетская ул., 1; e-mail: m.a.galiullin@gmail.com)

УДК 614.842.65–056.24;004.942

ПРОГРАММНЫЕ АЛГОРИТМЫ, РЕАЛИЗУЮЩИЕ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ЛЮДЕЙ ИЗ ЗДАНИЯ

Освещаются вопросы, связанные с компьютерным моделированием процессов эвакуации людей из здания. Рассматриваются программные реализации модели движения людских потоков, основанные на различном представлении пространственной структуры здания — в виде разностной сетки или графа. Приводятся результаты тестирования программных реализаций на контрольных конфигурациях зданий и сравнение с результатами, полученными с использованием других программных продуктов. Главное внимание уделено применимости описываемых программных алгоритмов в целевой задаче — задаче управления эвакуацией людей из здания в условиях пожара. Сделан вывод о применимости реализованного программного модуля, основанного на пространственном представлении здания в виде графа, в недорогих системах управления эвакуацией людей из здания в режиме реального времени.

Ключевые слова: управление эвакуацией; математическое моделирование; движение людских потоков; теория графов; пространственно-информационная модель здания; микроконтроллеры; беспроводные электронные системы.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.75-85

Введение

Экстренная эвакуация людей из общественных зданий и сооружений — это эффективный способ сохранения их жизни и здоровья при авариях, катастрофах и террористических проявлениях. Особую значимость имеет экстренная эвакуация при пожаре. В этом случае процесс эвакуации управляется системой оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ), в состав которой, в частности, входят эвакуационные знаки пожарной безопасности, световые оповещатели, показывающие направление движения (указатели). Однако статичные указатели эвакуационных путей, присутствующие в каждом здании, во многих случаях показывают людям не самые оптимальные, а порой даже некорректные направления движения, не учитывающие условия развивающегося пожара. Причиной этого является блокирование путей эвакуации в силу развития опасных факторов пожара (ОФП) или большого скопления людей. Действительно, статичные указатели обычно отражают траектории движения людей, предварительно спроектированные для наиболее опасных сценариев развития пожара. Однако эти траек-

тории в горящем здании могут меняться в зависимости от сценария и динамики развития пожара. Иначе говоря, использование статичных указателей траекторий движения в условиях пожара в зданиях и сооружениях может привести к указанию неточных путей эвакуации, что в конечном счете негативно скажется на уровне пожарной безопасности. Конечно, современное развитие науки, техники и технологий позволяет обеспечить очень высокий уровень пожарной безопасности, но, как показано в работе [1], процесс эвакуации не всегда происходит так, как его планируют. Причем избежать процесса вынужденной эвакуации не всегда удастся, даже если здание отвечает требованиям пожарной безопасности.

Для целей настоящей работы будем характеризовать эффективность эвакуации людей из горящего здания интервалом времени Δt_e , в течение которого люди в случае необходимости могут покинуть здание. Эффективность эвакуации людей тем выше, чем меньше значение Δt_e . Можно полагать, что эффективность эвакуации будет возрастать, если информация о безопасных путях эвакуации будет до-

водиться до людей, оказавшихся в горящем здании, в режиме реального времени. Для этого должны использоваться оповещатели, показывающие направление движения людей, с изменяющимся смысловым значением (динамический режим), которые относятся к элементам СОУЭ 5-го типа. В общем случае использование аудиовизуальных оповещателей в динамическом режиме особенно значимо для зданий со сложными объемно-планировочными решениями, в которых люди недостаточно хорошо ориентируются. Кроме того, весьма желательно, чтобы поддержка функционирования оповещателей в динамическом режиме не привела к значительному удорожанию СОУЭ. Динамический режим указания путей эвакуации людям в горящем здании в режиме реального времени поддерживается специализированным программно-аппаратным комплексом (ПАК).

В конфигурации 2015 г. программно-аппаратный комплекс в режиме реального времени обеспечивает контроль состояния и динамики изменения состояния среды (мониторинг состояния среды) в помещениях здания или в частях помещений (зонах) здания при пожаре, выделяя при этом те области, где пребывание человека недопустимо с точки зрения его безопасности. Для управления процессом эвакуации, кроме результатов мониторинга среды в горящем здании, необходима информация о распределении людей по зданию в данный момент времени и по динамике его изменения. Однако по состоянию на 2015 г. без значительного увеличения стоимости ПАК не способен обеспечить достаточную степень точности определения динамики изменения плотности людских потоков в помещениях здания или в их частях. Последнее вынуждает параллельно с мониторингом состояния среды в горящем здании поддерживать процесс моделирования вынужденного движения людских потоков, поддерживая и обеспечивая передачу информации людям, оказавшимся в горящем здании, в режиме опережения реального времени.

Модель вынужденной эвакуации людей из горящего здания, которая используется в ПАК, должна отвечать требованиям по точности проектирования путей эвакуации, по скорости моделирования, по ограничениям по стоимости ПАК. Модель для проектирования путей эвакуации в режиме реального времени использует:

- данные мониторинга состояния среды в горящем здании;
- экспериментально подтвержденную зависимость между характеристиками скорости людского потока в здании и плотностью потока при различных составах и эмоциональном состоянии людей.

Из множества виртуальных траекторий движения людей для эвакуации выбираются те, перемещение по которым обеспечивает минимальное время эвакуации людей из здания, т. е. $\min(\Delta t_e)$.

Для построения программных алгоритмов, реализующих модель вынужденной эвакуации людей при пожаре, используется представление здания в виде совокупности разностных сеток и в виде графа. При этом каждое помещение (зона внутри помещения) в здании заменяется либо совокупностью отдельных элементов, в пределах которых все характеристики среды и плотности людских потоков усредняются, либо одним узлом графа. Во втором случае все характеристики среды и плотность людских потоков усредняются по всему помещению (зоне). Очевидно, что с увеличением числа ячеек, на которое разбивается пространство, точность моделирования движения людских потоков повышается (в этом случае усреднение всех характеристик среды и плотности людских потоков происходит по меньшему объему). Однако при этом возрастает и время моделирования, причем на порядки. В связи с этим при разработке программных алгоритмов вынужденного движения людских потоков целесообразно использовать представление здания в виде совокупности разностных сеток (в этом случае уменьшается эффект усреднения характеристик среды и плотности людских потоков), а затем отработанные программные алгоритмы адаптировать применительно к представлению здания в виде графа.

Таким образом, в целях сокращения количества жертв при пожарах в общественных зданиях необходимо разработать программно-аппаратный комплекс указания путей эвакуации людям, оказавшимся в горящем здании. ПАК будет эффективен, если он поддерживает проектирование путей эвакуации в режиме реального времени.

Задача управления эвакуацией

В основе ПАК для указания путей эвакуации из горящего здания лежит идея управления процессом эвакуации людей через постоянный мониторинг состояния среды в здании и направление потоков людей по безопасным маршрутам, обеспечивающим минимальные затраты времени [2]. Мониторинг состояния среды в здании осуществляется через распределенную беспроводную сеть датчиков, которые через заданные интервалы времени измеряют характеристики окружающей среды в помещениях (или в зонах помещений) здания. По результатам мониторинга в автоматическом режиме идентифицируется состояние возникновения чрезвычайной ситуации (ЧС), определяются зоны, в которых нарушаются условия безопасности людей вследствие развития ОФП. В режиме реального времени на основе

математической модели проектируются пути эвакуации из всех помещений здания. Совокупность траекторий эвакуации отвечает условию $\min(\Delta t_e)$. Спроектированные траектории движения показываются людям с помощью светодиодных информационных и звуковых оповещателей. Изменение состояния оповещателей направления движения происходит, если условию $\min(\Delta t_e)$ будет отвечать иная совокупность траекторий. Может случиться так, что блокирование путей эвакуации опасными факторами пожара приведет к увеличению временного интервала эвакуации. Тем не менее, если существуют безопасные для человека траектории выхода из горящего здания, то ПАК должен их обнаружить и обеспечить указание безопасных путей.

Распределенная беспроводная сеть организована на множестве узлов, в состав каждого из которых входит микроконтроллер [3]. Процессы моделирования эвакуации и формирования команд управления организованы на серверах системы, в качестве которых обычно выступают дешевые одноплатные компьютеры.

Математическая модель для проектирования путей эвакуации из горящего здания

Программные алгоритмы проектирования путей эвакуации людей из горящего здания, предназначенные для функционирования в рамках ПАК, призваны обеспечить проектирование и отображение команд управления эвакуацией с учетом динамики развития пожара в режиме реального времени. Учитывая отсутствие достоверных экспериментальных данных по динамике людских потоков в условиях пожара, можно говорить о возможности построения двух типов моделей. Первый тип — мультиагентные модели движения людей в условиях пожара (например, модель социальных сил [4] и ее разновидности; разнообразные модели на основе клеточных автоматов [5]). Возможно, модели этого типа наиболее перспективны, но при их реализации возникают проблемы с настройкой на модели поведения агентов, с обеспечением их работы в режиме реального времени. Второй тип — потоковые модели. Применительно к задаче проектирования путей эвакуации из горящего здания главным допущением является распространение экспериментальных данных, отвечающих потокам людей в зданиях, не охваченных пожаром, на эвакуацию из зданий в условиях пожара. С учетом процедуры последующей валидации модели был сделан выбор в пользу моделей второго типа.

Модель, используемая при проектировании, не должна противоречить имеющимся экспериментальным данным, которые описывают:

- движение людских потоков на участке эвакуации в здании;
- ограничения по безопасности человека, связанные с развитием ОФП.

В связи с этим модель использует экспериментально установленную зависимость характеристик скорости людского потока V_{D_j} (м/мин) от плотности потока [6, 7], применяемую в нормативных документах ([8], ГОСТ 12.1.004–91):

$$V_{D_j} = V_{0_j} \left(1 - a_j \frac{\ln D_i}{D_{0_j}} \right), \quad (1)$$

где V_{0_j} — случайная величина скорости свободного движения (при отсутствии влияния окружающих людей), зависящая от вида пути j и уровня эмоционального состояния людей, м/мин;

a_j — коэффициент, определяющий степень влияния плотности людского потока на скорость его движения по j -му виду пути;

D_i — текущее значение плотности потока, чел./м²;

D_{0_j} — пороговое значение плотности потока, по достижении которого плотность становится фактором, влияющим на скорость движения, чел./м².

Значения параметров, входящих в (1), представлены в табл. 1 ([8], ГОСТ 12. 1. 004–91).

Максимальная плотность людских потоков в наших расчетах принимается $D_{\max} = 5$ чел./м², так как при этом значении не происходит компрессионного сдавливания людей.

Экспериментальные данные, отвечающие ограничениям по безопасности человека, выражаются в критических значениях опасных факторов пожара. Введем функцию проходимости элемента здания:

$$\Lambda(\xi) = 1 - \max_i (\xi_i / \xi_i^*),$$

где ξ_i — значение i -го ОФП;

ξ_i^* — критическое значение i -го ОФП.

В первом приближении аппроксимируем функцию проходимости $\Lambda(\xi)$ ступенчатой функцией $\lambda(\xi)$, изменяющейся от единицы до нуля в точке $\xi_i = \xi_i^*$. Тогда математическое ожидание скорости в точке корректируется с учетом аппроксимации $\lambda(\xi)$. Если опасные факторы пожара в точке не достигли кри-

Таблица 1. Значения V_{0_j} , a_j и D_{0_j} в зависимости от вида пути в здании

Вид пути	V_{0_j} , м/мин	a_j	D_{0_j} , чел./м ²
Горизонтальный путь	100	0,295	0,51
Проем	100	0,295	0,65
Лестница вниз	80	0,400	0,89
Лестница вверх	50	0,305	0,67

тических значений, то математическое ожидание модуля скорости людского потока отвечает выражению (1). В противном случае математическое ожидание модуля скорости в этой точке принимается равным нулю. Аппроксимация ступенчатой функцией функции проходимости в элементе здания $\lambda(\xi)$ обусловлена отсутствием достоверных экспериментальных данных по воздействию ОФП и их совместному воздействию на характеристики движения людского потока.

Направление людского потока в каждой точке определяется условием минимума времени, необходимого для вынужденной эвакуации их из здания, т. е. из множества виртуальных траекторий движения людских потоков при вынужденной эвакуации выбираются те, которые обеспечивают минимум временного интервала эвакуации — $\min(\Delta t_e)$. Информация об этих траекториях сообщается людям. Если обозначить относительную долю людей, остающихся в здании к моменту времени t (с начала процесса эвакуации), $\delta(t)$, то временной интервал эвакуации Δt_e будет определяться условием $\delta(\Delta t_e) = 0$. Теоретически возможно, что $\delta(t) \neq 0$ для любого значения t . В этом случае временной интервал эвакуации Δt_e будет определяться условием $\partial\delta(\Delta t_e)/\partial t = 0$. Условие $\delta(t) \neq 0$ при $t \rightarrow \infty$ фактически означает, что в сложившихся при пожаре условиях не существует траекторий движения, которые бы обеспечили безопасную эвакуацию всех людей.

Предполагается, что люди при эвакуации будут двигаться в соответствии с указаниями динамических оповещателей, функционирующих в режиме реального времени. Определение траекторий движения людей является результатом работы модели.

В других работах [9, 10] авторы предлагают иной подход, который использует результаты предварительного моделирования людских потоков по выбранным участкам эвакуационных путей, а также результаты предварительного моделирования развития опасных факторов пожара. Траектории движения людских потоков выбираются на основании анализа информации (минимизации функционала) о динамике развития опасных факторов пожара, о распределении людей по зданию. Обычно эта информация обрабатывается системой поддержки принятия решений, после чего информация о путях эвакуации доводится до людей [9–11].

Отметим, что широко известные закономерности ([7, 8], ГОСТ 12.1.004–91), связывающие плотность людского потока с характеристиками скорости его движения, не предназначены для проектирования путей эвакуации, но позволяют прогнозировать образование скоплений людей на путях эвакуации. Именно поэтому моделирование движения людских потоков, основанное на экспериментально установ-

ленной зависимости (1), используется для нормирования эвакуационных путей [12].

В программных реализациях проектирование путей эвакуации основано либо на минимизации функционала времени эвакуации, либо на минимизации расстояний до эвакуационных выходов [13]. Например, в программном комплексе “Эватек” [14], который использует соотношение (1) в рамках модели индивидуально-поточного движения людей, пути эвакуации определяются с использованием модифицированного алгоритма Дейкстры [15]. При этом пути эвакуации отвечают минимуму расстояний до выходов. В программном комплексе “Флоутек ВД” [16] расположение и характеристики участков эвакуации являются входным параметром модели, т. е. путь эвакуации определяется экспертом на основе имеющегося у него опыта. Все программные реализации предполагают предварительное задание сценариев пожара и предварительное моделирование динамики распространения опасных факторов пожара. Отметим, что в настоящее время в России не представлены СОУЭ, возможности которых допускают управление эвакуацией посредством использования динамических оповещателей в горящем здании в режиме реального времени.

Алгоритмы, реализующие модель эвакуации

В рамках данной работы рассматриваются две программные реализации описанной выше математической модели. Несмотря на то что модель одна и та же, ее программные реализации различаются настолько, что не представляется возможным их совместное описание. Процедуру валидации проходит только вторая программная реализация, а первая предназначена для прохождения процедуры верификации. Оба решения предполагают наличие пространственно-информационной модели (ПИМ) здания, имеющей определенную структуру [17].

ПИМ здания представляется в виде совокупности элементов пространства здания (помещений или частей помещений — зон), проекции которых на горизонтальную плоскость ограничены полигонами, и связей между элементами пространства. Здесь под помещением (зоной) понимается любая однородная выделенная часть пространства (например, часть комнаты, дверной проем, лестничная клетка и т. д.). Каждый полигон имеет набор характеристик, который формируется при создании модели здания. Из характеристик каждого помещения (зоны) можно выделить начальное количество людей в элементе пространства, пожарную нагрузку, ширину проемов и т. д. Для создания ПИМ здания используется программный комплекс QGIS [18] со специализированным модулем (PlanCreator) [17].

Информационная структура здания хранится в формате JSON [19], который выбран из тех соображений, что позволяет легко проанализировать всю информацию по модели здания, ибо информация структурирована.

Реализация модели с использованием регулярной разностной сетки

Программная реализация модели эвакуации, использующая представление здания в виде регулярной разностной сетки (RINTD-Evac), предназначена для верификации модели эвакуации людей из горящего здания. В этом случае значения и динамика изменения ОФП следуют из результатов моделирования пожара в рамках полевой модели с использованием программного комплекса FDS (Fire Dynamics Simulator) [20]. Принимается приближение, что процесс эвакуации не влияет на процесс пожара в здании. Значения опасных факторов пожара в точках предполагаемого размещения датчиков контроля среды в горящем здании, получаемые из программного комплекса FDS, преобразуются в формат JSON для последующего использования в программах моделирования процесса эвакуации.

Для компьютерного моделирования движения людских потоков ПИМ здания преобразуется в совокупность разностных сеток этажей и переходов между этажами. Разностные сетки можно представить в виде совокупности неориентированных графов с выделенными вершинами (корневой граф): $G_m = (V, E)$, $m \in N$ (где V — непустое множество вершин; E — множество ребер; m — номер графа; N — количество элементов разностной сетки, принадлежащих эвакуационным выходам).

Поиск путей по каждому графу G от произвольной вершины до корня (до элемента эвакуационного выхода) осуществляется по модифицированному алгоритму Дейкстры [15]. Найденный путь отвечает условию $\min(\Delta t_e)$. Вес ребра рассчитывается по следующим правилам:

- вес первого ребра, соединяющего элемент эвакуационного выхода с пространством вне здания, — по формуле

$$t_{ijk,m}^p = \frac{s}{\lambda V_m^p}; \quad (2)$$

- вес остальных ребер — по рекуррентной формуле

$$t_{ijk,m}^p = t_{ijk,m}^{p-1} + \frac{s}{\lambda V_m^p}, \quad (3)$$

где j, i, k — координаты элемента на разностной сетке;

p — номер ребра;

s — длина пути эвакуации в пределах ячейки разностной сетки ($s = h$, если людской поток на-

правлен вдоль координатной сетки; $s = \sqrt{2}h$, если людской поток направлен по диагонали сетки); h — шаг разностной сетки; V_m^p — математическое ожидание модуля скорости людского потока, рассчитанное по соотношению (1).

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

Интерфейс программной реализации данного алгоритма (RINTD-Evac) [21] позволяет наблюдать процесс движения людских потоков в здании, который отображается в виде изменения плотности людского потока в каждом сеточном элементе здания (рис. 1).

Результатом работы модуля RINTD-Evac является таблица распределения людей по помещениям здания в различные моменты времени. Время эвакуации фиксируется по моменту выхода из здания последнего человека.

Для тестирования модели движения людских потоков при эвакуации людей из здания были использованы данные, представленные в работе [22]. В ней сравнивались результаты моделирования процесса эвакуации людей из здания, полученные на основе двух различных по идеологии построения, но широко используемых программных комплексов — FDS+Evac [23] и Pathfinder [24]. В программном комплексе FDS+Evac (совместная разработка США и Финляндии) используется модель социальных сил, в программном комплексе Pathfinder (разработка США) — модель многоагентного имитационного моделирования.

Для тестирования программного модуля использованы сопоставимые пространственно-информационные модели тестового здания и совпадающее распределение людей по помещениям здания (рис. 2).



Рис. 1. Визуализация движения людских потоков на примере тестового здания в сеточной реализации модели

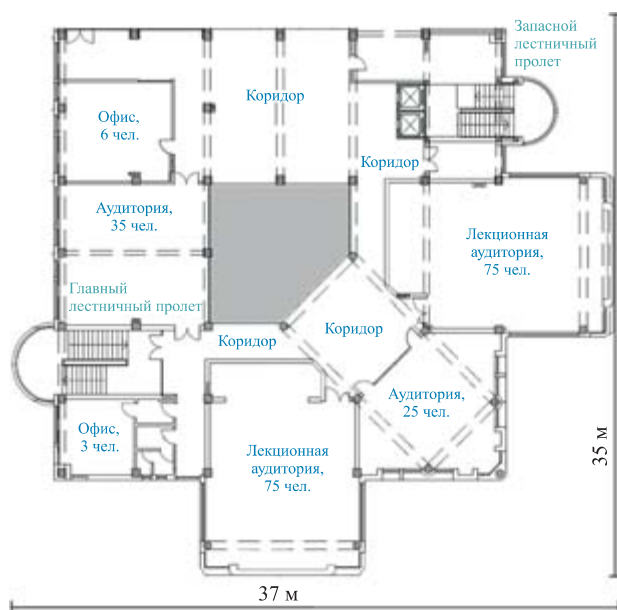


Рис. 2. План тестового здания, использованного в работе [18]

Почему для тестирования модели движения людских потоков предпочтение отдано результатам работы [22]? Для целей верификации важно, что модели различные. Модели поведения агентов допускают учет воздействия на последних опасных факторов пожара, но в отличие от программной реализации RINTD-Evac в них не предусматривается задание указаний направлений движения агентов.

На рис. 3 представлены графики зависимости количества людей в здании от времени применительно к использованию моделей FDS+Evac, Pathfinder и RINTD-Evac.

Сопоставление численных значений 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. Вместе с тем,

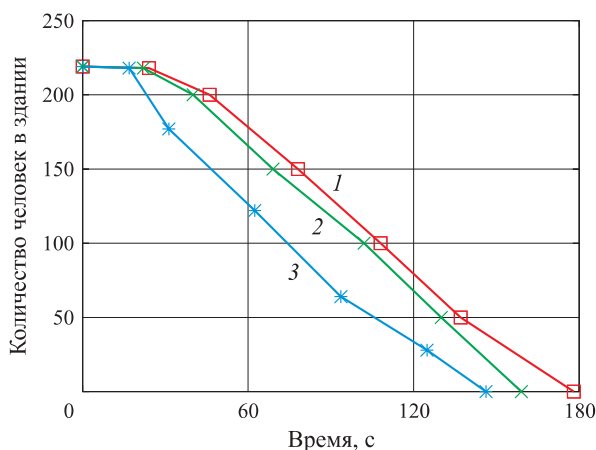


Рис. 3. Зависимости количества людей в здании от времени, полученные на тестовом здании с помощью программных комплексов: 1 — FDS+Evac; 2 — Pathfinder; 3 — RINTD-Evac

как и следовало ожидать, специализированная модель RINTD-Evac дает минимальные значения времени эвакуации людей из здания, так как траектории эвакуации отвечают условию $\min(\Delta t_e)$.

Математическая модель движения людских потоков при эвакуации людей из здания и построенный на базе модели программный комплекс RINTD-Evac позволяют динамически перестраивать траектории людских потоков в моменты изменения состояния среды в здании при развитии аварийной ситуации. Это дает возможность использовать их в практически значимых задачах.

Реализация модели, основанной на представлении здания в виде графа

Реализация модели, основанной на разностной сетке, при моделировании эвакуации людей предъявляет высокие требования к вычислительной установке, что затрудняет ее применение в системе управления эвакуацией людей при пожаре в здании в реальном масштабе времени. В связи с этим в системе управления эвакуацией используется модель представления здания в виде взвешенного двудольного графа [25]. Узлами графа являются объекты двух типов — помещения и проемы, ребрами — соответствующие связи между ними (рис. 4). На вес узлов будут влиять площади помещений (зон), численность людей, размеры дверных проемов и т. д. Такая форма представления здания следует из структуры ПИМ, использованной для программных расчетов на осно-

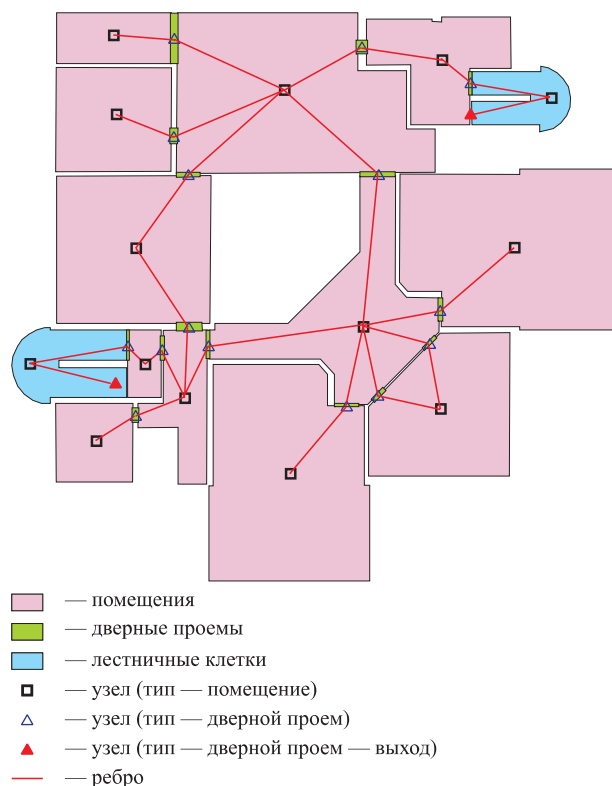


Рис. 4. ПИМ тестового здания и соответствующий ему граф

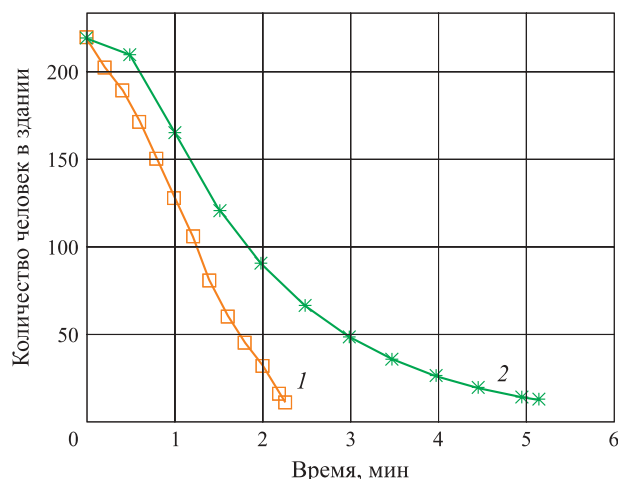


Рис. 5. Зависимости количества оставшихся в здании людей от времени на примере тестового здания, полученные с использованием модели, основанной на регулярной разностной сетке (1) и на графе (2)

ве регулярной разностной сетки в программном комплексе RINTD-Evac [17, 21].

Данная реализация модели эвакуации учитывает изменение во времени весов графа, означающее изменение состояния здания. Результатом является динамический перерасчет траекторий движения людских потоков при эвакуации.

В ходе работ было проведено тестирование алгоритмов расчетов, использующих модель, основанную на представлении здания в виде графа, и сравнение с результатами, полученными при расчетах с применением модели на разностных сетках. Тестирование на различных зданиях показало адекватность реализации модели на графе. Сравнение результатов прогнозирования выявило определенное завышение расчетных значений времени эвакуации при представлении объемно-планировочных решений здания в виде графа примерно в два раза. Причем, как следует из результатов расчетов (рис. 5), временной интервал движения людских потоков увеличивается при уменьшении количества людей в помещениях здания. Использование модели здания в виде графа приводит к сокращению времени расчета на один-два порядка, что обеспечивает режим реального времени при моделировании процесса эвакуации.

“Завышение” расчетного времени эвакуации означает, что разработанный программный алгоритм при представлении объемно-планировочных решений здания в виде графа, использованный в системе указания путей эвакуации, приведет к увеличению времени индикации направлений движения людских потоков (фактически людей в здании не осталось, а указатели все еще показывают направления движения людских потоков при эвакуации). В общем случае, это повышает надежность информирования людей.

Необходимо отметить, что “завышение” расчетного времени эвакуации обусловлено соответствующей настройкой представления модели здания в виде графа. Очевидно, что при пространственной дискретизации точность моделирования снижается с увеличением шага по пространственной переменной (модель на графе соответствует максимальному шагу по пространству). При использовании модели здания в виде графа все характеристики модели усредняются по всему помещению (зоне). Вместе с тем снижение точности не гарантирует “неуменьшения” расчетного времени эвакуации, что является необходимым условием применения модели в системе указания путей при экстренной эвакуации. К приемлемому “завышению” расчетного времени эвакуации приводит оценка характерного размера элемента здания (длины пути эвакуации) в виде $\sqrt{\Omega}$ (где Ω — площадь помещения (зоны)). В этом случае время прохождения людским потоком элемента здания $t \approx \sqrt{\Omega}/V$ (где V — оценка математического ожидания скорости людского потока в элементе здания). Очевидно, что $\sqrt{\Omega}$ — завышенная оценка длины пути эвакуации для элемента здания, которая приводит к завышенному времени эвакуации. Однако снижение оценки может привести для некоторых зданий к уменьшению расчетного времени эвакуации по отношению к реальному процессу эвакуации, что совершенно неприемлемо.

В качестве серверной платформы ПАК, предназначенной для управления облаком беспроводных узлов, предполагается использовать экономичные одноплатные компьютеры, например Raspberry Pi [26]. Это обусловлено, в первую очередь, требованием обеспечения надежности работы системы, в том числе в условиях отсутствия электроэнергии в здании. Недостатком такого выбора является сравнительно низкая производительность компьютеров данного типа.

Критичной задачей (применительно к вычислительной мощности используемых микрокомпьютеров) является моделирование процесса эвакуации. Оценка времени расчетов, произведенных на компьютере Raspberry Pi, с применением алгоритмов, основанных на разностной сетке, показала неприменимость последних в задачах реального времени (каковой является управление эвакуацией). Реализация же модели, основанной на графе здания, напротив, не требует значительных вычислительных ресурсов и работает значительно быстрее. Сравнение скорости расчетов двух описываемых реализаций показало расхождение примерно в 50 раз.

Направление людских потоков, спрогнозированное моделью, естественным образом можно отразить на светодиодных оповещателях (указателях) СОУЭ,

привязав их к соответствующим выходам из помещений.

Таким образом, если отказаться от требования разумной стоимости ПАК, то сеточное представление здания предпочтительнее. В противном случае, режим реального времени с приемлемым уровнем точности можно поддержать с использованием модели здания в виде графа.

Заключение

Людские потери в России при пожарах на порядок превышают потери в странах Западной Европы и Америки при соизмеримых частотах возникновения пожаров. Таким образом, актуальность настоящей работы и проекта по созданию системы управления эвакуацией в целом обусловлены тем ущербом, который наносят пожары в общественных зданиях.

Описанные в работе математическая модель процессов эвакуации людей, основанная на графе здания, и алгоритм, реализующий данную модель, показали свою применимость при построении СОУЭ, работающих в реальном времени и накладывающих некоторые ограничения на модель в силу своих технических требований.

Работа поддержана грантом Минобрнауки № RFMEFI57414X0038 “Разработка и создание промышленного образца беспроводной системы динамического управления эвакуацией людей из зданий” в рамках реализации ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. — Вып. 5(63). — С. 73–81.
2. Колодкин В. М., Морозов О. А., Варламов Д. В., Чирков Б. В., Ваитиев В. К., Галиуллин М. Э. Система управления эвакуацией людей из здания при пожаре // Безопасность в техносфере : сб. статей. — 2015. — Вып. 9. — С. 6–9.
3. Микроконтроллер ATmega 128RFA1. Atmel Corporation. URL: <http://www.atmel.com/devices/atmega128rfa1.aspx> (дата обращения: 07.07.2015).
4. Helbing D., Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics // Physical Review E. — 1995. — Vol. 51, No. 5. — P. 4282–4286. DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
5. Yang Y., Deng J., Xie C., Jiang Y. Design and implementation of Fire Safety Evacuation Simulation Software based on Cellular Automata Model // Procedia Engineering. — 2014. — Vol. 71. — P. 364–371. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.04.052.
6. Холицевников В. В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 1983. — 486 с.
7. Холицевников В. В. Закономерность связи между параметрами людских потоков : диплом № 24-S на открытие в области социальной психологии. — М. : Российская академия естественных наук, Международная академия авторов научных открытий и изобретений, Международная ассоциация авторов научных открытий, 2005.
8. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС РФ от 30.06.2009 № 382; введ. 30.06.2009 // Российская газета. — 2009. — № 161.
9. Шихалев Д. В., Хабибуллин Р. Ш. Математическая модель определения направлений безопасной эвакуации людей при пожаре // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 4. — С. 51–60.
10. Shikhalev D. V., Khabibulin R. Sh., Armel Ulrich Kemloh Wagoum. Development of a safest routing algorithm for evacuation simulation in case of fire // Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. — LoireValley, France, 2014. — С. 685–690. DOI: 10.5220/0004919706850690.
11. Chu Y., Zhang H., Shen S., Yang R., Qiao L. Development of a model to generate a risk map in a building fire // Science China. Technological Sciences. — 2010. — Vol. 53, No. 10. — P. 2739–2747. DOI: 10.1007/s11431-010-4063-8.
12. Холицевников В. В., Парфененко А. П. О моделировании эвакуации людей и динамики опасных факторов пожара в целях нормирования эвакуационных путей // Технологии техносферной безопасности. — 2014. — № 1(53). — 8 с. URL: <http://elibrary.ru/download/37807443.pdf> (дата обращения: 10.06.2016).

13. *Kemloh U., Chraibi M., Mehlich J., Seyfried A., Schadschneider A.* Efficient and validated simulation of crowds for an evacuation assistant // *Computer Animation and Virtual Worlds*. — 2012. — Vol. 23, No. 1. — P. 3–15. DOI: 10.1002/cav.1420.
14. *Карькин И. Н., Скочилов А. Л., Зверев В. В., Контарь Н. А.* Валидация и верификация эвакуационной модели СИТИС: Эватек. No. 4152-ТТ2.5. — Екатеринбург : СИТИС, 2008. — 29 с.
15. *Ахо А. В., Хопкрофт Д. Э., Ульман Д. Д.* Структуры данных и алгоритмы. — М., СПб., Киев : Изд. дом “Вильямс”, 2003. — 384 с.
16. СИТИС: Флоутек 3.11. Руководство пользователя. URL: <http://sitis.ru/soft/flowtech3> (дата обращения: 07.07.2016).
17. *Галиуллин М. Э.* Создание и использование пространственно-информационной модели здания (ПИМ) для расчета величины риска при составлении декларации пожарной безопасности // *Безопасность в техносфере : сб. статей*. — 2015. — Вып. 9. — С. 59–80.
18. Проект QGIS. URL: <http://qgis.org> (дата обращения: 07.07.2016).
19. JavaScript Object Notation. Описание стандарта JSON. URL: <http://json.org> (дата обращения: 07.07.2016).
20. Fire Dynamic Simulator (FDS). Техническое руководство к программе моделирования динамики пожара. URL: [file:///F:/Fire %20Journal/2016/10'2016/Work %2010'2016/59005 Техническое руководство к программе моделирования динамики пожара. Валидация.pdf](file:///F:/Fire%20Journal/2016/10'2016/Work%2010'2016/59005%20Техническое%20руководство%20к%20программе%20моделирования%20динамики%20пожара.%20Валидация.pdf) (дата обращения: 12.12.2015).
21. *Колодкин В. М., Чирков Б. В., Ваитиев В. К., Варламов Д. В., Степанов А. О.* Математическая модель, обеспечивающая минимальное время эвакуации // *Безопасность в техносфере : сб. статей*. — 2015. — Вып. 9. — С. 55–58.
22. *Grigoraş Z. C.* Analysing the human behavior in a fire drill. Comparison between two evacuation software: FDS+Evac and Pathfinder // *Bulletin of the Transilvania University of Braşov CIBv*. — 2014. — Vol. 7(56), Special Issue No. 1. — P. 103–110.
23. FDS+Evac Software. VTT Technical Research Centre of Finland. URL: <https://code.google.com/p/fds-smv/> (дата обращения: 07.07.2015).
24. Pathfinder. Agent Based Evacuation Simulation. URL: <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder/> (дата обращения: 07.07.2015).
25. *Дистель Р.* Теория графов. — Новосибирск : Изд-во института математики, 2002.
26. Raspberry Pi. URL: <https://www.raspberrypi.org/> (дата обращения: 07.07.2015).

Материал поступил в редакцию 28 июня 2016 г.

Для цитирования: Колодкин В. М., Галиуллин М. Э. Программные алгоритмы, реализующие модель движения людских потоков в системе управления эвакуацией людей из здания // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2016. — Т. 25, № 10. — С. 75–85. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.75-85.

English

SOFTWARE ALGORITHMS THAT IMPLEMENT THE FOOT TRAFFIC MODEL IN THE BUILDING EVACUATION MANAGEMENT SYSTEM

KOLODKIN V. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Mathematical Modeling and Prediction Department, Udmurt State University (Universitetskaya st., 1, Izhevsk, 426000, Udmurtian Republic, Russian Federation; e-mail: kolodkin@rintd.ru)

GALIULLIN M. E., Senior Lecturer of Mathematical Modeling and Prediction Department, Udmurt State University (Universitetskaya st., 1, Izhevsk, 426000, Udmurtian Republic, Russian Federation; e-mail: m.a.galiullin@gmail.com)

ABSTRACT

Emergency alert and evacuation management systems (EAEMS), if present in buildings, significantly reduce people evacuation times in emergencies (in comparison with static routes pointers), and they

can thus reduce the number of victims. The paper describes an approach to the EAEMS creation that meets the requirements of a reasonable cost.

State-of-the-art of microelectronics and computing machinery, as well as the accumulated global theoretical evidence make it possible to create the most effective EAEMS. Unfortunately, the cost of such systems is not affordable to be introduced everywhere in operation. An important and very expensive part of such systems are sensors of people gathering density in the building. Their absence causes the use of appropriate computer models to predict the dynamics of the human flow density. In turn, the use of very accurate models also make system more expensive due to the required computing resources. Therefore, the main objective of this work is the search for applicable mathematical model, as well as implementing its program algorithm, which would allow to construct EAEMS using cheap microelectronic elements.

The choice is made on the flow model of the foot traffic in the building, using experimentally determined flow rate depending on the density of the people. It is shown that the program implementation of the selected model which represents the building in the form of a computational grid produces results, which consistent with the results presented in the works of other groups who used other, more accurate models. Unfortunately, as shown in the paper, this software implementation of model does not allow to produce real-time calculations on the basis of the cheap single-board computers (for example, Raspberry Pi). Replacing the spatial representation of the building from a grid to a weighted bipartite graph reduces the computational time dozens of times, and thus makes it possible to use the single-board computers. Testing of the graph based implementation of the model shows adequate results that are comparable with the results of more accurate models and algorithms consuming more computing resources.

Thus, it is concluded that affordable EAEMS can be constructed on the basis of inexpensive microelectronics with the application of appropriate computer model of the people movement in the building.

Keywords: evacuation management; mathematical simulation; foot traffic; graph theory; building information model; microcontrollers; wireless electronic systems.

REFERENCES

1. Merkusheva T. G., Samoshin D. A., Khasueva Z. S., Zykhova M. Yu. 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).
2. Kolodkin V. M., Morozov O. A., Varlamov D. V., Chirkov B. V., Vashtiev V. K., Galiullin M. E. The building evacuation management system in case of fire. *Bezopasnost v tekhnosfere. Sbornik statey* (Safety in Technosphere. Collected Scientific Papers), 2015, issue 9, pp. 6–9 (in Russian).
3. *Microcontroller ATmega 128RFA1* (in Russian). Available at: <http://www.atmel.com/devices/atmega128rfa1.aspx> (Accessed 7 July 2015).
4. Helbing D., Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 1995, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286. DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
5. Yang Y., Deng J., Xie C., Jiang Y. Design and implementation of Fire Safety Evacuation Simulation Software based on Cellular Automata Model. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 71, pp. 364–371. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.052.
6. Kholshchevnikov V. V. *Human flows in buildings, structures and on adjoining territories. Dr. tech. sci. diss.* Moscow, 1983. 486 p. (in Russian).
7. Kholshchevnikov V. V. *Relationship between parameters of human flow*. Diploma No. 24-S on the discovery in the field of social psychology. Moscow, Russian Academy of Natural Sciences, International Academy of Authors of Scientific Discoveries and Inventions, International Association of Authors of Scientific Discoveries Publ., 2005 (in Russian).
8. Methods of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger. Order of Emercom of Russia on 30.06.2009 No. 382. *Rossiyskaya gazeta* (Russian Newspaper), 2009, no. 161 (in Russian).
9. 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 (in Russian).

10. Shikhalev D. V., Khabibulin R. Sh., Armel Ulrich Kemloh Wagoum. Development of a safest routing algorithm for evacuation simulation in case of fire. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. Loire Valley, France, 2014, pp. 685–690. DOI: 10.5220/0004919706850690.
11. Chu Y., Zhang H., Shen S., Yang R., Qiao L. Development of a model to generate a risk map in a building fire. *Science China. Technological Sciences*, 2010, vol. 53, no. 10, pp. 2739–2747. DOI: 10.1007/s11431-010-4063-8.
12. Kholshchevnikov V. V., Parfenenko A. P. About modeling of evacuation of people and dynamics of fire hazards in purpose of normalization evacuation routes. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti (Technology of Technosphere Safety)*, 2014, no. 1(53). 8 p. (in Russian). Available at: <http://elibrary.ru/download/37807443.pdf> ((Accessed 10 June 2016).
13. Kemloh U., Chraibi M., Mehlich J., Seyfried A., Schadschneider A. Efficient and validated simulation of crowds for an evacuation assistant. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2012, vol. 23, no. 1, pp. 3–15. DOI: 10.1002/cav.1420.
14. Karkin I. N., Skochilov A. L., Zverev V. V., Kontar N. A. *Validation and verification of evacuation model SITIS: Evatech. No. 4152-TT2.5*. Yekaterinburg, SITIS Publ., 2008. 29 p. (in Russian).
15. Aho A., Hopcroft J., Ulman J. *Data Structures and Algorithms*. Moscow, St. Petersburg, Kiev, Williams Publ., 2003 (in Russian).
16. *SITIS: FlowTech 3.11. Calculation of evacuation. User's Guide* (in Russian). Available at: <http://sitis.ru/soft/flowtech3> (Accessed 7 July 2016).
17. Galiullin M. E. Creating and using Building Information Model (BIM) to calculate the amount of risk in the preparation of the fire safety declaration. *Bezopasnost v tekhnosfere. Sbornik statey (Safety in Technosphere. Collected Scientific Papers)*, 2015, issue 9, pp. 59–80 (in Russian).
18. *QGIS Project*. Available at: <http://qgis.org> (Accessed 7 July 2016).
19. *JavaScript Object Notation. Introducing JSON*. Available at: <http://json.org> (Accessed 7 July 2016).
20. *Fire Dynamic Simulator (FDS). User's Guide*. Available at: <http://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/2013/08/FDS-User-Guide.pdf> (Accessed 12 December 2015).
21. Kolodkin V. M., Chirkov B. V., Vashtiev V. K., Varlamov D. V., Stepanov A. O. A mathematical model, which provides the minimum evacuation time. *Bezopasnost v tekhnosfere. Sbornik statey (Safety in Technosphere. Collected Scientific Papers)*, 2015, issue 9, pp. 55–58 (in Russian).
22. Grigoraş Z. C. Analysing the human behavior in a fire drill. Comparison between two evacuation software: FDS+Evac and Pathfinder. In: *Bulletin of the Transilvania University of Braşov CIBv*, 2014, vol. 7(56), special issue no. 1, pp. 103–110.
23. *FDS+Evac Software*. Available at: <https://code.google.com/p/fds-smv/> (Accessed 7 July 2015).
24. *Pathfinder. Agent Based Evacuation Simulation*. Available at: <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder/> (Accessed 07 July 2015).
25. Diestel Reinhard. *Graph Theory*. New York, Springer-Verlag, 2000. 322 p. (Russ. ed.: Distel R. Teoriya grafov. Novosibirsk, Izdatelstvo instituta matematiki Publ., 2002).
26. *Raspberry Pi*. Available at: <https://www.raspberrypi.org/> (Accessed 7 July 2015).

For citation: Kolodkin V. M., Galiullin M. E. Software algorithms that implement the foot traffic model in the building evacuation management system. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 10, pp. 75–85. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.10.75-85.