

*Д.В. Шихалев<sup>1</sup>, Р.Ш. Хабибулин<sup>1</sup>, А.У. Кемлох Вагум<sup>2</sup>, М.Крэйби<sup>2</sup>*  
(Россия, Германия)

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

## **ИНДИВИДУАЛЬНО-ПОТОЧНАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЭВАКУАЦИЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ**

*Обоснована необходимость использования индивидуально-поточной модели движения людей для задачи управления эвакуацией при пожаре.*

*Ключевые слова: управление эвакуацией, модель, пожар.*

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

## **INDIVIDUAL-FLOW MODEL OF PEDESTRIANS' MOVEMENT APPLIED TO TASK OF EVACUATION MANAGEMENT IN CASE OF FIRE**

*Applying of individual-flow model of pedestrians' movement for task of evacuation management in case of fire is justified.*

*Key words: management of evacuation process, model, fire.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 22 апреля 2015 г.

Анализ систем управления эвакуацией людей при пожаре в зданиях торгово-развлекательных центров [1] показал, что существующие системы управления эвакуацией не позволяют определять оптимальный (с точки зрения безопасности людей) маршрут их движения непосредственно во время эвакуации при пожаре. В нормативных требованиях [2] существующая система оповещения и управления эвакуацией не определяет принципы, алгоритмы, по которым должно производиться управление, не приводятся данные, которые являются необходимыми для определения направлений эвакуации, не определены ни степень участия персонала, ни задачи лица, принимающего решения в ходе эвакуации.

Для решения данных проблем предложен подход к управлению эвакуацией людей при пожаре на основе оперативного определения безопасных маршрутов движения. Разработана методика определения маршрутов безопасной эвакуации людей [3], учитывающая предыдущие результаты исследований в области закономерностей эвакуации людей и динамики распространения **опасных факторов пожара (ОФП)**.

В предложенном подходе здание разбивается на участки маршрутов движения, и каждый участок характеризуется комплексным показателем  $\varphi$ , который включает в себя показатели:  $a$  – "плотность людского потока";  $b$  – "опасный фактор пожара";  $l$  – "длина маршрута".

С целью функционального разграничения методик определения маршрутов движения людей и движения людского потока разработана схема информационной взаимосвязи в системе управления эвакуацией людей (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема взаимосвязи в системе управления эвакуацией

Методика определения маршрутов движения людей служит для поиска маршрутов движения во время эвакуации. К данному типу и относится предложенная авторами методика [3]. Методика движения людского потока используется для решения задачи управления эвакуацией людей при пожаре.

Под задачей управления эвакуацией людей при пожаре понимается информационное обеспечение эвакуируемых (посетителей и персонала здания) указанием направлений движения. При компьютерном моделировании управления эвакуацией сигналы к изменению маршрутов движения подаются непосредственно компьютерной программой (симулятором). В реальной ситуации одним из способов подачи сигнала к изменению маршрута движения является динамический указатель направлений движения людей при пожаре [4].

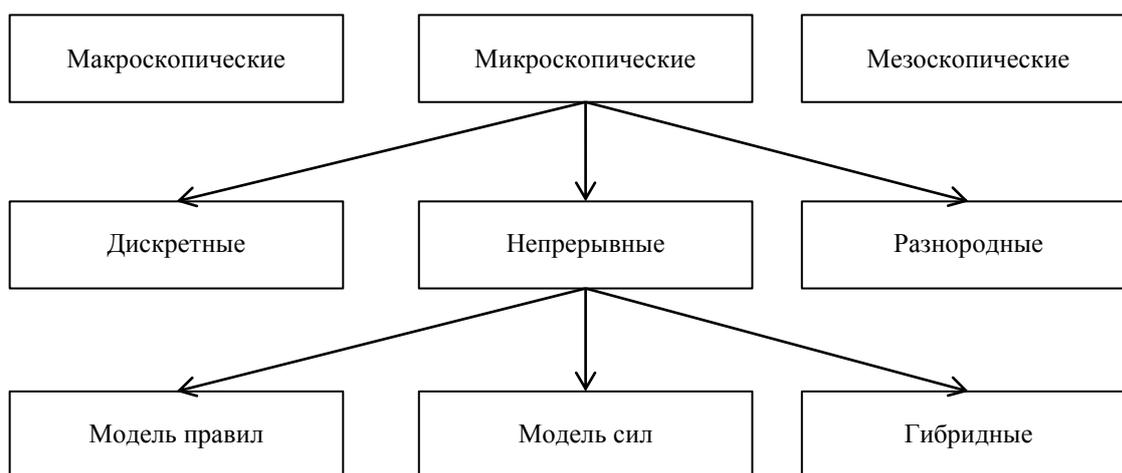
Для проверки предложенной методики определения маршрутов движения ставится задача выбора модели движения людей.

Модели движения людей можно классифицировать так, как показано на рис. 2 [5]. Данная классификация не является исчерпывающей, однако позволяет подобрать модель движения людей в соответствии с поставленной задачей.

**Макроскопические модели** описывают процесс эвакуации в совокупности, то есть с учётом плотности, скорости и потока (части потока) эвакуируемых. К макроскопическим моделям следует отнести упрощённо-аналитическую и имитационно-стохастическую модели.

**Микроскопические модели** рассматривают человека как индивида с определённым набором свойств и основаны на том, что динамика всех эвакуируемых формируется движением каждого индивида. К микроскопическим моделям относится индивидуально-поточная модель движения людей.

**В мезоскопических моделях** каждый эвакуируемый определяется как отдельный индивид (у каждого своё определённое положение и скорость), тем не менее, процесс эвакуации рассматривается в совокупности, как и в макроскопических моделях.



**Рис. 2.** Классы моделей движения людей

Нельзя определённо сказать, что одна модель лучше другой. Каждая из моделей решает определённую задачу. Так, макроскопические и мезоскопические модели целесообразно применять для решения инженерных задач. Однако при необходимости учёта комплексных сценариев эвакуации следует применять микроскопические модели, в частности индивидуально-поточные [6].

Для определения безопасного маршрута движения людей необходимо получение двух динамических массивов: данных о плотностях людских потоков на каждом участке и данных о значениях ОФП на каждом участке маршрута движения. По результатам определения безопасных маршрутов, в местах принятия решений (пересечение двух и более маршрутов движения) должны быть установлены указатели соответствующих направлений движения.

Можно сделать **вывод**: для полноценной проверки предложенной математической модели должна использоваться индивидуально-поточная модель.

Несмотря на наличие достоверной и научно-обоснованной индивидуально-поточной модели движения людских потоков [7], её программная реализация не в полной мере позволяет проводить научные исследования, связанные с вопросами определения безопасных маршрутов движения людей при пожаре, что не позволяет провести качественную оценку предложенного подхода и реализовать все его особенности. Этим обуславливается необходимость применения научно-исследовательских платформ с "открытым" исходным кодом (под открытым кодом понимается возможность добавления/изменения программного кода для реализации необходимых функций). Одной из таких платформ является **компьютерный симулятор эвакуации JuPedSim (Jülich Pedestrian Simulator)**, реализованный на языке программирования высокого уровня C++. Симулятор разработан в лаборатории отдела общественной безопасности и движения (*Division Civil Security and Traffic*) Юлихского исследовательского центра (*Forschungszentrum Jülich*), где в 2013-2014 гг. проведено изучение симулятора и выполнено компьютерное моделирование эвакуации людей при пожаре в соответствии с предложенной моделью.

В симуляторе *JuPedSim* для моделирования эвакуации людей реализована **обобщённая центробежная модель сил (ОЦМС)** (Generalized Centrifugal Force Model (GCFM)) [5], относящаяся к классу моделей социальных сил, которая описывает движение людей на операционном уровне, то есть определяет основные правила движения эвакуируемых: ускорение, торможение, остановка. Модель относится к классу микроскопических, представляет эвакуируемого как эллипс, полуоси которого зависят от его текущей скорости. В рамках данной модели каждый эвакуируемый представлен как отдельный агент с определенными свойствами. Верификация и валидация модели была проведена в работах [5, 8-10] на основании экспериментальных значениях скорости, плотности и потока, полученных Предтеченским и Милинским, Fruin и Pauls, Weidmann, Helbing и др., при различных процессах: формировании потока, взаимодействии в узких местах, при наличии эффекта "быстрый – это медленный", скоплении у выхода и др.

Рассмотрим вычисление скорости движения людского потока в ОЦМС, где скорость движения людей в установившемся режиме определяется отношением:

$$V = V_0 - \tau \frac{(\alpha \cdot V_0)^2}{d_{ij}}, \quad (1)$$

где  $V$  – текущая скорость эвакуируемого;

$V_0$  – скорость эвакуируемого при свободном движении;

$\tau$  – время реакции;

$\alpha$  – коэффициент для калибровки сил между эвакуируемыми;

$d_{ij}$  – расстояние между границами зон, необходимыми для движения эвакуируемых  $i$  и  $j$ .

Проведём ряд преобразований:

$$V = V_0 - \tau \frac{(\alpha \cdot V_0)^2}{d_{ij}}, \quad (2)$$

$$\frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{\tau \cdot \alpha^2 \cdot V_0}{d_{ij}}. \quad (3)$$

Обозначим относительную скорость движения эвакуируемого по пути переменной  $\bar{V}$ :

$$\bar{V} = \frac{V_0 - V}{V_0}. \quad (3)$$

Обозначим переменной  $\bar{\bar{V}}$  относительную скорость движения эвакуируемого с учётом взаимодействия с другими эвакуируемыми:

$$\bar{\bar{V}} = \frac{\tau \cdot V_{\text{отн}}}{d_{ij}}. \quad (5)$$

Подставив выражения (4) и (5) в выражение (3), введём эмпирическую константу  $\alpha$ :

$$\alpha = \sqrt{\frac{V}{V_0}}. \quad (6)$$

Перейдём к рассмотрению зависимости плотности потока эвакуируемых от расстояния. В модели отношение скорости и плотности определяется выражением (7):

$$V = V_0 \cdot \left( 1 - \exp \left( -\gamma \cdot \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{\max}} \right) \right) \right), \quad (7)$$

где  $V$  – текущая скорость эвакуируемого;  
 $V_0$  – скорость эвакуируемого при свободном движении;  
 $\rho$  – плотность потока эвакуируемых ( $M^{-1}$ );  
 $\rho_{\max}$  – максимальная плотность потока эвакуируемых ( $M^{-1}$ ).  
 Отношение расстояния и плотности:

$$d_{ij} = \frac{1}{\rho} - 2 \cdot (a_{\min} + a_v v_{отн}). \quad (8)$$

Следовательно,

$$\rho = \frac{1}{d_{ij} + 2 \cdot (a_{\min} + a_v v_{отн})}, \quad (9)$$

$$\rho_{\max} = \frac{1}{2 \cdot (a_{\min} + a_v v_{отн})}. \quad (10)$$

Поэтому

$$d_{ij} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{\max}}. \quad (11)$$

Таким образом, зависимость скорости от расстояния

$$V = V_0 \cdot (1 - \exp(-\gamma \cdot d_{ij})). \quad (12)$$

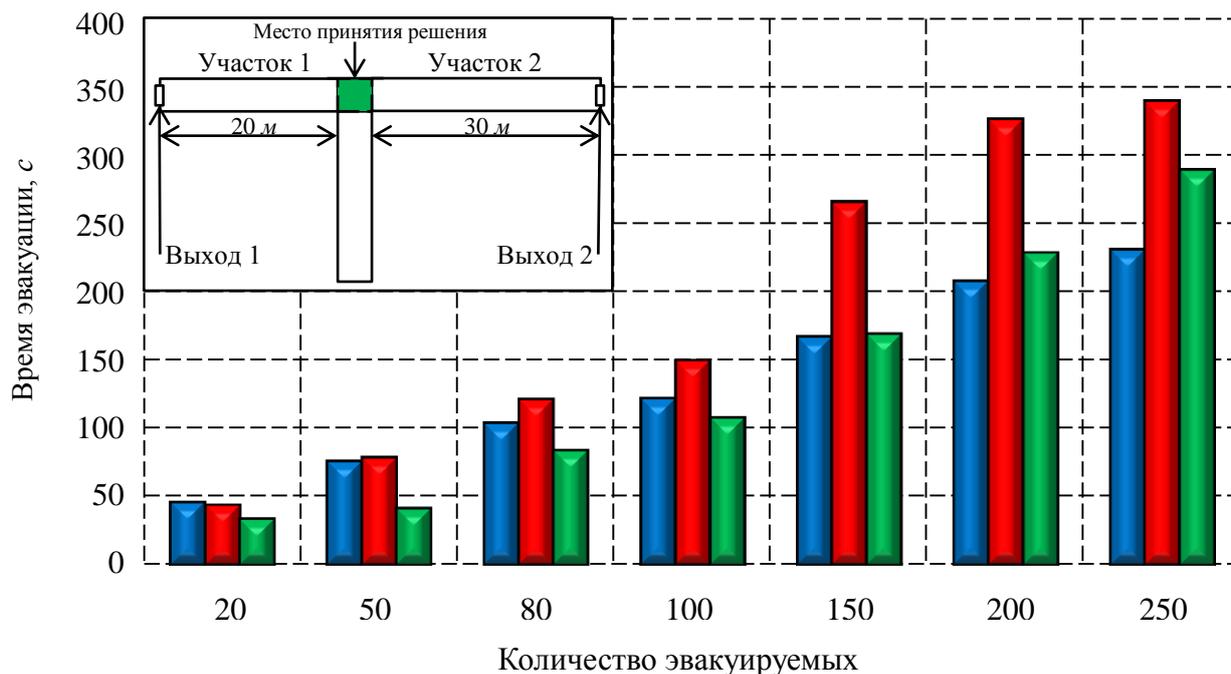
Получаем в общем виде зависимость скорости от плотности:

$$V = V_0 \cdot \left( 1 - \alpha \ln \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right), \quad (13)$$

где  $\alpha$  – эмпирическая константа для калибровки сил между эвакуируемыми.

Проведённые выкладки свидетельствуют о том, что "социальные силы", применяемые в модели, это есть не что иное, как психофизические реакции человека в потоке, описываемые психофизическим законом Вебера-Фехнера. Данный вывод находит своё подтверждение в отечественной науке. Ещё в 80-х годах профессором Холщевниковым В.В. установлена закономерность связи между параметрами людских потоков, которая свидетельствует о том, что изменение скорости людского потока пропорционально логарифму его плотности при несвободном движении, что обусловлено психофизической реакцией людей на ограничение свободы их перемещений в потоке и оптимальностью взаимодействия функциональных систем организма человека.

Кроме математического анализа модели, проведено её сравнение, в рамках компьютерного моделирования, с упрощённо-аналитической и имитационно-стохастической моделями. Сравнение было проведено на  $T$ -образном соединении эвакуационных путей. В нижней части  $T$ -соединения размещается определённое количество людей, которые должны двигаться к ближайшему эвакуационному выходу. Результаты сравнения времени эвакуации показаны на рис. 3.



**Рис. 3.** Результаты сравнения времени эвакуации в различных моделях движения людей:  
 синий цвет – обобщённая модель центробежных сил;  
 красный цвет – упрощённо-аналитическая модель;  
 зелёный цвет – имитационно-стохастическая модель

При рассмотрении результатов моделирования следует учесть, что природа рассматриваемых моделей не однородна. Обобщённая центробежная модель сил – это микроскопическая модель (рассмотрение эвакуируемого как индивида с соответствующими свойствами), а упрощённо-аналитическая и имитационно-стохастическая модели – это макроскопические модели (эвакуируемые рассматриваются как совокупный объём при соответствующей плотности).

## Выводы

В ходе анализа существующих моделей движения людей установлено, что для задачи управления эвакуацией людей при пожаре необходимо применять индивидуально-поточную модель движения людей.

Для данной задачи выбрана обобщённая центробежная модель сил, реализованная в симуляторе процесса эвакуации *JuPedSim*. Анализ математических зависимостей в данной модели показал, что она не противоречит существующим закономерностям движения людского потока. Результаты сравнения показали, что разница времени эвакуации при различных моделях составляла не более 15 %.

Можно сделать вывод, что обобщённая центробежная модель сил в целом эквивалентна имитационно-стохастической модели (как наиболее апробированной модели) и соответствует физике процесса движения людей, а значит может применяться для моделирования эвакуации.

## Литература

1. **Шихалев Д.В., Хабибулин Р.Ш.** Системы управления эвакуацией в зданиях торгово-развлекательных центров // Пожаровзрывобезопасность. № 6, 2013. С. 61-65.
2. **Свод правил 3.13130.2009.** Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности: Приказ МЧС России от 25 марта 2009 г. № 173.
3. **Шихалев Д.В., Хабибулин Р.Ш.** Математическая модель определения направлений безопасной эвакуации людей при пожаре // Пожаровзрывобезопасность. № 4, 2014. С. 51-60.
4. **Шихалев Д.В., Хабибулин Р.Ш.** Световой оповещатель // Патент 136212 на полезную модель, МПК G08B 25/00. 5 с.
5. **Chraibi M.** Validated force-based modeling of pedestrian dynamics / PhD thesis, Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2012.
6. **Холщевников В.В., Самошин Д.А., Парфененко А.В., Кудрин И.С., Истратов Р.Н., Белосохов И.Р.** Эвакуация и поведение людей при пожарах: учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. 262 с.
7. **Приказ** МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 "Об утверждении методики определения расчётных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности".
8. **Chraibi M., Seyfrid A., Schadschneider A.** Generalized Centrifugal Force Model for pedestrian dynamics // Physical review E, vol. 82. p. 046111, 2010.
9. **Kemloh U.** Route choice modeling and runtime optimization for simulation of building evacuation // PhD thesis, Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2013.
10. **Meunders A.** Kalibrierung eines Mikroskopischen Modells für Personenströme zur Anwendung im Project Hermes // Masterthesis, Bergische Universität Wuppertal, 2011.