

Д.А. Самошин, Д.П. Дерюгин
(Академия ГПС МЧС России; e-mail: inbox-d@mail.ru)

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ ЭВАКУИРУЕМЫХ ЛЮДЕЙ (часть 1)

Проведено тестирование наиболее известных индивидуально-поточных моделей движения людских потоков. Полученные результаты сопоставлялись с апробированной имитационно-стохастической моделью людского потока, реализованной в программном комплексе Флоутек ВД.

Ключевые слова: эвакуация, индивидуально-поточная модель.

D.A. Samoshin, D.P. Deryugin **ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF THE PEDESTRIAN FLOW OF PEOPLE EVACUATED (part 1)**

Testing of the most famous models of individual-stream movement of people was carried out. The results were compared with a proven simulation-stochastic model of movement of human flow, implemented in the software package Flowtech.

Key words: evacuation, models of individual-stream movement of people.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 25 августа 2015 г.

Введение

В настоящее время в мире разработано нескольких десятков программных комплексов, реализующих ту или иную *модель* процесса *эвакуации людей*. Благодаря росту вычислительных мощностей ЭВМ, широкое распространение получили модели индивидуально-поточного движения, обладающие более широким спектром функциональных возможностей. Совершенствование алгоритма индивидуально-поточного движения людей в нормативных документах нашей страны невозможно без всесторонней оценки мирового опыта. С этой целью были проанализированы наиболее известные и широко применимые для решения задач пожарной безопасности модели PathFinder (США) [1], Simulex (Англия) [2], FDS+Evac (США-Финляндия) [3] и модель Эватек (Россия) [4]. Полученные результаты сопоставлялись с апробированной моделью ADLP [5], реализованной в программном комплексе Флоутек ВД [6].

Описание моделей индивидуально-поточного движения

Разработчики модели PathFinder [1] использовали зависимости между параметрами людского потока, приведенные в справочнике [7]. В расчётном алгоритме модели для горизонтального пути, при плотности потока свыше $0,55 \text{ чел./м}^2$, влияние плотности на скорость описывается следующим соотношением:

$$v(D) = v_{\max} \frac{k - 0,266kD}{1,19}, \quad (1)$$

где D – плотность людского потока, чел./м^2 ;

k – коэффициент скорости свободного движения, равный $1,4 \text{ м/с}$;

v_{\max} – максимальная скорость движения пешехода, задаваемая пользователем.

Анализ зависимости между интенсивностью и плотностью, построенный по зависимости (1), показал, что максимальная интенсивность движения составляет $1,32 \text{ чел./м/с}$ или $79,2 \text{ чел./м/мин.}$ и достигается при плотности $1,9 \text{ чел./м}^2$.

Ускорение и замедление описывается по формуле:

$$a_{\max} = 2 v_{\max}, \quad (2)$$

Интенсивность движения через дверной проём рассчитывается следующим образом:

$$F_s = (1 - 0,266 \cdot D) \cdot k \cdot D. \quad (3)$$

Время движения n человек через дверной проем зависит от интенсивности движения через дверной проем и определяется по формуле:

$$T = (n - 1) \cdot (1/F_s). \quad (4)$$

Причём, выражение $n - 1$ означает, что первый человек минует дверной проём без задержки, поэтому его участие в потоке перед дверью не учитывается.

Скорость по лестнице вниз и вверх определяется соотношением (3), за исключением коэффициента k , который зависит от размеров ступени, табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента k для различных видов пути

Высота ступени, дюймы	Ширина ступени, дюймы	Значения коэффициента k
7,5	10,0	1,00
7,0	11,0	1,08
6,5	12,0	1,16
6,5	13,0	1,23

В модели Simulex [2] скорость движения зависит от расстояния между людьми

$$V = ((V_0 d - 0,25)/(0,87)), \quad (5)$$

где V – скорость движения человека, м/с;

d – расстояние между людьми, м, определяемое по формуле:

$$d = \sqrt{1/D}, \quad (6)$$

где D – плотность потока, чел./м².

Скорость свободного движения V_0 , выбирается в интервале от 0,8 до 1,7 м/с в зависимости от пола и возраста человека. Для моделирования движения человека используются зависимости между параметрами людского потока, полученные японскими исследователями [8], рис. 1.

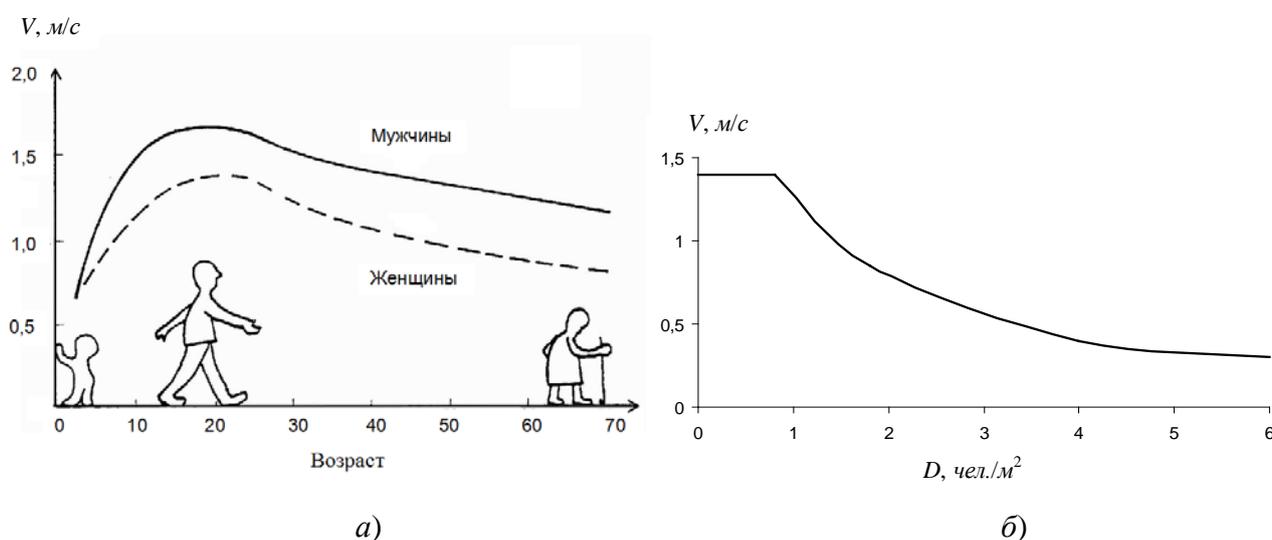


Рис. 1. Взаимосвязь между параметрами людского потока, используемая в модели Simulex: а) кривая возраст-скорость; б) кривая плотность потока – средняя скорость движения

В модели FDS+Evac [3] для оценки скорости движения пешеходов их взаимодействия между собой использована модель социальных сил, разработанная Хелбингом и Молнаром [9]. Параметры движения пешехода (главным образом, скорость и направление) в модели социальных сил зависит от действующих на него сил, определяемые в том числе законами механики. Решая полученную систему дифференциальных уравнений, определяются координаты в пространстве, скорость и ускорение пешехода в любой момент времени.

Для описания поведения каждого пешехода в потоке решается собственное уравнение движения:

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) + E_i(t), \quad (7)$$

где $x_i(t)$ – координата i -го человека в момент времени t ;

$f_i(t)$ – сила, с которой окружение влияет на человека;

m_i – масса;

$E_i(t)$ – небольшое случайное флуктуационное воздействие.

Скорость движения человека $v_i(t)$ определяется соотношением dx_i/dt .

Сила f_i , действующая на конкретного человека, состоит из нескольких компонентов:

$$f_i = \frac{m_i}{t_i} (v_i^0 - v_i) + \sum_{j \neq i}^n (f_{ij}^{soc} + f_{ij}^c + f_{ij}^{att}) + \sum_w (f_{iw}^{soc} + f_{iw}^c) + \sum_k^n (f_{ik}^{att}), \quad (8)$$

где первая сумма описывает взаимодействие двух конкретных людей друг с другом, вторая сумма описывает взаимодействие конкретного человека со стенами, а третья описывает взаимодействие человека с окружающей средой, например, "отталкивание" человека опасными факторами пожара.

Взаимодействие двух конкретных людей в описанной выше формуле имеет три части. Для части, обуславливающей "социальную силу" f_{ij}^{soc} , Хелбингом была предложена следующая формула:

$$f_{ij}^{soc} = A_i e^{-\frac{r_{ij}-d_{ij}}{B_i}} \left(\gamma_i + (1-\gamma_i) \frac{1+\cos\varphi_{ij}}{2} \right) n_{ij}, \quad (9)$$

где r_{ij} – расстояния между центрами групп кругов, описывающих человека;

d_{ij} – сумма радиусов кругов;

n_{ij} – единичный вектор, направленный от человека j к человеку i .

Из групп по три круга, описывающих конкретного человека, в данной формуле учитываются две конкретные группы, находящиеся наиболее близко друг к другу. φ_{ij} – угол между направлением движения человека i , "ощущающего" действие силы, и направлением движения человека j , который оказывает отталкивающую силу на человека i . Параметры A_i и B_i описывают силу и пространственную степень силы, соответственно. Параметр γ_i "отвечает" за анизотропность социальной силы: если он равен 1, то сила симметрична, если $0 < \gamma_i < 1$, то сила спереди человека больше, чем сзади.

Интересно отметить, что попытки использовать модели социальных сил для описания взаимодействия пешеходов в потоке предпринимались и в нашей стране [10]. Однако, сложно оценить результаты этой работы, так как, с учётом спорности самой концепции описания движения людских потоков с помощью модели Хелбинга и Молнара, предложенный автором программный комплекс нуждается в серьёзной проверке на достоверность.

В модели Эватек [4] скорость движения пешехода зависит от плотности потока. Плотность рассчитывается для каждого человека в потоке отдельно. Для этого, вокруг человека строится область в виде прямоугольника. Большая сторона прямоугольника ориентирована по направлению движения человека. Центр прямоугольника не совпадает с центром человека. Область смещается по направлению движения человека с коэффициентом 0,4, то есть центр области находится от центра человека на расстоянии, равном длине большей стороны, умноженной на 0,4. Пешеход, для которого определяется плотность, находится внутри области и учитывается при расчёте плотности.

Построенная область разбивается на отдельные не связанные в пределах области районы (то есть из одного района перейти человеку в другой, не покидая область, невозможно). Плотность потока для данного человека равна плотности потока в районе, в котором он находится:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{S_{\text{района}}}, \text{ м}^2/\text{м}^2, \quad (10)$$

где n – число людей в районе (считается, что человек находится в районе, если его центр лежит внутри района);

f_i – площадь горизонтальной проекции i -го человека в районе;

$S_{\text{района}}$ – площадь района.

Для оценки результатов, получаемых с использованием моделей индивидуально-поточного движения, они были сопоставлены с результатами, полученными с использованием имитационно-стохастической модели поточного движения ADLP [5] (рис. 2), реализованной в качестве программного продукта Флоутек ВД [6].

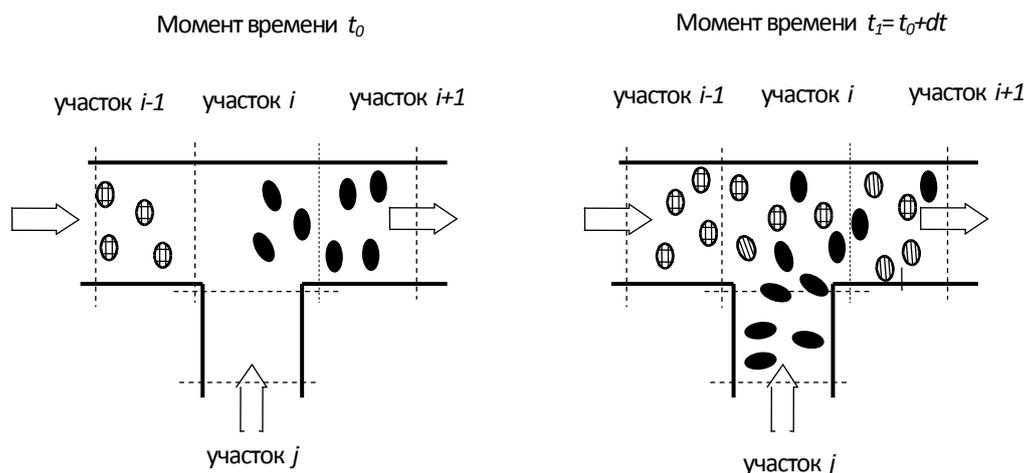


Рис. 2. Иллюстрация к алгоритму моделирования движения людского потока с использованием имитационно-стохастической модели

Движение людей в модели (рис. 2), описывается следующими основными соотношениями. Количество людей, переходящих с участка i на последующий участок $i + l$, равно

$$N_{i,i+1}^{t_1} = D_i^{t_0} b_i V_{\text{пер}} dt \quad (11)$$

и зависит от скорости перехода $V_{\text{пер}}$. Значение скорости перехода через границы смежных участков зависит от плотности потока на последующем участке:

$$V_{\text{пер}} = \begin{cases} V_i^{t_0}, & \text{если } D_{i+1}^{t_0} \leq D_{q_{\text{max}}}; \\ V_{i+1}^{t_0}, & \text{если } D_{i+1}^{t_0} > D_{q_{\text{max}}}. \end{cases} \quad (12)$$

Для тех элементарных участков, с которых людской поток выходит на более узкий элементарный участок или в проём, производится корректировка ширины. В соответствии с данными натурных наблюдений, принимается, что отклонение траектории движения людей, идущих с внешних сторон потока, от оси потока составляет при расширении – 30° , при сужении – 45° . Зависимость между скоростью и плотностью принимается в соответствии с действующими нормативными документами.

Тестирование моделей и реализующих их программных комплексов

Для сравнения моделей были выбраны следующие основные расчётные данные о людском потоке: образование и разуплотнение скоплений перед проёмом и сужением горизонтального пути, слияние людских потоков и образование скоплений. Первым шагом анализа было сравнение результатов моделирования простейшей ситуации – движение людей с начальной плотностью потока $0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (при $f = 0,125 \text{ м}^2$), размещённых в начале 40-метрового участка шириной 2 м, рис. 3. Результаты представлены на рис. 4 и в табл. 2.

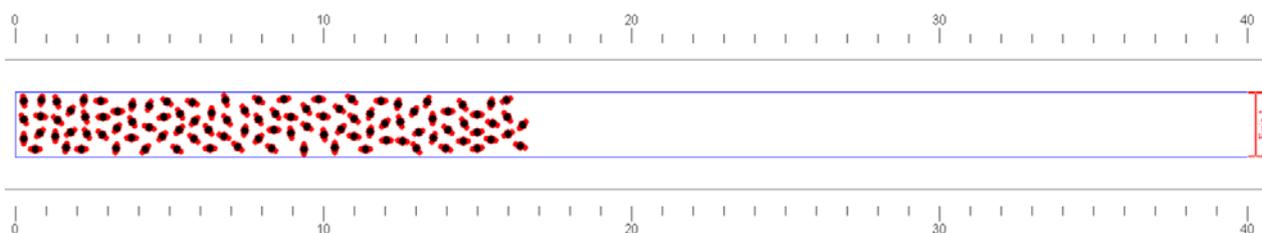


Рис. 3. Расчётная схема движения людского потока № 1

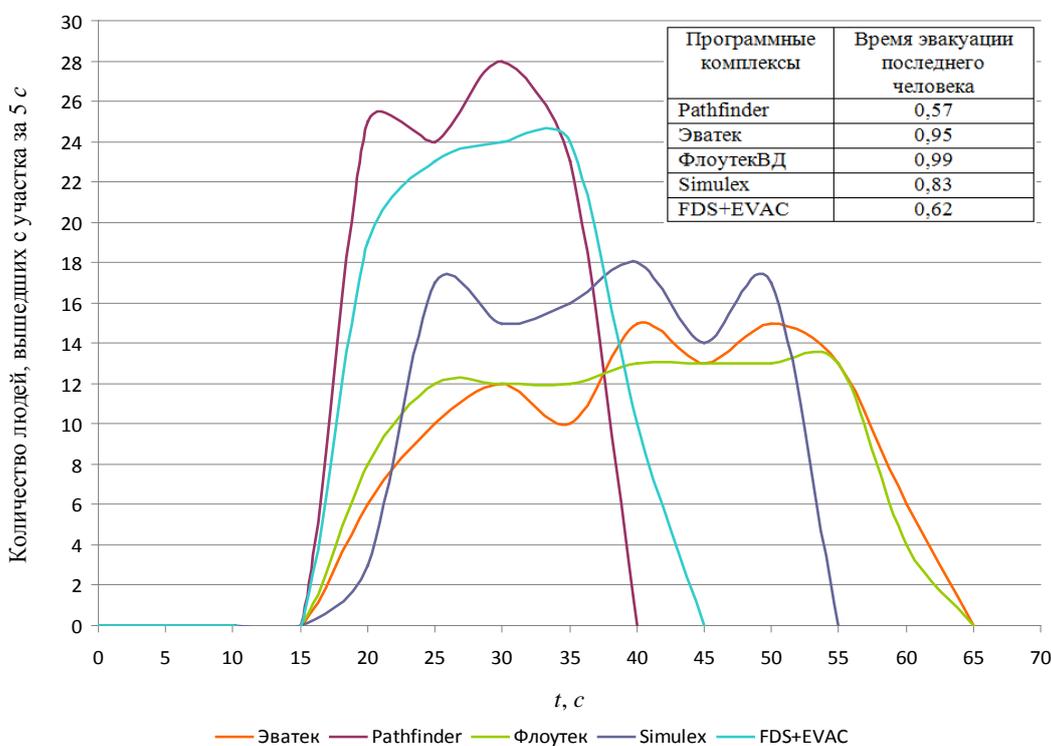


Рис. 4. Динамика выхода людей из коридора и расчётное время эвакуации. Расчётная схема № 1

Исходные данные для моделирования расчётной ситуации № 1

Программные комплексы	Площадь проекции (габариты человека) m^2/m^2	Начальная плотность потока	V_0 , $m/мин.$	Количество людей
PathFinder	0,125	0,40	100	100
Эватек	0,125	0,40	100	100
Флоутек	0,125	0,40	100	100
Simulex*	0,111	0,40	84	100
FDS+EVAC	0,125	0,40	100	100

Результаты моделирования движения людского потока по рассматриваемому участку пути показывают значительный разброс данных: наименьшее время получено при моделировании с использованием PathFinder (0,57 мин.), наибольшее – при использовании модели Эватек (0,95 мин.). Контрольный расчёт на основе имитационно-стохастической модели показывает близкий результат – 0,99 мин., что позволяет говорить о корректности результатов расчёта, выполненного с использованием двух указанных моделей, так как время эвакуации соответствует параметрам движения потока.

График динамики выхода людей (рис. 4) показывает значительно большие значения интенсивности движения, получаемые при использовании зарубежных программных комплексов. Подчеркнем, что зарубежные разработчики ограничивают получение промежуточных результатов, поэтому невозможно измерить плотность и скорость потока в интересующие нас моменты времени. В связи с этим, значения скорости и плотности оценивались аналитически с использованием данных, характеризующих временные границы процесса движения людей (табл. 3).

Параметры людского потока, характеризующие процесс эвакуации по 1-й расчётной схеме

Программные комплексы	Средняя скорость движения, $m/мин.$	Средняя плотность, m^2/m^2	Расстояние, необходимое для переформирования до указанной плотности, m
PathFinder	70,2	0,14	357,1
Эватек	42,1	0,36	138,9
Флоутек	40,4	0,38	131,6
Simulex*	48,2	0,29	172,4
FDS+EVAC	64,5	0,17	294,1

Результаты моделирования, полученные с использованием моделей PathFinder, Simulex и FDS+EVAC, заставляют предположить, что алгоритм расчёта допускает очень быстрое переформирование людского потока. Однако простейший расчёт необходимого для этого расстояния по формуле

$$\Delta l = \frac{N}{bD}, \text{ м}, \quad (13)$$

где N – количество людей;

b – ширина участка пути;

D – плотность людского потока, показывает физическую невозможность реализации этой особенности движения потока ввиду ограниченности длины рассматриваемого участка (графа 4 табл. 3).

Подчеркнем, что в модели Simulex невозможно задать скорость свободного движения выше 84 м/мин. и площадь проекции более 0,112 м² – даже при таких условиях время эвакуации меньше, чем в моделях Эватек и Флоутек. Указанные модели показывают результаты, сходимые с высокой точностью с положениями теории людских потоков: скорости движения соответствуют плотности людского потока и условиям его движения по рассматриваемому участку.

Заключение

Тестирование моделей на самой простой схеме – движение по прямолинейному участку пути длиной 40 м выявило почти двукратное расхождение результатов расчётов, полученных с использованием различных моделей. Анализ более сложных схем движения (образование и рассасывание скоплений, длительность существования скопления, пересечение границ смежных участков пути) и причин расхождений результатов будет приведен в части 2 настоящей статьи.

Литература

1. *Pathfinder*: Technical reference. Thunderhead engineering, 2009.
2. *Thompson P. Wu J., Marchant E.* // Simulex 3.0: Modeling evacuation in multi-story buildings // Proc. of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science. 1997. Pp. 725-736.
3. *Korhonen T. Hostikka S.* Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac // Technical Reference and User's Guide. VTT Technical Research Centre of Finland, 2009.
4. *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.
5. *Холщевников В.В., Никонов С.А., Шамгунов Р.Н.* Моделирование и анализ движения людских потоков в зданиях различного назначения: учеб. пособие. М.: МИСИ, 1986.
6. *СИТИС: Флоутек 2.60.* Расчёт эвакуации. Руководство пользователя. 4155-РП-2.60. Редакция 41. 2012.
7. *Nelson N.E., McLennan H.A.* Emergency Movement. The SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering (2nd edition). Quincy, MA, NFPA: (3-286) – (3-295). 1996.
8. *Ando K., Ota H., Oki T.* Forecasting the Flow of People // Railway Research Review. Vol. 45 (2). 1988. Pp. 8-14.
9. *Helbing D., Molnár P.* Social force model for pedestrian dynamics // Physical Review E 51:4282-4286. 1995.
10. *Яловой И.О.* Имитационное моделирование потоков пешеходов на основе модели социальных сил // Инженерный вестник Дона. № 2. 2009.