

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

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ ЭВАКУИРУЕМЫХ ЛЮДЕЙ (часть 2)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 2)**

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 29 сентября 2015 г.

Дальнейший анализ посвящён рассмотрению результатов моделирования при движении по рассмотренному выше участку, но с расположенным посередине дверным проёмом шириной 1 м, рис. 5. Результаты приведены на рис. 6 и в табл. 4.

Результаты расчёта более сложной ситуации с образованием скопления показывают ещё более разительное отличие: ключевые значения параметров людского потока при пересечении границы смежных участков пути через проём с образованием скопления – время существования скопления, интенсивность движения через проём, а также общее время эвакуации – отличаются более чем в 2 раза.

Наименьшее время движения людей по рассматриваемому участку получено при использовании программного комплекса PathFinder. Это обусловлено высоким значением интенсивности движения через проём при образовании скопления – 19,0 м/мин.

¹Продолжение статьи "Анализ математических моделей пешеходных потоков эвакуируемых людей (часть 1)" [11]

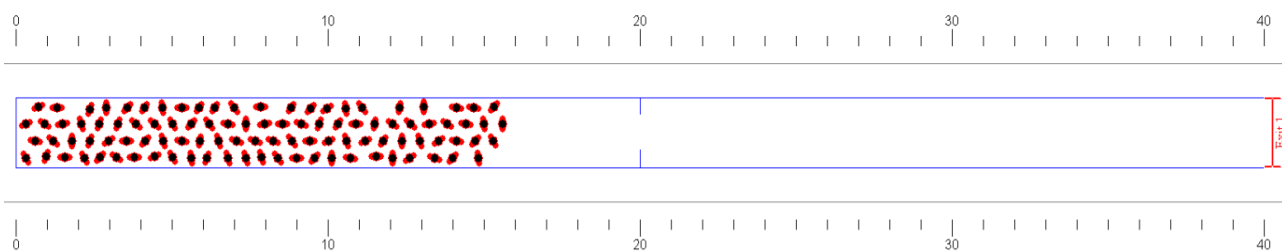


Рис. 5. Расчётная схема движения людского потока № 2

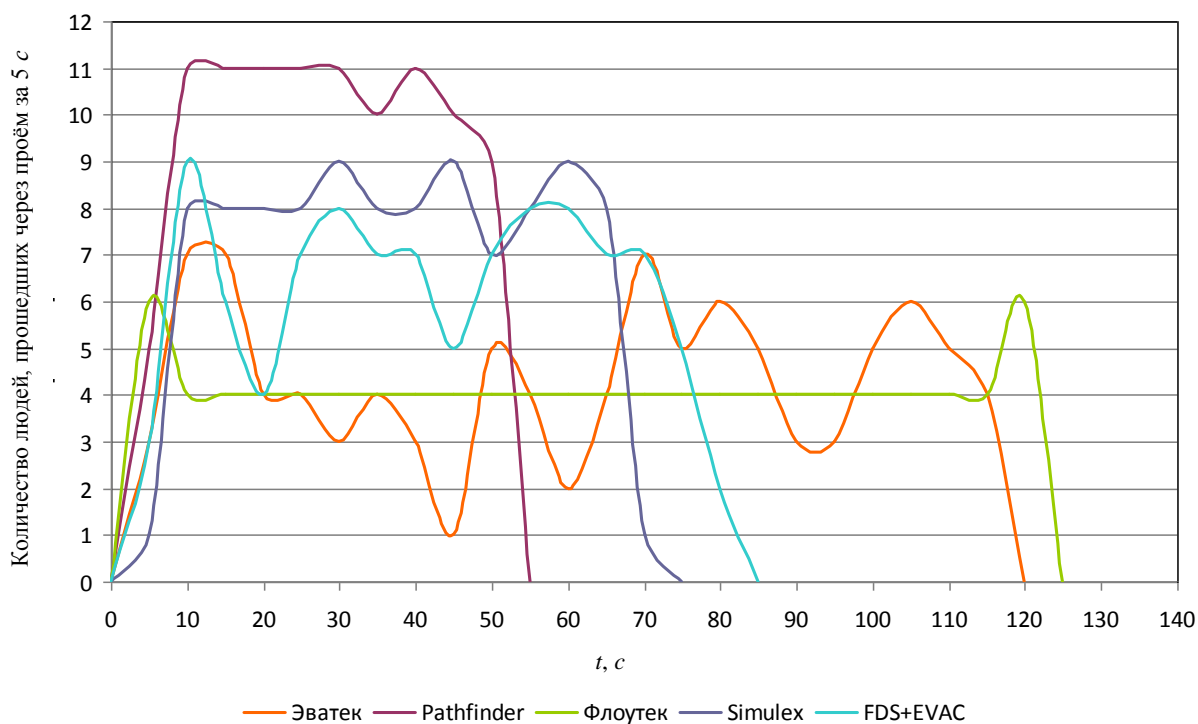


Рис. 6. Динамика движения людей через дверной проём при образовании скопления. Схема № 2

Таблица 4

Результаты моделирования расчётной ситуации № 2

Программные комплексы	Общее время эвакуации, мин.	Время существования скопления у проёма, мин.			Количество людей в скоплении	Плотность потока при скоплении	Длина скопления, м	Интенсивность движения через проём, м/мин.
		$t_{ск}^H$	$t_{ск}^K$	$t_{ск}$				
Pathfinder	1,02	0,10	0,72	0,62	94	0,4	15	19,0
Эватек	2,06	0,21	1,61	1,40	86	0,5	15	7,7
Флоутек	2,24	0,20	1,43	1,23	90	0,92	6	9,1
Simulex	1,36	0,19	0,80	0,61	88	0,4	15	18,0
FDS+EVAC	1,48	0,10	1,27	1,17	95	0,4	15	10,1

Обращая внимание на плотность в скоплении ($0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$) можно говорить о том, что это пара значений ложатся на кривую зависимости интенсивности от плотности движения, используемую в российских нормах, и почти соответствует максимальным значениям интенсивности ($19,6 \text{ м/мин.}$). Фактически, это говорит о том, что плотность потока, по сравнению с первоначальной, не увеличилась и никакого скопления нет, что соответствует условиям комфортного или спокойного движения. Однако в таких условиях интенсивность движения значительно ниже и составляет $10,3 \text{ м/мин.}$ для комфортных условий движения и $13,8$ для спокойных. Таким образом, очевиден вывод о невозможности воспроизведения указанной моделью процесса образования скопления людей. Более того, из всех рассмотренных моделей индивидуально поточного движения плотность людского потока при образовании скопления возрастает только у модели Эватек, но до значений $0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$. В целом, можно говорить о том, что зарубежные модели некорректно воспроизводят процесс движения людей при образовании их скопления и ни одна из рассмотренных моделей не воспроизводит движение людских потоков с плотностью свыше $0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Наиболее точные результаты получены при использовании моделей Флоутек и Эватек, наименее – при использовании PathFinder и Simulex. По сравнению с зарубежными аналогами, FDS+EVAC демонстрирует близкие к российским моделями результаты.

Обращает не себя внимание вид кривой (рис. 6), отражающий динамику выхода людей: для моделей индивидуально-поточного движения она носит пульсирующий характер, что и наблюдается в натуре, а для модели имитационно-стохастического движения (поточной) – это прямая линия, фактически показывающая равномерное движение дискретных частей потока через рассматриваемое сечение пути.

Следующая расчётная ситуация (№ 3) представляет собой схему с делением 40-метрового участка на два смежных участка шириной 2 м и 1 м длиной по 20 м каждый, рис. 7.

Результаты моделирования, представленные на рис. 8 и в табл. 5, показывают в целом близкие по отношению друг к другу временные результаты (за исключением Эватека), однако отличающиеся в качественном выражении. Наименьшее время эвакуации характеризует результаты моделирования с помощью модели PathFinder. Это связано с высокой интенсивностью движения через сечение пути в месте его сужения. Более того, фактически интенсивность не изменилась, то есть сужение пути в 2 раза не оказало существенного влияния на движение людского потока.

Интенсивность движения для модели Simulex и FDS+EVAC, наоборот, оказалась даже ниже, чем принято в теории движения людских потоков при его разуплотнении при движении по горизонтальному пути – $13,5 \text{ м/мин.}$ Наиболее точно результаты моделирования воспроизведены с использованием модели Флоутек. Однако наиболее необъяснимые результаты демонстрирует модель Эватек.

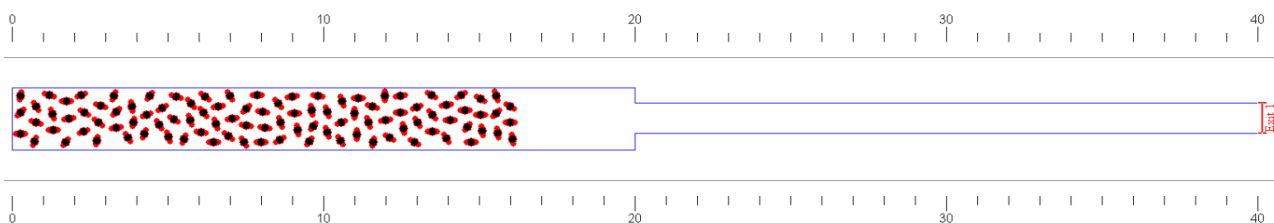


Рис. 7. Расчётная схема движения людского потока № 3

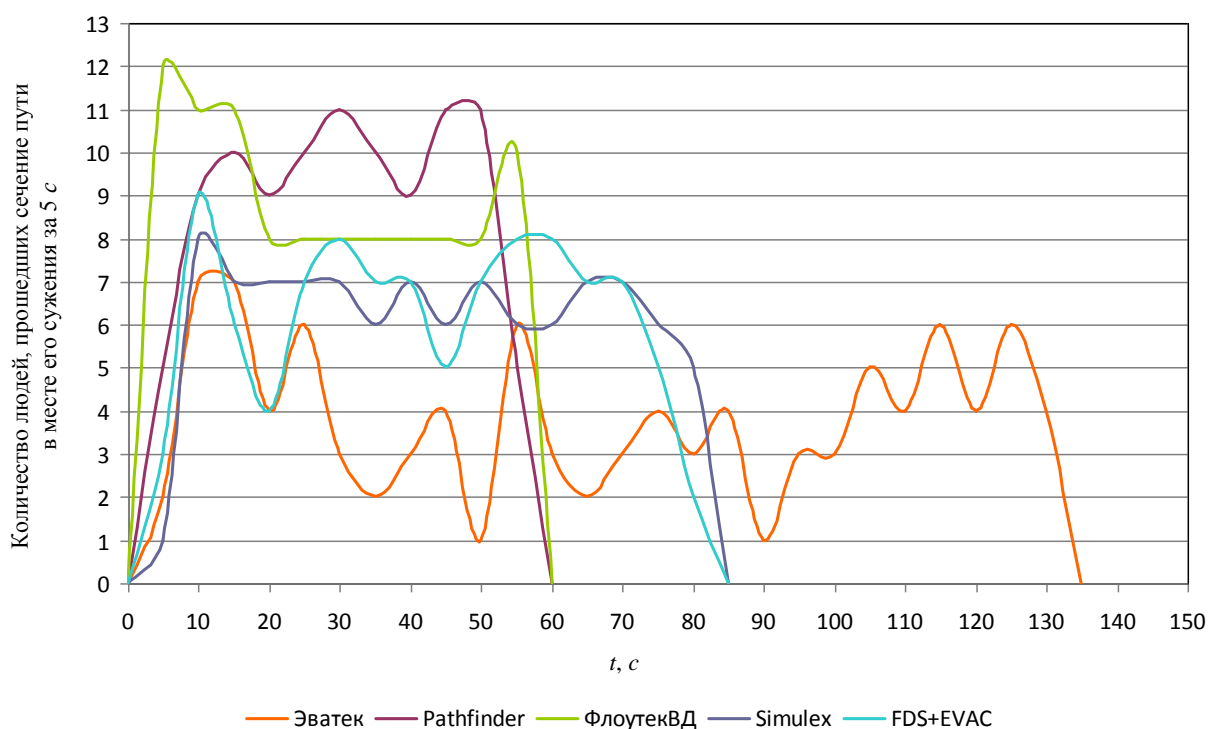


Рис. 8. Динамика движения людей через сечение пути в месте его сужения (до 1 м). Схема № 3

Таблица 5

Результаты моделирования расчётной ситуации № 3

Программные комплексы	Общее время эвакуации, мин.	Время существования скопления у проёма, мин.			Количество людей в скоплениях	Плотность потока при скоплении	Длина скопления, м	Интенсивность движения через границу участков	Плотность* на участке шириной 1 м, м ² /м ²
		$t_{ск}^H$	$t_{ск}^K$	$t_{ск}$					
Pathfinder	1,07	0,10	0,85	0,75	94	0,4	15	15,7	0,15
Эватек	2,43	0,21	2,13	1,92	86	0,5	15	5,6	0,08
Флоутек	1,37	0,20	0,91	0,71	90	0,92	4	13,8	0,29
Simulex	1,63	0,19	1,30	1,11	88	0,4	15	9,9	0,15
FDS+EVAC	1,48	0,10	1,27	1,07	95	0,4	15	11,1	0,11

*Плотность определялась по результатам визуализации моделирования движения пешеходов

Анализ визуализации результатов показал, что неудачно реализован алгоритм преодоления границы более узкого смежного участка пути – движение происходит с крайне низкой интенсивностью и пешеходы ждут своей очереди на проход. Значения интенсивности (в среднем 7 м/мин.) в большей мере соответствуют движению через проём при плотности потока $0,9$ и более. Таким образом, можно говорить о слабом влиянии сужения пути на параметры людского потока (модели PathFinder и FDS +Evac), наоборот, о его чрезмерным влиянии в модели Эватек и некорректном воспроизведении разуплотнения людского потока в модели Simulex.

Проанализируем результаты моделирования движения людского потока при движении по 40-м участку, разделённому на два смежных участка шириной 2 м и $1,5 \text{ м}$ длиной по 20 м каждый (схема № 4). Результаты моделирования представлены на рис. 9.

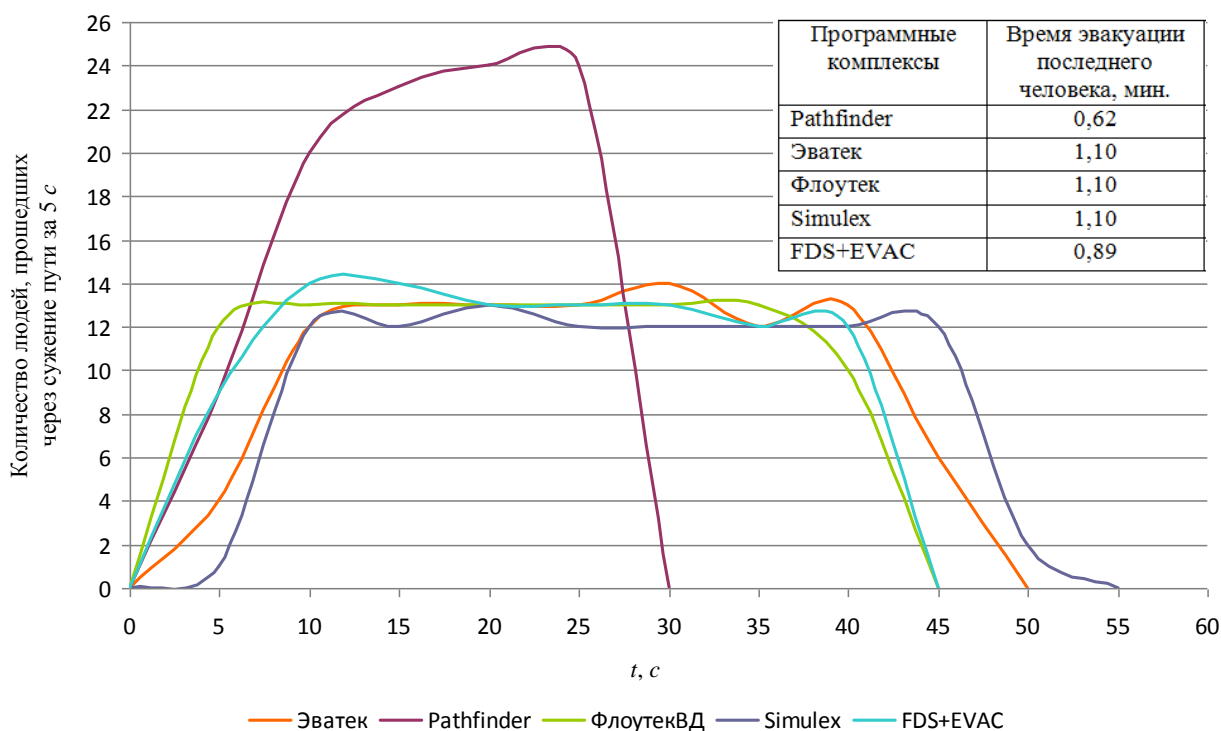


Рис. 9. Динамика движения людей через сечение пути в месте его сужения (до $1,5 \text{ м}$). Схема № 4

Результаты расчёта схемы движения № 4 показывают, что в целом все модели демонстрируют сходную динамику выхода людей, отличающуюся лишь временными характеристиками процесса, обусловленную особенностями алгоритма расчёта. Однако, расчётное время эвакуации, определённое с использованием программного комплекса PathFinder, отличаются почти в 2 раза. Это обусловлено крайне высокой (до $192 \text{ чел./}(м \text{ мин.})$) интенсивностью движения людей через сечение пути в месте его сужения. Полученные результаты еще раз обращают внимание на некорректные результаты моделирования влияния геометрии пути движения людского потока на его параметры, получаемые с использованием модели PathFinder.

Схема движения № 5 представляет собой расчётную ситуацию со слиянием людских потоков, рис. 10. Результаты моделирования представлены на рис. 11 и в табл. 6.

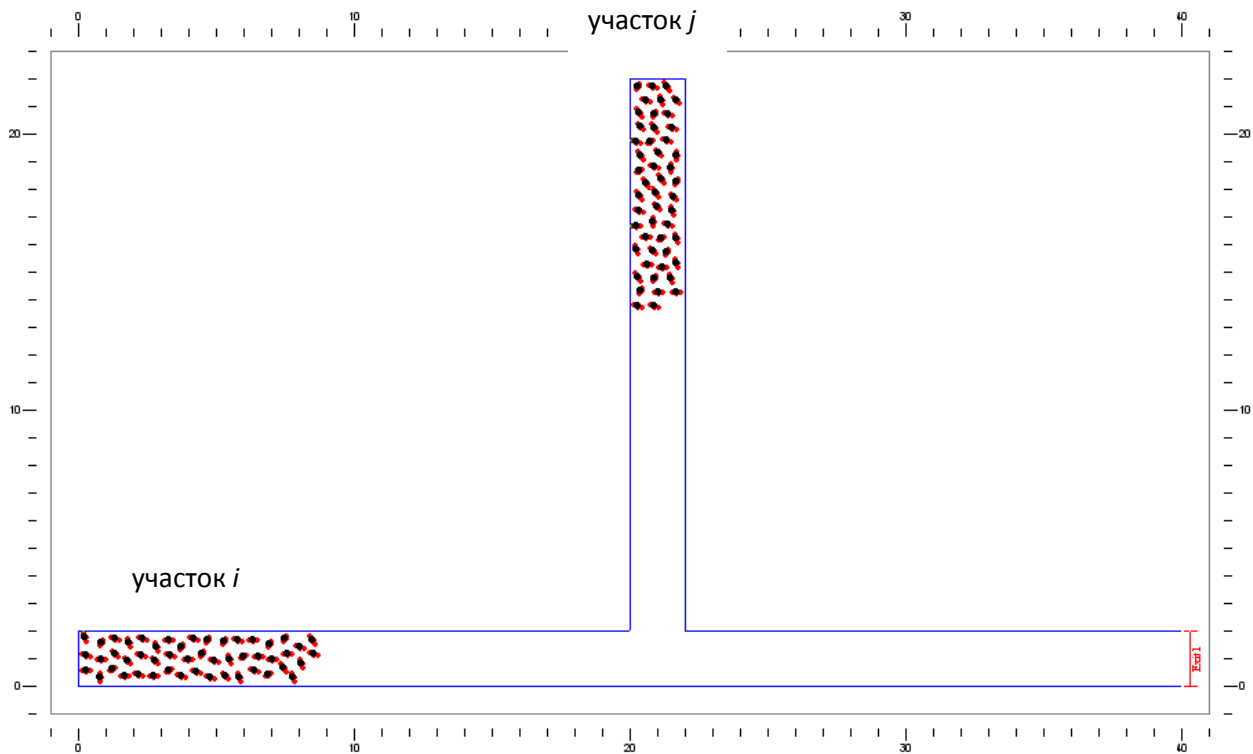


Рис. 10. Расчётная схема движения людского потока № 5

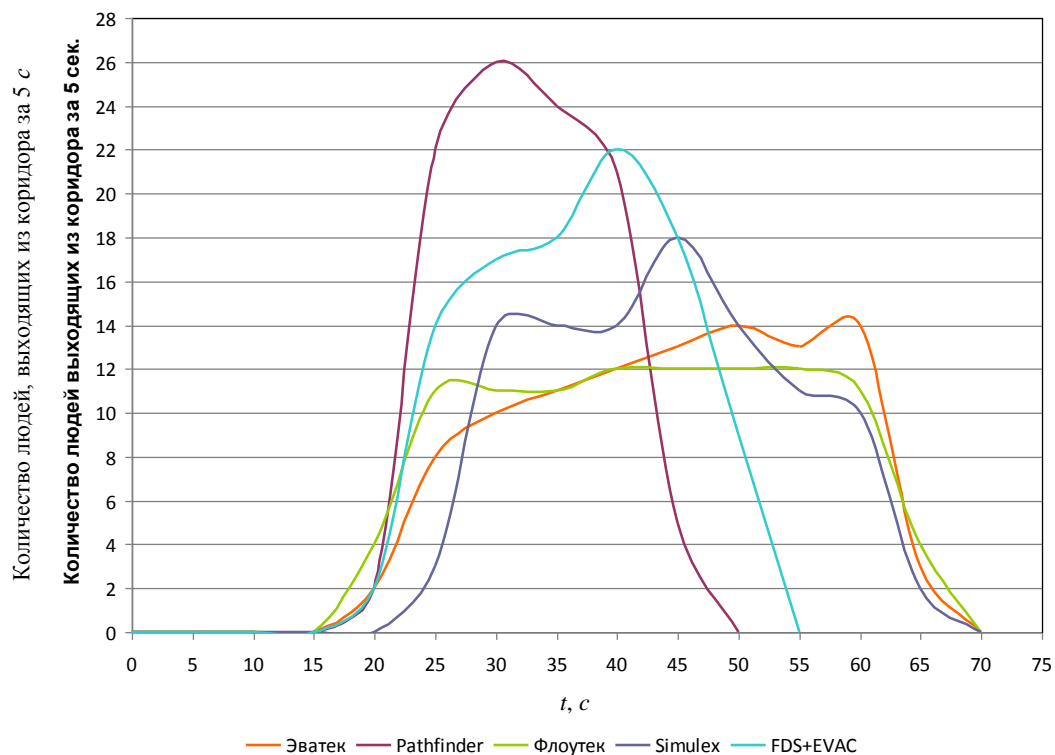


Рис. 11. Динамика выхода людей из коридора при слиянии людских потоков. Схема № 5

Результаты моделирования расчётной ситуации № 5

Программные комплексы	Время эвакуации первого человека, мин.	Время эвакуации последнего человека, мин.	Максимальная плотность в месте слияния потоков
Pathfinder	0,32	0,69	0,4
Эватек	0,32	1,02	0,5
ФлоутекВД	0,25	1,04	0,92
Simulex	0,38	1,01	0,4
FDS+EVAC	0,32	0,79	0,4

Результаты моделирования показывают отличие в результатах, полученных различными программными комплексами. Переходя от количественных характеристик модели к качественным, следует подчеркнуть общую низкую чувствительность расчётных алгоритмов зарубежных моделей к росту плотности людского потока. Это обуславливает повышенную интенсивность движения и снижение вероятности образования скоплений, что ведёт к занижению расчётного времени эвакуации.

Анализ результатов расчёта, полученных с использованием рассматриваемых зарубежных моделей, позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Неверно реализован алгоритм переформирования людского потока (осуществляется со слишком высокой скоростью).

2. Движение через сужение участка пути, в том числе через дверной проём, при образовании скопления проходит с высокой интенсивностью, не зафиксированной при проведении экспериментов и наблюдений.

3. Вероятно, в моделях реализован "сверх оптимальный" алгоритм пешеходного движения – каждый из пешеходов находит такое место в потоке, в котором наименьшее значение плотности, что позволяет ему двигаться с высокой скоростью. Однако это не соответствует данным натурных наблюдений.

4. Зависимости между параметрами людского потока, реализованные в моделях, не соответствуют наблюдаемым в действительности: влияние плотности на скорость движения в значительной степени нивелировано, что ведёт к высоким скоростям движения и заниженному значению времени эвакуации.

Недостатки зарубежных моделей диктуют необходимость дальнейшего совершенствования отечественных разработок. Дополнительный анализ особенностей алгоритма программного комплекса Эватек позволил установить определенные неточности при моделировании слияния людских потоков. Моделирование расчётной схемы № 5 (рис. 12) показало, что $t_p^i < t_p^j$, то есть время выхода людей из участка i меньше, чем время выхода с участка j .

Сопоставительный расчёт, выполненный в соответствии с теорией, показал, что это соотношение неверно. Это связано с необъяснимой деликатностью людей, выходящих с участка j , во многих случаях уступающих дорогу пешеходам из участка i даже при образовании уплотнения в месте слияния, нарушая прямо пропорциональное соотношение количества людей в общем потоке и ширины участков, ведущих к месту слияния.

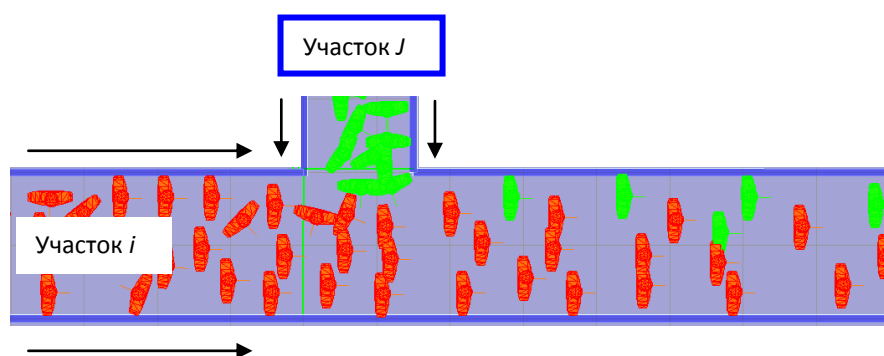


Рис. 12. Анализ алгоритма моделирования слияния людских потоков, реализованного в программном комплексе Эватек

Анализ результатов моделирования показал, что недостаточно точно воспроизводится процесс огибания препятствия людским потоком: на рис. 12а, 12б чётко видно, что пешеходы двигаются "впритирку" к стенам, не используют свободное пространство и чрезмерно уплотняются перед поворотом. Движение по условно неограниченному участку (рис. 12в) показывает, что пешеходы двигаются, не отклоняясь от вектора кратчайшего направления, хотя данные натуральных наблюдений указывают на определённое "разбухание" людского потока, вызванное желанием обогнать более медленно идущих пешеходов. Результаты моделирования движения к выходу, расположенному слева по ходу движения (рис. 12г) не наблюдаются в натуре: в реальности, часть пешеходов предпочтёт "пожертвовать" расстоянием, но выиграть во времени, обойдя более уплотнённую часть потока с другой стороны с целью скорейшего преодоления дверного проёма.

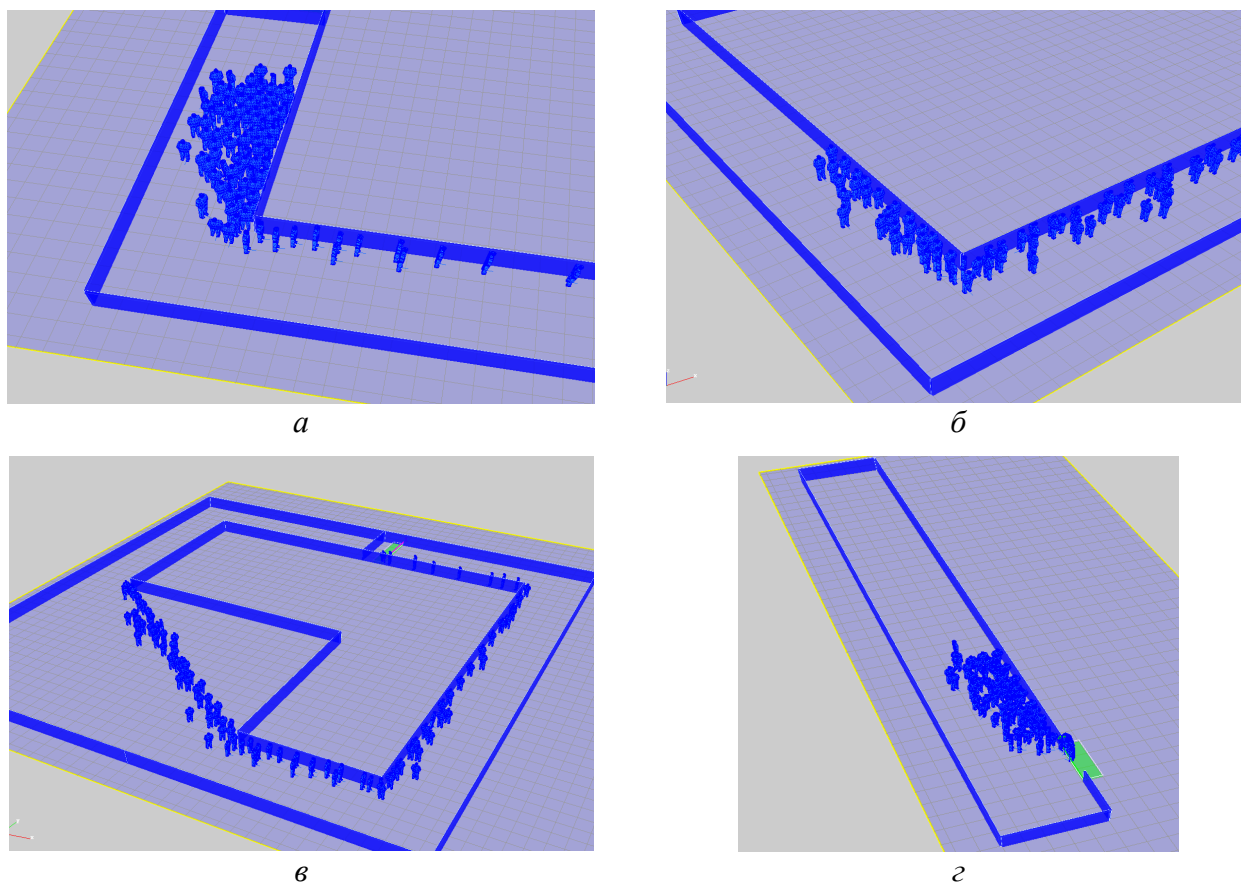


Рис. 12. Моделирование особых случаев движения с использованием программного комплекса Эватек

Заключение

Анализ результатов расчётов, полученных с использованием различных программных комплексов, позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Максимально близкие к теории движения людских потоков результаты демонстрирует имитационно-стохастическая модель движения людского потока. Однако, её возможности воспроизводить особенности поведения людей при пожаре и моделирования движения людских потоков, состоящих из людей с различной мобильностью, с учётом индивидуальных особенностей их пешеходного движения, объективно ограничены. Это показывает необходимость совершенствования алгоритмов индивидуально-поточного движения.

2. Зарубежные модели Simulex (Англия), Pathfinder (США), FDS+Evac (США, Финляндия) показали результаты, которые можно охарактеризовать в целом как далекие от реальности: необъяснимо высокие скорости и интенсивности движения, некорректное воспроизведение движения через проёмы и сужения пути, невозможность моделировать движения людских потоков с плотностью свыше 5 чел./м^2 . В этом сложно винить разработчиков моделей – они использовали ту эмпирическую и теоретическую базу, которая была им доступна, что связано с более низкой в целом исследованностью процесса движения людских потоков.

3. Разработанная в России модель индивидуально-поточного движения лишена недостатков описанных выше моделей и с высокой точностью воспроизводит движения людских потоков. Однако её алгоритм необходимо наполнить дополнительными данными, характеризующими процесс индивидуального движения людей, с учётом их пола, возраста, психологического настроения, мобильных характеристик и других параметров, присущих пешеходному движению человека. По информации, полученной от разработчиков модели "Эватек", новая версия этой программы, возможности которой позволяют моделировать движение маломобильных групп населения, готовится к выходу в конце 2015 года.

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.
11. *Самошин Д.А., Дерюгин Д.П.* Анализ математических моделей пешеходных потоков эвакуируемых людей (часть 1) // Технологии техносферной безопасности. Вып. 5 (63). С. 90-97. 2015. <http://ipb.mos.ru>.