

**В. В. ХОЛЩЕВНИКОВ**, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4); профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: reglament2004@mail.ru)

**А. П. ПАРФЁНЕНКО**, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: parf01@inbox.ru)

УДК 614.842.65-056.24

## СОПОСТАВЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Проведен обзор моделей, применяемых в существующих программно-вычислительных комплексах эвакуации людей, разработанных как в России, так и за рубежом. Представлены результаты сравнительного анализа программно-вычислительных комплексов для моделирования эвакуации людей при расчетах пожарного риска. Рассмотрены методологические основы при моделировании движения людских потоков в процессе эвакуации и при разработке индивидуально-поточных моделей. Проведена оценка валидности результатов моделирования эвакуации людей.

**Ключевые слова:** безопасность людей; индивидуальный пожарный риск; людской поток; расчетное время эвакуации; программно-вычислительные комплексы и модели; сравнение результатов.

Создание персонального компьютера (ПК) со временем обеспечило широчайший доступ людей к электронной вычислительной технике, исключив при этом необходимость в понимании пользователями не только устройства ПК, но и сути закономерностей процессов, получаемых при их программном описании.

Необходимо отметить, что, как показывает обзор предлагаемых программ [1, 2], трудности моделирования людских потоков и незнание их закономерностей приводят к попыткам подмены процессов движения реальных людских потоков моделями других известных процессов иной физической природы. Такой подход не является новостью для методологии моделирования и давно получил свою оценку в научной литературе: “Одних интересуют структура и закономерности явления, приводящие к наблюдаемому результату, других — только сами результаты. Первые, моделируя, пытаются воспроизвести структуру и закономерности явления, вторые — только результаты, не вдаваясь в реальные механизмы их появления” [3].

К сожалению, сложившаяся практика сертификации программно-вычислительных комплексов в области движения людских потоков при эвакуации показывает, что и представители сертифицирующих органов не владеют пониманием сути моделей, описываемых программными комплексами, подлежащими сертификации. В этом случае ответственность за полноту воспроизведения реального про-

цесса возлагается прежде всего на разработчиков псевдомодели при ее программном представлении: согласно Федеральному закону № 184-ФЗ “О техническом регулировании” **они не имеют права “вводить в заблуждение приобретателей” их программного продукта.** Однако и пользователь должен уметь проверять получаемые результаты, чтобы не быть “шестеренкой” в цепи передачи ошибок в механизме существующей системы разработки и контроля проектной документации на объекты строительства, **жертвами ошибок которой может стать большое число граждан страны.**

Публикация в нормативных документах России, в частности в “Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности” (далее — Методика) и МГСН 4.19–2005 “Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москве”, содержательного описания моделей движения людских потоков, рекомендуемых ими для практического применения, открыла для инициативных специалистов — программистов возможность разработки коммерческих программно-вычислительных комплексов. Наиболее распространенными на сегодняшний день в России являются программный продукт “Флоутек ВД” [4] для упрощенной аналитической и имитационно-стохастической моделей и “Эватек” для индивидуально-

поточной модели движения людских потоков. В сравнительный анализ включена также индивидуально-поточная модель, представленная ВНИИПО МЧС России.

Столь широкое программное обеспечение моделей, описывающих движение людских потоков, позволяет сопоставить получаемые по ним результаты и оценить корректность области их применения, предусматриваемой Методикой. Для этого была использована расчетная схема эвакуационных путей из примера “Модель движения людских потоков с растеканием их головных частей”, широко известного по учебному пособию (разд. 3.4) [5], где он рассматривался при описании методики графоаналитического метода расчета. Это дает возможность проанализировать проявление кинематических зависимостей при имитационно-стохастическом моделировании, которые, как было указано выше, в него не вводятся.

Участки, выбранные на расчетной схеме эвакуационных путей для проведения сравнительного анализа моделей и программных комплексов, указаны на рис. 1. Число людей в боковых проходах  $N_{\text{п}} = 28$  чел. Людские потоки начинают движение одновременно с четырех боковых участков их формирования — из проходов, имеющих длину  $l_{\text{п}} = 18$  м и ширину  $b_{\text{п}} = 1,65$  м. Маршрут движения каждого потока таков: по проходу бокового участка и затем по участкам длиной  $l_{\text{к}i}$  коридора постоянной ширины  $b_{\text{к}} = 2$  м к дверному проему шириной  $b_{\text{о}} = 1,6$  м. Плотность людских потоков на участках их формирования во всех вариантах остается постоянной:  $D_{\text{п}} = 0,12 \text{ м}^2/\text{м}^2$  (при  $f = 0,125 \text{ м}^2/\text{чел.}$ ). Размеры участков пути эвакуации по коридору:  $l_{\text{к}1} = l_{\text{к}2} = l_{\text{к}3} = 10$  м;  $l_{\text{к}} = 40$  м.

В качестве исходной базы для проведения сопоставительного анализа было выполнено 100 реализаций расчета процесса движения людских потоков с использованием программы ADLPV-2.0, что позволило получить зависимость средней плотности во времени для каждого участка и вероятный разброс значений плотностей в определенные моменты времени.

Для оценки идентичности математического аппарата, заложенного в программном продукте “Флоутек ВД” и ADLPV-2.0, для рассмотренной выше расчетной схемы был проведен детерминированный расчет при одних и тех же исходных данных, графические результаты которого представлены на рис. 2 и в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 результаты позволяют заключить, что рассматриваемые модели дают близкие результаты: максимальное расхождение между ними не превышает 4,3 %, поэтому использование “Флоутек ВД” в качестве имитационно-стохастической модели для дальнейшего сравнительного

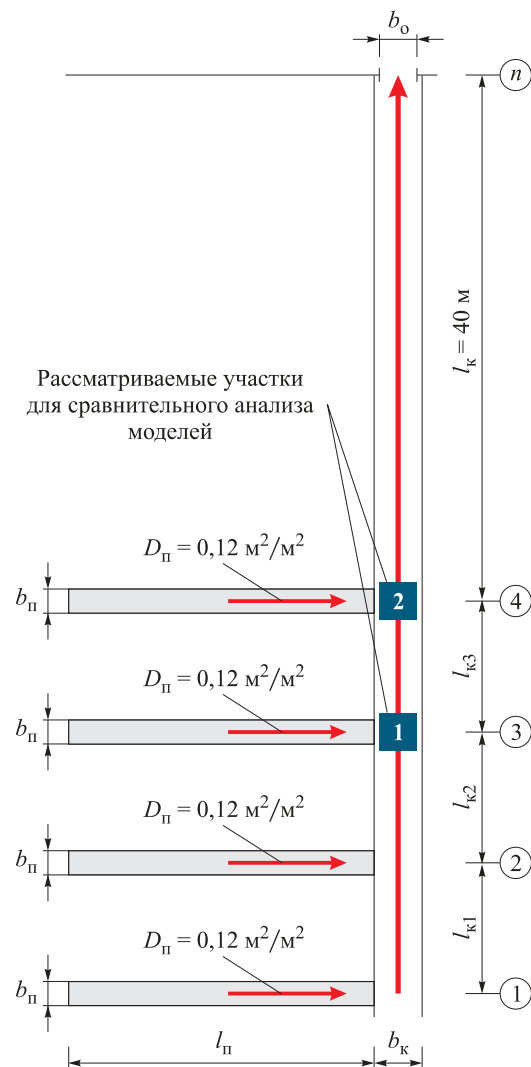


Рис. 1. Расчетная схема путей эвакуации

анализа вполне адекватно. Результаты сравнительного анализа программных продуктов ADLPV-2.0, “Флоутек ВД” и индивидуально-поточной модели для сечений 1 и 2 представлены в графическом виде на рис. 3 и 4.

Данные графики наглядно свидетельствуют, можно сказать, о том, что индивидуально-поточная модель не отражает качественной сути установленных закономерностей движения людских потоков и, как следствие, дает числовые значения параметров процесса эвакуации, которые **неадекватны требуемым при вероятности  $P_s = 0,999$**  в расчетах индивидуального пожарного риска.

Эти результаты заставляют обратить внимание на другую модель индивидуально-поточного движения — “Эватек”, не имеющую статуса официально-нормативной, но, по заявлению ее разработчиков, использующей, как и поточные модели, установленные закономерности психофизической связи между параметрами движения людей в потоке [6].

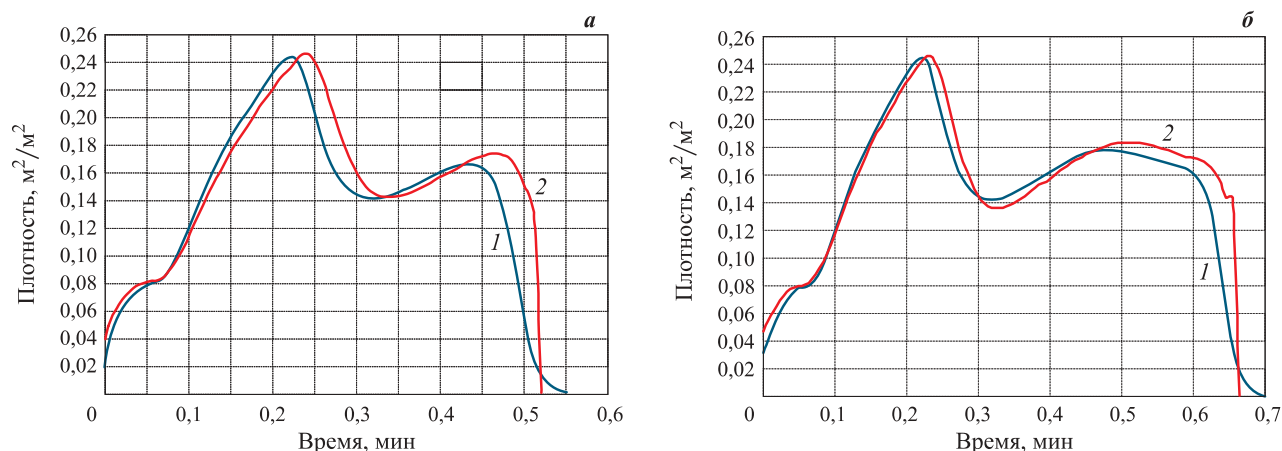


Рис. 2. Результаты сравнительного анализа (изменение плотности во времени) программ “Флоутек ВД” (1) и ADLPV-2.0 (2) для сечений 1 (а) и 2 (б)

Таблица 1. Числовые результаты сравнительного анализа программ “Флоутек ВД” и ADLPV-2.0

| Расчетное сечение | Максимальная плотность, $\text{м}^2/\text{м}^2$ |            | Расчетное время эвакуации, мин |            | Расхождение, % |            |
|-------------------|-------------------------------------------------|------------|--------------------------------|------------|----------------|------------|
|                   | ADLPV-2.0                                       | Флоутек ВД | ADLPV-2.0                      | Флоутек ВД | по плотности   | по времени |
|                   |                                                 |            |                                |            | ADLPV-2.0      | Флоутек ВД |
| 1                 | 0,255                                           | 0,245      | 0,51                           | 0,53       | 3,9            | 3,8        |
| 2                 | 0,252                                           | 0,245      | 0,66                           | 0,69       | 2,8            | 4,3        |

В модели “Эвтек” скорость движения пешехода зависит от плотности потока, которая рассчитывается для каждого человека отдельно. Для этого вокруг него строится область в виде прямоугольника, бо́льшая сторона которого ориентирована по направлению движения человека. Область смещается также по направлению движения человека с коэффициентом 0,4, т. е. центр области находится от центра человека на расстоянии, равном длине большей стороны, умноженной на 0,4. Построенная область разбивается на отдельные, не связанные в ее пределах районы (т. е. перейти из одного района в другой, не покидая область, невозможно). Плотность потока для данного человека  $D$  равна плотности потока в районе, в котором он находится, и вычисляется как

$$D = \sum_{i=1}^m f_i / S_p, \quad (1)$$

где  $m$  — число человек в районе (считается, что человек находится в районе, если его центр лежит внутри его);

$f_i$  — площадь горизонтальной проекции  $i$ -го человека в районе;

$S_p$  — площадь района.

Результаты сравнительного анализа программных продуктов ADLPV-2.0 и “Эвтек” представлены на рис. 5.

При расчете параметров движения и времени эвакуации при помощи программы ADLPV-2.0 моделирование производилось для одной реализации

с учетом стохастичности распределения скорости свободного движения на каждом шаге моделирования. В программе “Эвтек” в качестве исходных данных для каждого индивида (человека) скорость свободного движения выбиралась случайным образом из совокупности, распределенной по нормальному закону. Расчет при этом проводился один раз, так же как и для индивидуально-поточной модели.

Сопоставление графиков, изображенных на рис. 5 для сечений 1 и 2, обнаруживает определенную общность динамики процесса, описываемой программами ADLPV-2.0 и “Эвтек”, несмотря на то что в программах заложены разные алгоритмы расчета процесса движения людей. При этом расхождения во времени прохождения участков последним (закрывающим поток) человеком оказываются незначительными.

На рис. 6 приведено сопоставление кривых, характеризующих время прохождения последним человеком различных сечений по длине общего прохода для разных моделей, включая графоаналитический метод расчета. На рис. 6 показан также вероятный разброс значений времени прохождения участков при имитационно-стохастическом моделировании, алгоритм которого заложен в программных продуктах ADLPV-2.0 и “Флоутек ВД”.

Графики на рис. 6 наглядно демонстрируют ожидаемую общность и различие моделей, заложенных теорией людских потоков в нормирование [7]. При этом на рис. 6 показана и область возможных (допу-

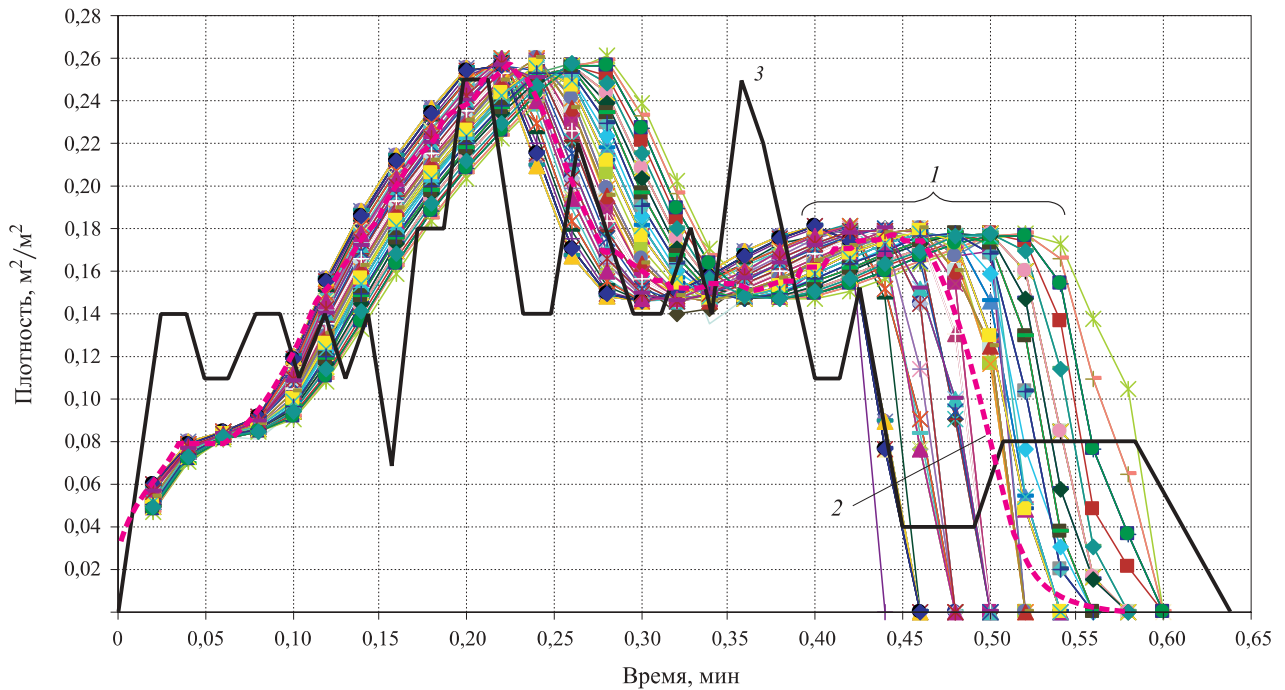


Рис. 3. Изменение плотности людских потоков во времени для сечения 1 в программах: 1 — ADLPV-2.0 (100 расчетов); 2 — Флоутек ВД; 3 — индивидуально-поточная модель

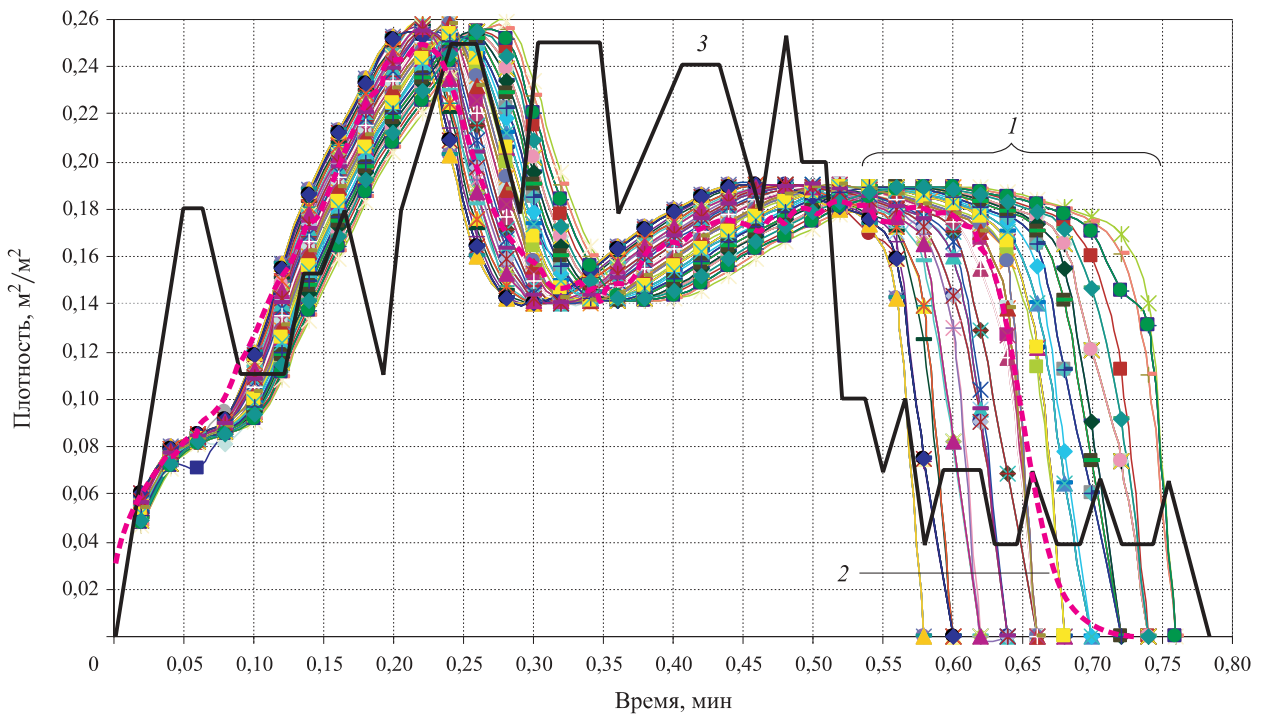


Рис. 4. Изменение плотности людских потоков во времени для сечения 2 в программах: 1 — ADLPV-2.0 (100 расчетов); 2 — Флоутек ВД; 3 — индивидуально-поточная модель

стимых) отклонений значений расчетного времени эвакуации  $t_p$  (пунктирные линии), обусловленных дисперсией значений случайной величины скорости свободного движения людей в потоке  $V_0$  при повышенной категории его движения.

Графики  $t_p$ , построенные по результатам расчетов в программах ADLPV-2.0 и “Флоутек ВД” с ис-

пользованием математического ожидания элементарной случайной функции

$$V_{jD_j}^3 = V_{0j}^3 [1 - a_j \ln (D_j / D_{0j})], \quad (2)$$

показывают некоторое смещение их от средних к нижним границам возможных значений. Здесь  $V_{jD_j}^3$  — математическое ожидание скорости движения люд-



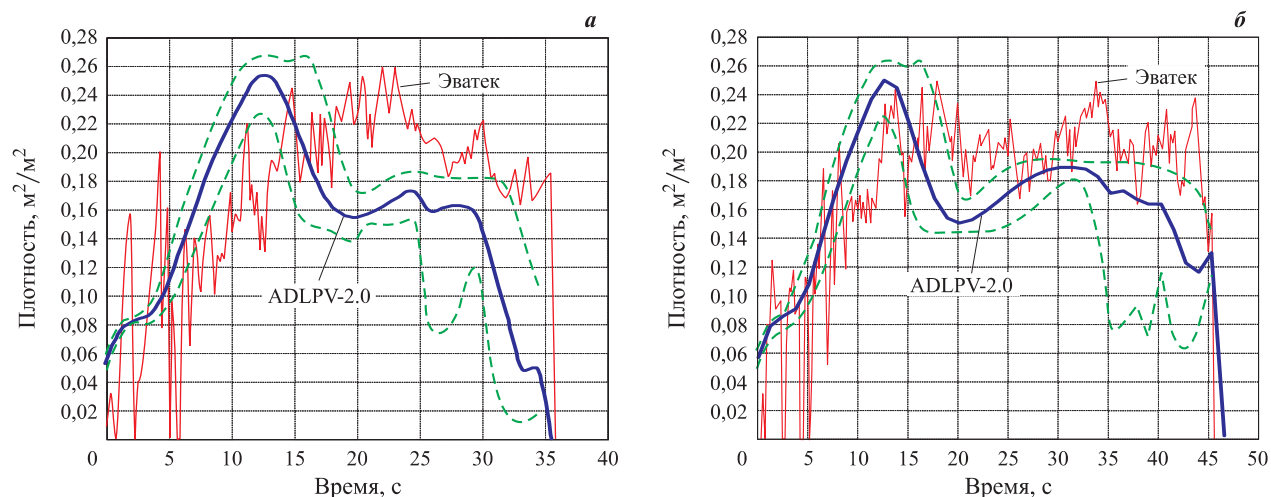


Рис. 5. Изменение плотности людских потоков во времени для сечений 1 (а) и 2 (б) в программах ADLPV-2.0 и “Эватек”:  
— — — — — разброс значений плотности

ского потока в эмоциональном состоянии при плотности потока на  $j$ -м участке  $D_j$ ;  $V_{0j}^3$  — случайная величина скорости свободного движения людей в потоке при его плотности  $D_0$ ;  $a_j$  — коэффициент, отражающий психофизическую адаптацию людей к движению в составе потока по  $j$ -му виду пути [6].

В то же время графики согласуются с результатами графоаналитического метода расчетов, что свидетельствует о том, что **они отображают и не предписываемые им кинематические закономерности изменения параметров людских потоков в процессе их движения**. Следует отметить, что результаты этого метода лежат в области допустимых отклонений при моделировании движения людских потоков как случайного процесса.

Результаты расчетов  $t_p$ , полученные по упрощенной аналитической модели, дают заниженные значения данного параметра на тех участках эвакуационного пути, на которых проявляется значительное влияние процессов переформирования и растекания людских потоков, описание которых не входит в эту модель. За счет этого она и дает “запас” времени на эвакуацию при нормировании размеров эвакуационных путей и выходов, когда нет возможности учитывать такие нюансы процесса эвакуации [1, 2].

Полученные по программе “Эватек” значения  $t_p$  лежат вблизи нижней границы допустимых значений при учете стохастичности процесса эвакуации. Результаты же индивидуально-поточной модели стабильно значительно ниже области допустимых отклонений значений расчетного времени эвакуации  $t_p$ .

Результаты этого анализа показывают отсутствие модели индивидуально-поточного движения людей, адекватной реальному потоку. Актуальность модели мотивируется необходимостью пристально-

го внимания к движению людей с ограниченными мобильными возможностями в потоке смешанного состава в достаточно обширной номенклатуре общественных зданий разных классов функциональной пожарной опасности.

Анализ аналогичных зарубежных моделей, имеющих многочисленные оперативные возможности и методы видеопредставления [8–12], показывают, что они **используют некорректные зависимости между параметрами людских потоков**. Так, например, в модели “PathFinder” при плотности потока  $D > 0,55$  чел./м² влияние плотности на скорость  $v$  описывается соотношением

$$v(D) = v_{\max} \frac{k - 0,266kD}{1,19}, \quad (3)$$

а интенсивность движения  $F_s$  через дверной проем рассчитывается по формуле

$$F_s = (1 - 0,266D)kD, \quad (4)$$

где  $v_{\max}$  — максимальная скорость движения пешехода, задаваемая пользователем;

$k$  — коэффициент скорости свободного движения, равный 1,4 м/с.

В модели “Simulex” скорость движения людей  $V$  (м/с) зависит от расстояния между ними:

$$V = \frac{V_0 d - 0,25}{0,87}, \quad (5)$$

где  $V_0$  — скорость свободного движения человека в потоке, выбираемая в интервале от 0,8 до 1,7 м/с в зависимости от пола и возраста человека, м/с;

$d$  — расстояние между людьми, м;

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

В модели “FDS+Evac” для оценки скорости движения пешеходов в зависимости от расстояния меж-

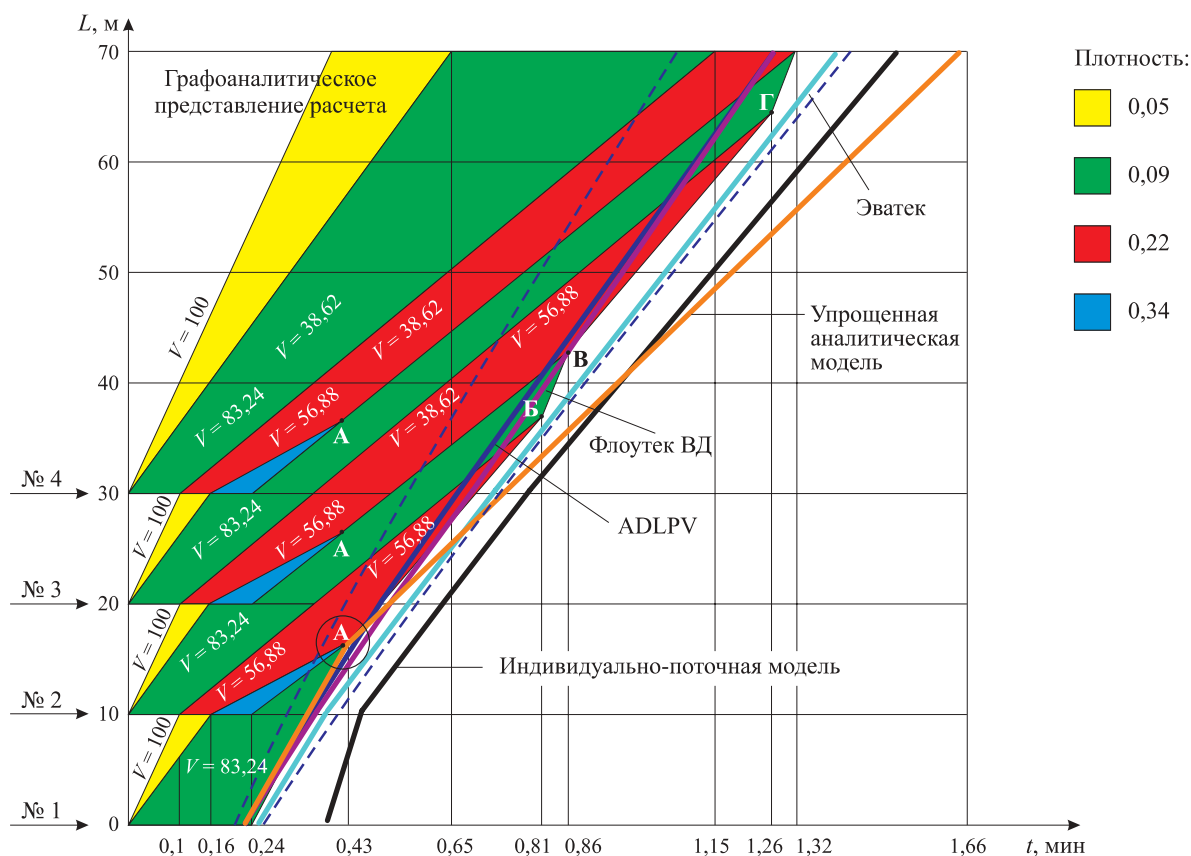


Рис. 6. Сопоставление кривых, характеризующих время прохождения последним человеком различных сечений по длине общего прохода: — — — — — разброс при имитационно-стохастическом моделировании

ду ними, а также от расстояния до преград используется модель социальных сил, определяемых в том числе законами механики.

Для проверки адекватности моделей индивидуально-поточного движения реальным ситуациям может быть использован прежде всего ее частный случай — свободное движение людских потоков. В этом случае распределение людей в потоке по длине пути и времени их прихода в любое его сечение определяется чисто вероятностными методами, поскольку

они являются функциями случайного аргумента — случайной величины скорости свободного движения  $V_{0j}$ . Для их оперативного построения сегодня существует соответствующая программа FMT 1.0 [13]. Очевидно, что достаточно многочисленная совокупность реализаций, осуществленных по любой из индивидуально-поточных моделей, должна давать статистическую совокупность значений, идентичных совокупности, получаемой по этой программе для тех же условий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холицевников В. В., Самошин Д. А., Галушка Н. Н. Обзор компьютерных программ моделирования эвакуации зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность. — 2002. — Т. 11, № 5. — С. 40–49.
2. Парфёненко А. П. Методология моделирования людских потоков и практика программирования их движения при эвакуации // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 12. — С. 46–55.
3. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. — М.: Мир, 1978.
4. Karkin I. N., Parfenenko A. P. Flowtech VD — computer-simulation method from evacuation calculation // International Scientific and Technical Conference Emergency Evacuation of People from Buildings. — Warsaw, 2011. — P. 111–118.
5. Холицевников В. В., Самошин Д. А. Эвакуация и поведение людей при пожарах: учебное пособие. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2009.
6. 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.

7. Холщевников В. В. Исследования людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре. — М. : МИПБ МВД России, МГСУ, 1999.
8. Kubawara H., Doi H., Ishimi A. A fire-escape simulation method by describing actions of evacuees as probabilistic phenomena // CIB Symposium "Systems Approach to Fire Safety in Building", Tzukuba (Japan). — 1979. — Vol. 1. — P. 105–122.; Muta K., Sato H., Ouchi T., Hara V. Study on total Safety System // CIB Symposium "Systems Approach to Fire Safety in Building", Tzukuba (Japan). — 1979. — Vol. 1. — P. 79–92.
9. Thompson P. A., Marchant E. W. A computer model for the evacuation of large building populations // Fire Safety Journal. — 1994. — Vol. 24, Issue 2. — P. 131–148. doi: 10.1016/0379-7112(95)00019-p.
10. Pathfinder : Technical reference. Thunderhead Engineering Consultants, Inc., 2009. URL : <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder> (дата обращения: 10.03.2015).
11. Mott MacDonald: Evacuation modeling. URL : <http://www.mottmac.com> (дата обращения: 10.03.2015).
12. Owen M., Galea E. R., Lawrence P. J. The Exodus evacuation model applied to building evacuation scenarios // Journal of Fire Protection Engineering. — 1996. — Vol. 8, Issue 2. — P. 65–84. doi: 10.1177/104239159600800202.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614752 от 17.06.2011 г. Программа FMT 1.0 / Шишов И. А., Холщевников В. В. — М. : Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2011.

*Материал поступил в редакцию 25 марта 2015 г.*

English

## COMPARISON OF DIFFERENT MODELS OF THE MOVEMENT OF HUMAN FLOWS AND RESULTS OF PROGRAM COMPUTER SYSTEMS

**KHOLSHCHEVNIKOV V. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: reglament2004@mail.ru)

**PARFENENKO A. P.**, Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: parf01@inbox.ru)

### ABSTRACT

With consider regulation process of evacuation of people in emergency situations program computer systems which have to give the chance to analyse different settlement situations at the solution of problems of ensuring fire safety in buildings of different classes of functional fire danger are developed now. Compliance of results of the calculations performed by these program computer systems, to data of natural supervision of the movement of human flows in actual practice has to be an indispensable condition of possibility of their application in rationing. Therefore paramount criterion of applicability of any of such program complexes is the validity of model of evacuation which they use.

It is shown that simplified the analytical and imitating and stochastic models based on extensive statistical material of researches of human streams in buildings of various functional purpose with their various structure of the main contingent of people and on the determined consistent patterns of communication between parameters of flows of people of any psychophysiological state are correctly described by program computer systems ADLPV-2.0, "Floutek VD". These models reflect also the kinematic dependences of change of parameters of a flow occurring upon its transition through the borders of adjacent sites of an evacuation way described by a graphic-analytical method.

The comparative analysis with these results of results of the individual and line model given in "A technique of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger" demonstrates a dissonance of this model.

The analysis of results of the program of the individual flow movement "Evatek" model shows their convergence with the results close to the lower bound of a confidential interval of an estimated time of evacuation. The model demands completion of reproduction of kinematics of individual behavior of people.

The analysis of foreign models of the individual flow movement of people which is carried out on the example of the program “PathFinder” and “FDS+Evac” complexes shows that they use dependences between parameters of streams not corresponding to human streams.

As a result of the carried-out analysis comes to light that for modeling of process of evacuation it is necessary to use imitating and stochastic model of the movement of human flows which most precisely reflects dynamics of process in different exploitation conditions of the building.

**Keywords:** safety of people; individual fire risk; human stream; estimated time of evacuation; program computer systems and models; comparison of results.

## REFERENCES

1. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Galushka N. N. Obzor kompyuternykh programm modelirovaniya evakuatsii zdaniy i sooruzheniy [Review of computer simulation models for computation build environment evacuation]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2002, vol. 11, no. 5, pp. 40–49.
2. Parfenenko A. P. Metodologiya modelirovaniya lyudskikh potokov i praktika programmirovaniya ikh dvizheniya pri evakuatsii [Methodology for modeling human movements and practice of programming their movement during evacuation]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 12, pp. 46–55.
3. Shannon R. *Imitatsionnoye modelirovaniye system — iskusstvo i nauka* [Imitating modeling of systems — art and science]. Moscow, Mir Publ., 1978.
4. Karkin I. N., Parfenenko A. P. Flowtech VD — computer-simulation method from evacuation calculation. *International Scientific and Technical Conference Emergency Evacuation of People from Buildings*. Warsaw, 2011, pp. 111–118.
5. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A. *Evakuatsiya i povedeniye lyudey pri pozharakh. Uchebnoye posobiye* [Evacuation and behavior of people at the fires. Schoolbook]. Moscow, State Academy of Fire Safety of Emercom of Russia Publ., 2009.
6. Kholshchevnikov V. V. *Zakonornost svyazi mezhdu parametrami lyudskikh potokov. Diplom No. 24-S na otkrytiye v oblasti sotsialnoy psikhologii* [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.
7. Kholshchevnikov V. V. *Issledovaniya lyudskikh potokov i metodologiya normirovaniya evakuatsii lyudey iz zdaniy pri pozhare. Monografiya* [Researches of human streams and methodology of rationing of evacuation of people from buildings at the fire. Scientific monograph]. Moscow, Moscow Institute of Fire Safety of Ministry of the Interior of Russia, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 1999.
8. Kubawara H., Doi H., Ishimi A. A fire-escape simulation method by describing actions of evacuees as probabilistic phenomena. *CIB Symposium "Systems Approach to Fire Safety in Building"*, Tzokuba (Japan), 1979, vol. 1, pp. 105–122.; Muta K., Sato H., Ouchi T., Hara V. Study on total Safety System. *CIB Symposium "Systems Approach to Fire Safety in Building"*, Tzokuba (Japan), 1979, vol. 1, pp. 79–92.
9. Thompson P. A., Marchant E. W. A computer model for the evacuation of large building populations. *Fire Safety Journal*, 1994, vol. 24, issue 2, pp. 131–148. doi: 10.1016/0379-7112(95)00019-p.
10. Pathfinder: Technical reference. Thunderhead Engineering Consultants, Inc., 2009. Available at: <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder> (Accessed 10 March 2015).
11. Mott MacDonald: Evacuation modeling. Available at: <http://www.mottmac.com> (Accessed 10 March 2015).
12. Owen M., Galea E. R., Lawrence P. J. The Exodus evacuation model applied to building evacuation scenarios. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1996, vol. 8, issue 2, pp. 65–84. doi: 10.1177/104239159600800202.
13. Shishov I. A., Kholshchevnikov V. V. *Program FMT 1.0. Certificate on the state registration of the computer program no. 2011614752 on 17.06.2011*. Moscow, Russian Federal Service for Intellectual Property Publ., 2011 (in Russian).