

# СРАВНЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ЭВАКУАЦИИ

Г. П. Князев

В данной работе предлагается метод валидации моделей эвакуации и метод сравнения различных моделей эвакуации между собой с целью установления более точной, с точки зрения приближенности к реальности, модели.

*Ключевые слова:* эвакуация, модель эвакуации, поведение толпы, валидация, критерий эффективности, тестирование.

## Введение

Существует множество различных подходов к моделированию эвакуации, и на каждом из них основываются несколько методов – для подобного многообразия необходимо наличие способов оценки эффективности предложенных моделей. Подобные методы предлагаются в данной работе.

Трудности моделирования людских потоков и незнание их закономерностей приводят к попыткам подмены процессов движения реальных людских потоков моделями других известных процессов иной физической природы. Автору близка оценка данному подходу, данная в [1]: «Одних интересует 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».

Следует отметить, что подмена процессов может происходить не только из-за тяги к простоте или формальным соответствиям выходных цифр, но и из-за тяги к сокращению сложности вычислений и соответственно к сокращению машинного времени, затрачиваемого на работу модели.

В любом случае, многообразие моделей эвакуации приводит к трудности выбора модели для конечного потребителя. И одним из важных критериев выбора является её точность, в понимании соответствия реальным процессам. При этом возникает два основных перекликающихся вопроса – как понять – точна ли модель и как оценить эту точность?

Точность модели подразумевает, что она отражает процесс реального мира. Остаётся выяснить, в чём её измерять.

За долгие годы исследований научное сообщество накопило богатые знания о природе процесса эвакуации. Главным образом, это данные натуральных наблюдений, запас которых постоянно пополняется. Статистическая база эмпирических данных позволяет опираться на неё при валидации моделей.

Основной зависимостью, определяющей динамику людского потока, является зависимость между скоростью его движения и плотностью. К концу 70-х гг. прошлого века общий объём эмпирических данных составил 24 478 одновременно фиксируемых значений скорости и плотности людских потоков в 69 сериях натуральных наблюдений в зданиях различного назначения. В настоящее время этот объём превысил 40 тыс. замеров [2,с.68].

Предположим, мы разработали новую модель эвакуации и нам нужно удостовериться, что она соответствует реальности. Какие способы мы можем использовать для этого?

1. Сравнение с уже существующими валидными и верифицированными моделями.
2. Сравнение с данными натуральных наблюдений.

При сравнении моделей мы должны выбрать, что именно в них мы сравниваем. Так как нас интересуют отличия в общем, то сравнение должно происходить на основе выбранных критериев. Т.е. модели должны обладать общими свойствами, значения которых сравнимы. Проблема в том, что сущности в моделях различны. Объединяет их процесс. Поэтому

появляется задача формирования набора критериев, математически формализующих описанные реальные закономерности. С помощью этих критериев становится возможным оценивать и сравнивать между собой различные модели эвакуации в части движения людей.

Оценка модели строится на двух понятиях:

**Определение 1.** *Валидация* – процесс определения насколько хорошо математическая модель предсказывает моделируемое реальное физическое явление. [3]

**Определение 2.** *Верификация* – процесс проверки правильности решения. [3]

Валидация, в числе прочего, опирается на сравнение опытных образцов с эталонными. Поэтому имеет смысл проводить валидацию моделей эвакуации через сравнение с эталонной моделью.

**Определение 3.** Под *эталонной моделью* будем понимать модель, наиболее полно отражающую реальный процесс (эвакуации).

Т.е. эталонная модель должна быть максимально приближена к реальности. Понятно, что реальный процесс осложняется множеством влияющих на него факторов, в большинстве своём случайных и не всегда поддающихся статистической обработке из-за малого количества натурального материала или его отсутствия. Поэтому говорить о полном соответствии эталонной модели и реальности не имеет смысла. Но если модель основана на данных натуральных наблюдений и степень отклонения расчётных данных от них минимальна, то такую модель можно брать в качестве эталона. По крайней мере, пока не появится более точная модель.

**Определение 4.** *Эвакуация* – процесс организованного самостоятельного движения людей в безопасную зону.

**Определение 5.** Под *агентом* в данной работе будем понимать человека, который эвакуируется.

## §1. Критерии

Два разных подхода к моделированию процесса эвакуации повлекли за собой создание двух крупных основанных на них групп моделей – агентных и потоковых. Для сравнения их между собой нужно выделить общие для обеих групп критерии. Так как большее количество данных натуральных наблюдений было собрано в критериях потоков, то имеет смысл собирать данные для агентных моделей в виде данных потоковых моделей.

Основные параметры потока согласно [2,с.15]:

- количество людей в потоке  $n$  (чел),
- плотность  $D$  ( $m^2/m^2$ ),
- скорость  $V$  (м/мин),
- величина потока  $PV$ .

Люди определяют плотность потока, поэтому их можно рассматривать в плотности. Величина потока может быть выражена через скорость и плотность. Поэтому основными параметрами, описывающими поток, являются его **плотность** и **скорость**. Определим области их значений.

Плотность  $D \in R$ , граничные значения – минимум  $D_{\min}$  и максимум  $D_{\max}$ .

$D_{\min}$  можно определить исходя из значения плотности, принимаемого для разграничения двух видов движения людей – индивидуального и поточного. Имеет смысл рассматривать их отдельно, так как иначе теряются свойства потока. Данные приведены в таблице 1. Граница разграничения - плотность  $0,05 \text{ м}^2/\text{м}^2$ .

$D_{\max}$  определяется из физического предела плотности потока [4], который составляет 14 чел./ $\text{м}^2$  при средней площади горизонтальной проекции людей  $0,09 \text{ м}^2$ , т.е.  $1,12\text{-}1,13 \text{ м}^2/\text{м}^2$ . При этом площадь уменьшается примерно на 15% за счёт деформирования при сжатии. Так как при натуральных наблюдениях максимальное значение плотности не превышает  $0,92 \text{ м}^2/\text{м}^2$ , то это значение может быть взято в качестве максимального.

**Таблица 1.** Вид движения людей в интервалах плотности потоков [5]

Значение плотности, $\text{м}^2/\text{м}^2$	0-0,05	0,05-0,15	0,15-0,4	0,4-0,7	0,7-0,9	0,9-1,0	1,0-1,15
Вид движения людей	индивидуальное	поточное					
	свободное	свободное	без контактных помех	с контактными помехами	с силовыми воздействиями		
					слипное	деформация тел	сдавливание тел

Скорость  $V \in R$ , граничные значения – минимальное  $V_{\min}$  и максимальное  $V_{\max}$ .

Очевидно, что минимальное значение не может быть отрицательным и, в процессе движения, люди могут стоять на месте (например, в случае высокой плотности потока). Поэтому примем  $V_{\min} = 0$ .

$V_{\max}$  можно определить исходя из данных натуральных наблюдений. В случае повышенной активности человека при движении по горизонтальной поверхности скорость свободного движения может принимать значения до 120 м/мин. Но в некоторых случаях максимальная скорость движения может превышать это значение (например, при опосредованном движении). В общем случае, очевидно, что скорость человека не превысит скорости света в свободном пространстве. Поэтому будем считать, что  $V_{\max} \leq C \approx 18 \cdot 10^9$  м/мин.

Учитывая, что функция распределения плотности вероятностей скорости, при каждом фиксированном значении плотности потока, симметрична относительно своего математического ожидания скорости  $V_m$  и имеет нижнюю границу  $V_{\min}$ , в качестве верхней границы можно взять  $V_{\max} = 2 \cdot V_m - V_{\min}$ . Для эталонной функции  $p_{st}(d, v)$  положим математическое ожидание скорости потока  $v_{st}(d)$  и дисперсию  $\sigma_{st}(d)$ . Эталонная функция имеет вид:

$$p_{st}(d, v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma_{st}^2(d)}} \cdot \text{Exp}\left(-\frac{(v - v_{st}(d))^2}{2 \cdot \sigma_{st}^2(d)}\right), \text{ где}$$

$$v_{st}(d) = \begin{cases} V_{0,k} \cdot (1 - a_k \ln(d / D_{0,k})) \cdot M, & D_{0,k} \leq d \leq D_{\max} \\ V_{0,k}, & D_{\min} \leq d < D_{0,k} \end{cases}$$

$$\sigma_{st}(d) = \sigma(V_{0,k}) \cdot (1 - a_k \ln(d / D_{0,k})).$$

Коэффициенты  $V_{0,k}, D_{0,k}, a_k, M, \sigma(V_{0,k})$  берутся из таблиц 2 и 4, приведённых ниже, в разделе «сравнение с нормами». Там же объясняется их физический смысл.

## §2. Сравнение. Алгоритм сравнения

Для сравнения моделей выбираются общие условия, главным образом это один вид пути – горизонтальная плоскость. Для более точного сравнения можно провести расчёты для всех видов путей. Валидность модели устанавливается для каждого из видов путей по отдельности.

Можно ввести уровень валидности  $\alpha$ , который определяет максимально допустимый процент отклонения от эталонных параметров. Он устанавливается исходя из требований точности. Для общего случая можно взять 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

Определим  $Q$ , как область пространства  $R^2$ , такую, что:

$$\forall q \in Q, q = (d_q, v_q),$$

где  $d_q \in D_q = [D_{\min}; D_{\max}]$ ,  $v_q \in V_q = [V_{\min}; V_{\max}]$ .

Функция  $p(d, v)$  с областью определения  $Q$  принимает свои значения в  $[0; +\infty)$ . Так как

$$0 \leq \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} p(d, v) \cdot dv \leq \int_0^C p(d, v) \cdot dv = 1,$$

то двойной интеграл

$$\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} p(d, v) \cdot dv \cdot dd \leq \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} 1 \cdot dd = D_{\max} - D_{\min}, \text{ т.е. конечен.}$$

Сравнение двух моделей по критериям плотности потока и его скорости происходит следующим образом. Сравняются две функции  $p_1(d, v)$  и  $p_2(d, v)$ , каждая соответствует своей модели и отражает вероятность модели движения принимать значения плотности потока  $d$  и скорости потока  $v$ .

Функции для сравнения могут быть представлены как в классическом непрерывном виде, так и в виде набора данных эксперимента. Если сравнение идёт с эталонной функцией (валидация), то  $p_1 \equiv p_{st}$ . Если в сравнении присутствует набор данных, то в  $Q$  строится сетка, в общем случае прямоугольная. Для каждого элемента сетки рассчитывается плотность вероятности, по общему количеству точек, попавших в элемент и по общей плотности вероятности. Если обе функции заданы в виде непрерывных, то интегрирование можно проводить сразу по всей области определения (при дополнительном условии совпадения их для обеих функций).

В общем виде,

$$p_{1\Delta} = \int_{\Delta_i d} \int_{\Delta_j v} p_1(d, v) \cdot dv \cdot dd, \text{ где}$$

$$\Delta_i d = [d_{i-1}; d_i] - \text{отрезок в } [D_{\min}; D_{\max}], \text{ где}$$

$$d_0 = D_{\min} \text{ и } d_{i_{\max}} = D_{\max}, i = 1..i_{\max}, i_{\max} - \text{размерность сетки по } d,$$

аналогично –

$\Delta_j v = [v_{j-1}; v_j]$  - отрезок в  $[V_{\min}; V_{\max}]$ , где  
 $v_0 = V_{\min}$  и  $v_{j_{\max}} = V_{\max}$ ,  $j = 1..j_{\max}$ ,  $j_{\max}$  - размерность сетки по  $v$ .

В виде данных эксперимента (набор точек в области определения),

$$p_{2\Delta} = \frac{k_{\Delta}}{n} P, \text{ где}$$

$n$  - количество точек в эксперименте,

$k_{\Delta}$  - количество точек, попавших в элемент сетки  $\Delta$ ,

$P = 1 \times \Delta D$  - полная плотность вероятности по области определения  $Q$ , где

$$\Delta D = D_{\max} - D_{\min}.$$

Введём  $L$  - коэффициент валидности модели, отражающий точность соответствия реальному процессу движения при эвакуации в заданных условиях.

$$L_{\Delta} = \text{Min}\{p_{1\Delta}, p_{2\Delta}\}$$

$$L = \sum_{\forall \Delta} L_{\Delta} / P$$

Если  $L \geq 1 - \alpha$  и сравнение было с эталоном, то модель считается валидной. Даже если модель не валидна, коэффициент валидности позволяет оценить степень отклонения от эталона. В случае если  $L = 0$  модель не валидна и не сравнима.

### §3. Сравнение с нормами

Как известно, МГСН 4.19-2005 [6] впервые нормируют связь между параметрами людского потока в виде случайной функции.

Скорость движения людского потока при плотности  $D_i$  на  $i$ -ом отрезке участка пути  $k$ -ого вида - случайная величина  $V_{D,k}$ , имеющая числовые характеристики:

- математическое ожидание (среднее значение):

$$V_{D,k} = V_{0,k} (1 - a_k \ln(D_i / D_{0,k})) M \text{ при } D_i \geq D_{0,k}, \text{ чел./м}^2;$$

- среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma(V_{D,k}) = \sigma(V_{0,k}) (1 - a_k \ln(D_i / D_{0,k})),$$

где  $V_{0,k}$  и  $\sigma(V_{0,k})$  математическое ожидание скорости свободного движения людей в потоке (при  $D_i \leq D_{0,k}$ ) и её среднее квадратичное отклонение, м/мин;

$D_{0,k}$  - предельное значение плотности людского потока, до достижения которого возможно свободное движение людей по  $k$ -ому виду пути (плотность не влияет на скорость движения людей);

$a_k$  - коэффициент адаптации людей к изменениям плотности потока при движении по  $k$ -ому виду пути;

$D_i$  - значение плотности людского потока на  $i$ -ом отрезке участка пути, чел./м<sup>2</sup>;

$M$  - коэффициент влияния проёма.

Значения перечисленных параметров приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Значения параметров

Вид пути, k	$V_{0,k}$ м/мин	$\sigma(V_{0,k})$ м/мин	$D_{0,k}$ чел./м <sup>2</sup>	$a_k$	M
Горизонтальный в здании	100	5	0,51	0,295	1
Горизонтальный вне здания	100	5	0,70	0,407	1
Проём*	100	5	0,65	0,295	1,25 – 0,05 D, при $D \geq 5$ чел./м <sup>2</sup>
Лестница вниз**	100(80)	5	0,89	0,400	1
Лестница вверх	60	2,5	0,67	0,305	1

\*При  $D = 9$  чел./м<sup>2</sup> значения  $V_i D_{i,k} = q_i$  определяются по формуле  $q_i = 10(3,75 + 2,5b_i)$ , чел. м/мин,

где  $b_i$  – ширина проёма;

\*\*100 м/мин – при длине пути эвакуации по лестнице не более 50 м, 80 м/мин – более 50 м.

Для маломобильных групп людей [7].

**Таблица 3.** Характеристика групп мобильности

Группа мобильности	Характеристика людей в группе	Площадь горизонтальной проекции человека, м <sup>2</sup>
M1	Люди, не имеющие ограничений по мобильности, в том числе с дефектами слуха	0,1
M2	Немощные люди, мобильность которых снижена из-за старения организма (инвалиды по старости); инвалиды на протезах; инвалиды с недостатками зрения, пользующиеся белой тростью; люди с психическими отклонениями	0,2
M3	Инвалиды, использующие при движении дополнительные опоры (костыли, палки)	0,3
M4	Инвалиды, передвигающиеся на креслах-колясках, приводимых в движение вручную	0,96

**Таблица 4.** Значения параметров уравнения скорости движения для маломобильных групп людей по видам пути

Группы мобильности	Значения параметра	Величина параметров по видам пути (j)				
		горизонтальный	лестница вниз	лестница вверх	пандус вниз	пандус вверх
M1	$V_{0,j}$	100	100	60	115	80
	$D_{0,j}$	0,051	0,089	0,067	0,171	0,107
	$a_j$	0,295	0,400	0,305	0,399	0,399
M2	$V_{0,j}$	30	30	20	45	25
	$D_{0,j}$	0,135	0,139	0,126	0,171	0,146
	$a_j$	0,335	0,346	0,348	0,438	0,384
M3	$V_{0,j}$	70	20	25	105	55
	$D_{0,i}$	0,102	0,208	0,120	0,122	0,136

	$a_j$	0,350	0,454	0,347	0,416	0,446
M4	$V_{0,j}$	60	-	-	115	40
	$D_{0,j}$	0,135	-	-	0,146	0,150
	$a_j$	0,400	-	-	0,424	0,420

Проведённые исследования [8, 9] показали, что изменение скорости движения маломобильных людей в зависимости от плотности имеет те же закономерности, что и описываемые ранее.

#### **Заключение.**

В процессе исследования различных моделей эвакуации были найдены критерии оценки их эффективности, в том числе на основе закономерностей, наблюдаемых в реальных толпах. Данные критерии позволяют сравнить несколько моделей между собой с целью изучения их расхождения с реальными толпами.

Следует также добавить, что любая механическая модель движения людей (толпы людей), в которой проявляются вышеописанные критерии и которая им соответствует, всё же является приближением к реальности и не передаёт социальных свойств толпы и отдельного человека. Поэтому нельзя говорить о возможности полного сравнения моделей, используя только описанные в статье методы. Тем не менее, они позволяют провести валидацию модели, по крайней мере, в первом приближении.

На основании описанного в работе подхода построен валидатор моделей эвакуации, который может быть использован для валидации выбранной модели и сравнения моделей между собой с точки зрения точности соответствия реальному процессу эвакуации. С помощью данного инструмента планируется оценивать пополняемый комплекс моделей портала [www.rintd.ru](http://www.rintd.ru).

#### **Список литературы**

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978.
2. Холщевников В.В., Самошин Д.А. Эвакуация и поведение людей при пожарах: Учеб. Пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 212 с.
3. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania. ASTM E 1355-04, Standard Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Deterministic Fire Models, 2004.
4. Копылов В.А. Исследование параметров движения людей при вынужденной эвакуации: Дис. канд. техн. наук. (науч. рук. Предтеченский В.М., Ройтман М.Я.). – М.: МИСИ, 1974.
5. Предтеченский В.М., Милинский А.И. Проектирование зданий с учётом организации движения людских потоков. – М.: Изд. лит. по строительству, 1969; Berlin, 1971; Koln, 1971; Praha, 1972; U.S., New Delhi, 1978. Изд. 2. – М.: Стройиздат, 1979.
6. МГСН 4.19-2005. Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москве.
7. СНиП 35-01-2001. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения.
8. Кирюханцев Е.Е., Холщевников В.В., Шурин Е.Т. Первые экспериментальные исследования движения инвалидов в общем потоке: Сб. Безопасность людей при пожарах. – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1999.
9. Шурин Е.Т., Апаков А.В. Выделение групп населения по мобильным качествам и индивидуальное движение в людском потоке как основа моделирования движения «смешанных» людских потоков при эвакуации: Сб. Проблемы пожарной безопасности в строительстве. – М.: Академия ГПС МВД РФ, 2001. – С. 36-42.