

Интенсивность движения людских и транспортных потоков (обзор)

© В.В. Холщевников^{1, 2}✉, А.П. Парфененко³

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

² Научно-исследовательский институт — Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы (123317, г. Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13, стр. 1)

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье дано подробное описание понятий интенсивности людского и транспортного потоков. Значения интенсивности движения соответствуют пропускной способности пути шириной 1 м. Также дано описание плотности и скорости потока, определяющих интенсивность движения. Показано, что плотность потока — это технический параметр, характеризующий свободу движения людей в потоке. Влияние состояния людей на скорость движения людского потока определяется с помощью коэффициентов условий движения. Чтобы подчеркнуть различие областей применения этих понятий при разработке методологии оптимизации коммуникационных путей, в статье были рассмотрены показатели величина людского потока и пропускная способность сечения пути, зависящие от ширины потока и ширины сечения пути. В теории людских потоков на основании статистического анализа эмпирических данных были установлены закономерности связи между параметрами людского потока, основанные на законах психофизики, математические ожидания которых описаны элементарной случайной функцией, т.е. людской поток — стохастический процесс.

Предмет исследования. Интенсивность движения людского и транспортного потоков в зависимости от различных параметров.

Цели. Показать и выполнить поиск объяснений в различиях между интенсивностями людского и транспортного потоков.

Материалы и методы. Сбор и анализ научной литературы в области движения людских и транспортных потоков.

Результаты. Показано, что транспортный поток является самостоятельной системой и определяется неопределенностью, конечностью и зависимостью расстояния от времени. Величиной, связывающей все параметры, характеризующие процесс движения людей, является пропускная способность пути, а интенсивность движения определяется как произведение плотности и скорости потока.

Выводы. Установленная зависимость между параметрами людского потока легла в основу нормирования размеров эвакуационных путей и выходов в зданиях различного назначения. В современной методологии при оценке расчетных величин пожарного риска установленные закономерности использованы для моделирования процесса эвакуации людей при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений, а результаты многолетних исследований послужили основой формирования статистической базы данных при разработке строительных норм и правил.

Ключевые слова: модель; схема тела; закономерность; участок пути; пропускная способность, величина потока; вероятность

Для цитирования: Холщевников В.В., Парфененко А.П. Интенсивность движения людских и транспортных потоков // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 4. С. 48–64. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.48-64

✉ Холщевников Валерий Васильевич, e-mail: reglament2004@mail.ru

The intensity of human flows and traffic streams (a review)

© Valeriy V. Kholshchevnikov^{1, 2}✉, Aleksander P. Parfenenko³

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

² Scientific Research Institute — Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Antonova-Ovseenko St., 13, Bldg. 1, Moscow, 123317, Russian Federation)

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The article offers a detailed description of the notions of intensity of human flows and traffic streams. The values of their intensity are determined by the capacity of a road that is one meter wide. The article also offers a description of the flow/stream density and speed that determine their intensity. The co-authors have demonstrated that the flow/stream density is a technical parameter that characterizes the mobility of humans in a flow. The influence of people on the human flow speed is identified with the help of coefficients of motion conditions. To distinguish between the areas of application of these two notions in the process of developing a route optimization methodology, the co-authors addressed the properties of human flows and the road section capacity that depend on the flow width and the road section width. The theory of human flows employs the statistical analysis of human flows to identify the relationship between the parameters of a human flow, based on regularities of psychophysics, and its mathematical anticipations are described by an elementary stochastic function, which means that a human flow is a stochastic process.

Subject of research. The intensity of interdependent human flows and traffic streams.

Goals. The purpose of the article is to identify and demonstrate explanations of differences between the intensity of human flows and traffic streams.

Materials and methods. Collecting and analyzing the research literature focused on human flows and traffic streams.

Results. The co-authors have shown that a traffic stream is an independent system that is determined by uncertainty, finitude, and dependence of distance on time. The value, that ties all the parameters, that characterize the process of human motion, is the road capacity, while the motion intensity is defined as the product of density times speed.

Conclusions. The identified dependence between the human flow parameters serves as the basis for standardizing different escape routes and exists from buildings performing different functions. The currently used methodology applies the regularities thus identified to simulate human evacuation processes in the course of design and operation of buildings and structures in order to assess the value of the fire risk, while the results of multiannual research projects are contributed to statistical databases used to develop construction rules and regulations.

Keywords: model; body scheme; regularity; route section; capacity; flow size; probability

For citation: Kholshchevnikov V.V., Parfenenko A.P. The intensity of human flows and traffic streams (a review). *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(4):48-64. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.48-64 (rus).

✉ Valeriy Vasilyevich Kholshchevnikov, e-mail: reglament2004@mail.ru

Предисловие

Осенью прошлого года один из авторов настоящей статьи получил следующее предложение: «Dear V.V. Kholshchevnikov, Special Issue on “Traffic Engineering” for You...», которое в переводе на русский язык звучит таким образом: «Дорогой В.В. Холшевников, специальный выпуск на «транспортной разработке» для Вас...».

Адресат был тронут таким вниманием прежде всего потому, что, являясь автором довольно многочисленных публикаций в широкой печати по теории людских потоков, а также автором открытия закономерностей связи между их параметрами, он никогда не акцентировал своего внимания на транспортных потоках.

Из этого следует, что прежде, чем сделать такое предложение, его авторы, по-видимому, должны были углубиться в теоретические рассуждения адресата, в ходе которых он обращался к математической теории транспортных потоков, но вроде бы никогда не использовал прямой аналогии с ними. По его мнению, это было бы некорректно. Правда, до тех пор, пока второму автору настоящей статьи не удалось открыть основополагающую для теории людских потоков роль модели схемы тела человека. Однако эта модель представляет собой лишь психо-

физиологический коррелят системного принципа — согласованного оптимума, которым пользуется организм теплокровного животного для выживания в окружающей среде и который был использован при установлении закономерностей движения людских потоков.

После сделанного предложения авторам настоящей статьи и самим стало весьма интересно выяснить, как же повлияли положения математической теории транспортных потоков на практику нормирования людских и транспортных потоков.

Результатом этих изысканий и стала настоящая статья.

К истории вопроса

Понятие «интенсивность движения» применительно к людским потокам впервые было введено В.М. Предтеченским [1] при описании вариантов изменения значений параметров потока в результате его перехода через границу смежных участков пути: с участка i , имеющего ширину δ_{ij} , на участок $i + 1$ шириной $\delta_{(i+1)j}$ того же (j -го) или иного вида пути (рис. 1).

Согласно [1], величиной, связывающей все параметры, характеризующие процесс движения, т.е. ширину δ (м) и длину l (м) пути, плотность потока

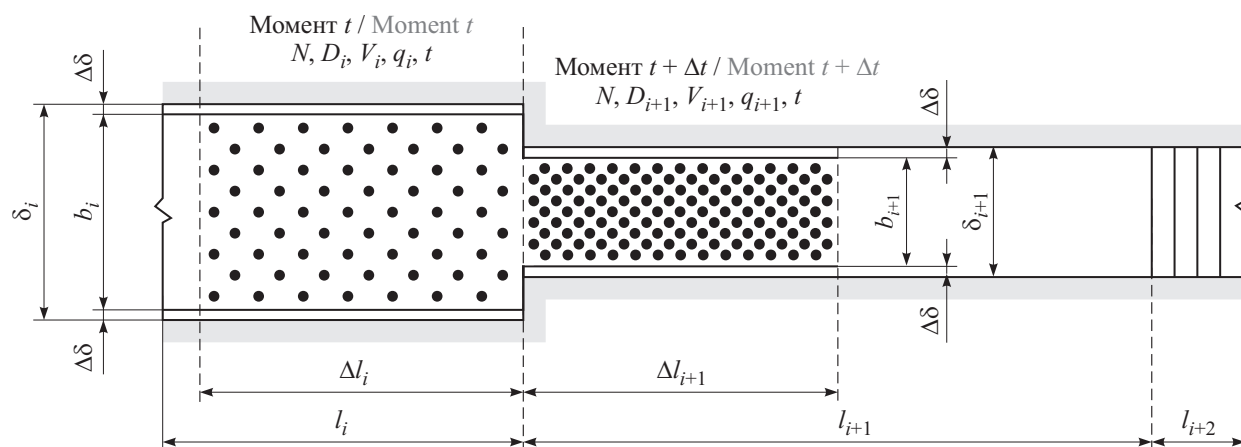


Рис. 1. Переход людского потока через границу смежных участков пути

Fig. 1. A human flow trespassing the boundary between adjacent route sections

D ($\text{м}^2/\text{м}^2$) и скорость его движения V ($\text{м}/\text{мин}$), является **пропускная способность пути** Q ($\text{м}^2/\text{мин}$). Пропускной способностью пути или его элемента (горизонтального участка, проема или лестницы) называется количество людей, проходящих в единицу времени через **сечение** элемента пути:

$$Q = DV\delta, \quad (1)$$

где D — плотность потока, выраженная площадью, занимаемой людьми, отнесенной к единице площади пути, $\text{м}^2/\text{м}^2$.

Пропускная способность элемента пути, отнесенная к единице его ширины, может быть названа **удельной пропускной способностью** q ($\text{м}/\text{мин}$):

$$q = DV. \quad (2)$$

В результате сопоставительного анализа рассмотренных вариантов было установлено, что имеет место пропорциональная зависимость между шириной смежных элементов пути и удельными пропускными способностями:

$$q_{i+1}\delta_{i+1} = q_i\delta_i,$$

а не плотностями, как принято в рекомендациях ЦНИИПО [1].

В соответствии с [2] интенсивность движения q определяется как **произведение плотности и скорости**:

$$q = DV,$$

так как значения q , не зависящие от ширины пути, характеризуют кинетику процесса движения людского потока. Значения интенсивности движения соответствуют пропускной способности пути шириной 1 м [2].

Ссылка на кинетику не компенсирует отсутствия содержательного объяснения данного параметра людского потока. Поскольку слово «кинетика»

происходит от греческого *kinetikos* — «приводящий в движение», вместо объяснения имеем фактически тавтологию.

Поиск объяснений

Поиск содержательного объяснения заставляет обратиться к рассмотрению параметров, которые определяют интенсивность движения. Это — плотность D и скорость V потока.

Плотность потока — технический параметр, характеризующий свободу движения людей в потоке. Впервые этот параметр встречается в исследованиях Института архитектуры Всероссийской академии художеств, описанных С.В. Беляевым: «...при массовой эвакуации плотность потока служит тем основным признаком, от которого зависят пропускная способность и скорость эвакуационного движения, а в связи с этими данными и время эвакуации» [3, с. 21].

При описании структуры людского потока в виде движения рядов «людей одного за другим» («элементарных потоков» [4, с. 6]) С.В. Беляев отметил, что «скорость движения... зависит от плотности эвакуационного потока или от величины участка, приходящегося на одного человека по длине потока» (рис. 2) [3, с. 20].

«Скорость движения в минуту определяется произведением числа шагов на амплитуду шага. ... Амплитуда шага **при свободной ходьбе, не нога в ногу**, связана с величиной участка по длине потока и выражается разностью между этой величиной и длиной ступни, составляющей в среднем 0,25 м» [2, с. 20].

«Переходя к вопросу о **пропускной способности**, следует иметь в виду, что последняя **представляет собой частное от деления скорости движения на среднюю длину участка, приходящегося на одного человека**, и поэтому величина ее зависит

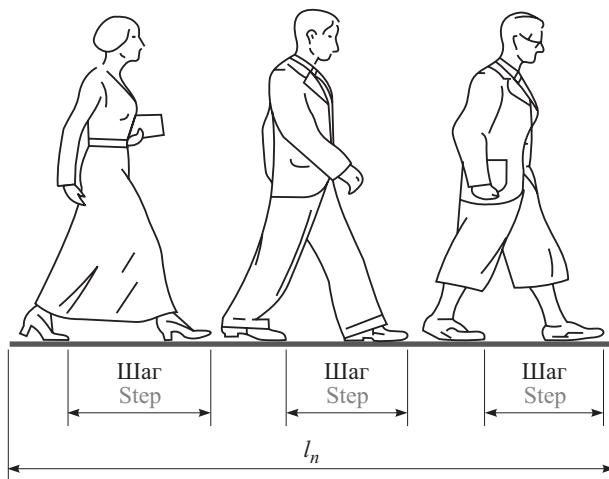


Рис. 2. Участок длиной l_n , занимаемый эвакуационным (элементарным) потоком [3, рис. 22]

Fig. 2. The route section that has length l_n , occupied by the evacuation (elementary) flow [3, Fig. 22]

в каждом конкретном случае от двух указанных величин» [4, с. 11].

По мнению С.В. Беляева, «с большей наглядностью та же зависимость может быть выражена в графической форме» [3, с. 22]. На рис. 3 приведен использовавшийся им на первых этапах исследований график влияния плотности потока на скорость его движения. Такое выражение плотности, как на графике, было названо В.М. Предтеченским [1] **линейной плотностью людских потоков** D_l (м/чел.):

$$D_l = l_n / N. \quad (3) \quad \text{где } D_f \text{ — плотность потока, м}^2/\text{м}^2;$$

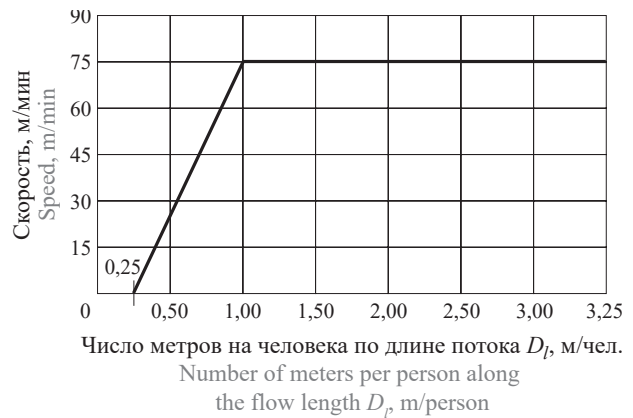


Рис. 3. Влияние плотности эвакуационного потока на скорость его движения [3, рис. 22]

Fig. 3. The influence of the density of an evacuation flow on its speed [3, Fig. 22]

где l_n — длина участка, занимаемого потоком, м;
 N — количество человек в потоке.

Аналогичную демонстрацию соотношения между скоростью и плотностью людского потока можно обнаружить и в зарубежных, более поздних, публикациях [5] (рис. 4).

Однако В.М. Предтеченский предпочел иной способ определения плотности потока, использованный к тому времени в многочисленных сериях натурных наблюдений, проведенных ЦНИИПО МВД СССР, и описанный А.И. Милинским [6]:

$$D_f = \sum f / (\delta_n l_n), \quad (4)$$

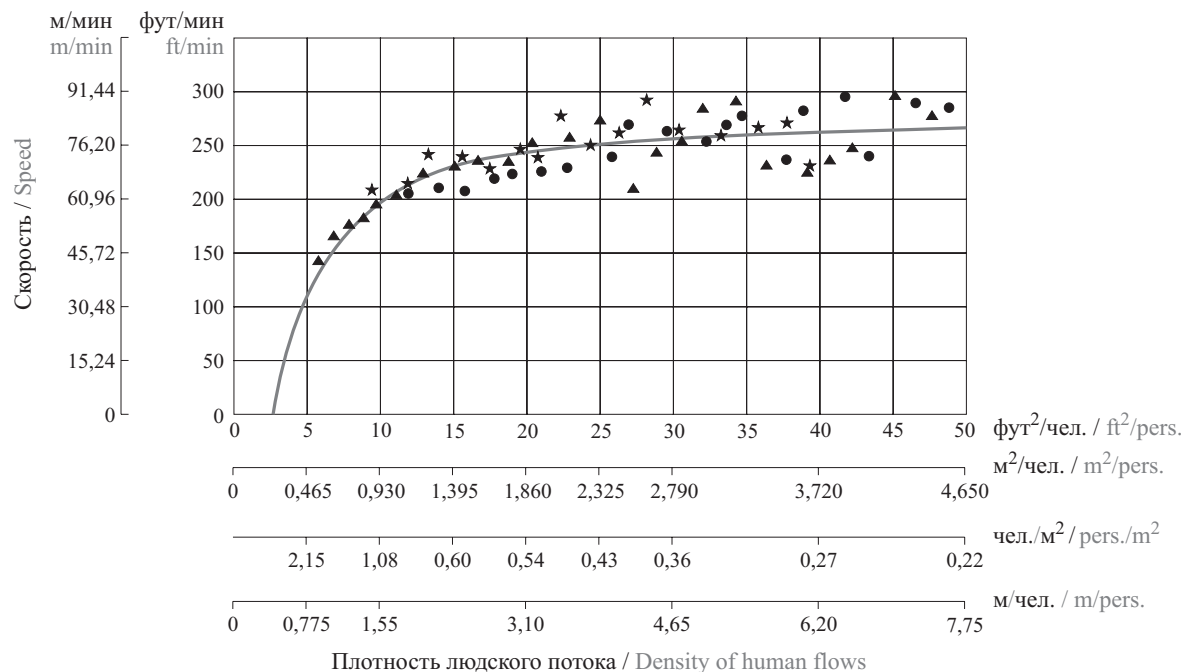


Рис. 4. Соотношение между скоростью и плотностью людского потока по данным J.J. Fruin [5]

Fig. 4. The relationship between the speed and density of a human flow according to J.J. Fruin [5]

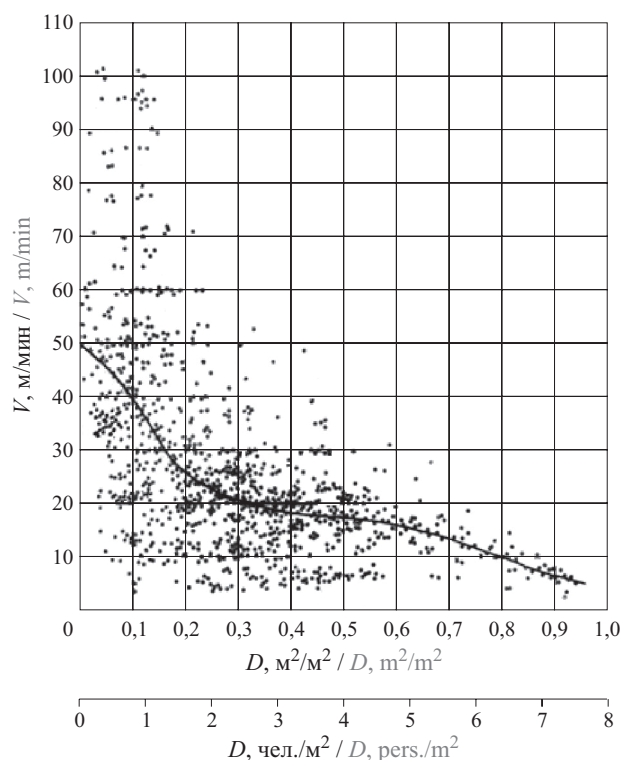


Рис. 5. Результаты 1033 замеров скоростей на горизонтальных путях в театральнo-зрелищных зданиях; кривая построена по средним, определенным простейшим способом — методом медиан [6]

Fig. 5. Results of 1,033 speed measurements taken along the horizontal routes inside theatre buildings; the curve is made on the basis of average values, identified using the simplest method, the method of medians [6]

f — площадь горизонтальной проекции одного человека, м^2 ;

δ_n — ширина людского потока, м .

А.И. Милинский считал, что такое измерение плотности «придает большую точность значению понятия “плотность”» [6, с. 36]. Значение скорости потока V при этом определялось из выражения

$$V = 60l_n / \Delta t, \quad (5)$$

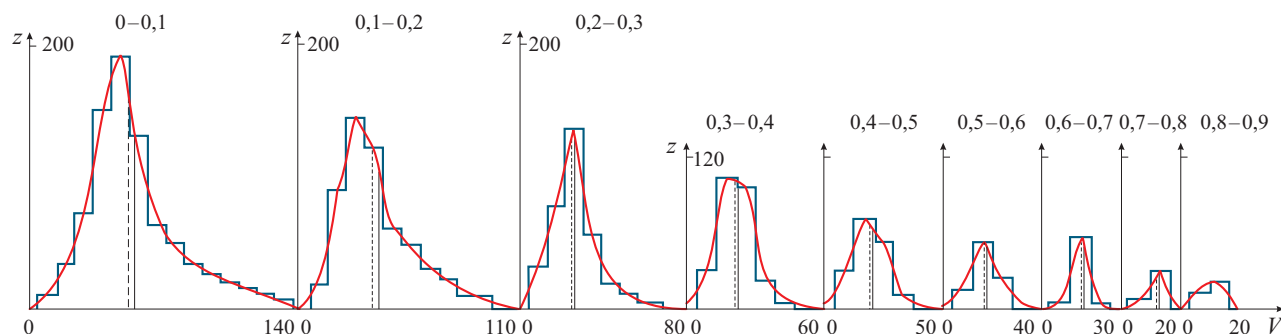


Рис. 6. Гистограммы и полигоны распределения значений скоростей движения в интервалах плотности, полученных визуальным методом наблюдений на горизонтальных путях [2]

Fig. 6. Histograms and polygons of the speed value distribution over density intervals, obtained using the method of visual observation of horizontal routes [2]

где Δt — интервал времени прохождения участка l_n при проведении натурных наблюдений визуальным методом, с.

Приняв эту методологию, В.М. Предтеченский вынужден был устанавливать математический вид зависимостей $V = \varphi(D_f)$ в анализируемых сериях натурных наблюдений, чего не было сделано ни в работе С.В. Беляева [4], ни в работе А.И. Милинского [6] (рис. 5 и 6).

Стремясь учесть результаты всех известных к тому времени натурных наблюдений, В.М. Предтеченский выводит формулу соотношения между D_f и D_l :

$$D_f = f(0,6D_l) \quad (6)$$

и на ее основе строит графики зависимости удельной пропускной способности сечения пути от плотности потока (рис. 7).

Руководствуясь стремлением «перейти к математической зависимости» скоростей движения по горизонтальным путям, В.М. Предтеченский выбирает «некоторую среднюю кривую», описываемую уравнением вида:

$$Y = a(b + x)^{-n}. \quad (7)$$

В целях большей «непогрешимости» аппроксимации эмпирических данных связь между ними при движении по горизонтальному пути стала описываться «полиномом наилучшего приближения Чебышева» [7]:

$$V = AD^4 - BD^3 + CD^2 - ED + 57; 0,00 \leq D \leq 0,92. \quad (8)$$

Принимая его в качестве основного, выражающего зависимость скорости от плотности, и введя эмпирические коэффициенты m_j , которые учитывают влияние на скорость движения вида пути, получают зависимости для других видов путей:

$$V_j = Vm_j. \quad (9)$$

Влияние **состояния** людей на скорость движения людского потока определяется с помощью

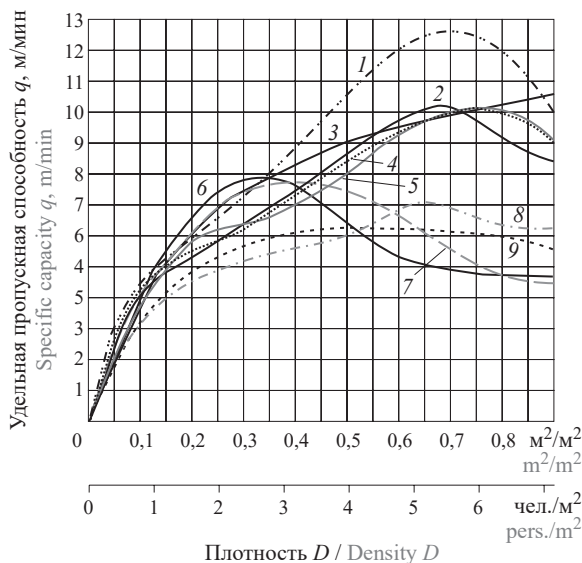


Рис. 7. Удельная пропускная способность участка пути [1, рис. 2]: 1 — по экспериментальным данным, полученным на горизонтальных путях в промышленных зданиях (498 замеров); 2 — то же, в зданиях различного назначения (2804 замера); 3 — теоретическая при скоростях, принятых по выражению $V = 13,5(0,25 + D)^{-1}$; 4 — при скоростях, принятых по данным ВАХ; 5 — теоретическая при движении по лестнице при подъеме; 6 — по экспериментальным данным, полученным при движении по лестнице при спуске; 7 — теоретическая при движении по лестнице при спуске; 8 — по экспериментальным данным, полученным при движении по лестнице при подъеме; 9 — теоретическая при подъеме по лестнице при скоростях, принятых по выражению $V_{\text{пл}} = 42,5(1 + D_{\text{пл}})^{-3}$

Fig. 7. Specific capacity of a route section [1, Fig. 2]: 1 — representing the experimental data of the horizontal routes in industrial buildings (498 measurements); 2 — the same, in buildings performing different functions (2,804 measurements); 3 — the theoretical capacity obtained for the speed values that are calculated as follows: $V = 13.5(0.25 + D)^{-1}$; 4 — for the speed values, identified on the basis of the data provided by emergency evacuation sensors; 5 — theoretically identified for the motion up the stairs; 6 — experimentally identified for the motion down the stairs; 7 — theoretically identified for the motion down the stairs; 8 — experimentally identified for the motion up the stairs; 9 — theoretically identified for the motion up the stairs if the speed values are found as follows: $V_{\text{human flow}} = 42.5(1 + D_{\text{human flow}})^{-3}$

коэффициентов условий движения μ : «для нормальных условий движения $\mu = 1$; для аварийных $\mu_a > 1$; для комфортных $\mu_k < 1$. Численные значения коэффициента μ_a определяются путем экстраполяции параметров движения людских потоков, полученных для нормальных условиях ... или в результате натурных наблюдений за движением искусственно созданных потоков» [7, с. 64].

Однако, что дают установленные таким образом зависимости? Вы получаете значения **удельной пропускной способности** (т.е. единицы ширины элемента пути), а не **интенсивности** движения людского потока. Это — характеристики различных предметов исследований!

Чтобы это было более очевидно, достаточно сопроводить графические построения С.В. Беляева соответствующими им математическими соотношениями. Тогда, если пропускную способность элементарного потока обозначить через $Q_{\text{э.п.}}$, получим:

$$Q_{\text{э.п.}} = V/(l_n/N)$$

или с учетом формулы (3)

$$Q_{\text{э.п.}} = V/D_t. \quad (10)$$

Как видно из формулы (10), величина, названная С.В. Беляевым «пропускной способностью потока», не имеет никакого отношения к параметру «пропускная способность»: величина $Q_{\text{э.п.}}$ определяется количеством людей, проходящих в единицу времени **вдоль** пути движения людского потока, а не через **поперечное сечение** пути.

Чтобы подчеркнуть различие областей применения этих понятий при разработке методологии оптимизации коммуникационных путей [8], были введены следующие показатели:

величина людского потока:

$$P = q\delta_n; \quad (11)$$

пропускная способность сечения пути:

$$Q = qb_n, \quad (12)$$

где δ_n — ширина потока, м;

b_n — ширина сечения пути, м.

Смешение этих понятий и в наше время ведет к парадоксам. Так, например, Р. Thompson с коллегами пишут [9]: «...при реальной эвакуации Театра “Эмпайр” в Эдинбурге в 1911 году... предупреждение о пожаре поступило перед началом исполнения государственного гимна. Театр был эвакуирован примерно за время исполнения гимна (пока оркестр продолжал играть), хотя не обошлось без жертв. Важно отметить, что до сих пор этот показатель (150 с) используется в нормативных документах Великобритании¹ в качестве контрольного времени эвакуации людского потока. Такая длительность в сочетании с предполагаемой пропускной способностью потока $1,33 \text{ чел./}(\text{м} \cdot \text{с}) = 80 \text{ чел./}(\text{м} \cdot \text{мин})$ приводит к наиболее часто используемой норме ширины выхода на человека (5 мм/чел.), которая применяется для расчета пропускной способности выхода в соответствии с руководством по проектированию:

$$q = \frac{N_p (\text{чел.})}{\left(\frac{w(\text{м})}{\tau(\text{с})} \right)} \therefore \frac{N_p}{w} = qt = \frac{80}{60} \cdot 150 = 200,$$

$$\therefore \frac{w}{N_p} = \frac{1}{200} = 0,005,$$

где q — поток на единицу ширины, чел./м·с;

N_p — количество людей;

w — ширина выхода, м;

t — общее время, с.

Таким образом, **ширина для «безопасной эвакуации» в расчете на одного человека = 0,005 м (5 мм).**

Это — «стандартное» число ширины выхода 5 мм на человека, позволяющее «безопасно» эвакуироваться, используется в строительных нормах Великобритании¹ и США².

Как видим, механическая подстановка размерностей величин в формулу и их сокращение приводят к потере изначальной сущности определяемой величины: q становится **величиной потока «на единицу ширины»**.

В связи с этим неудивительно, что поиск содержательного объяснения того, что такое «**интенсивность движения q , не зависящая от ширины пути**», продолжался и после публикации работы [1]. Так, во втором издании учебного пособия [10, с. 71] находим: «Произведение плотности и скорости $q = DV$ называется **интенсивностью**, или **количеством, движения...**». Как известно, количество движения — характеристика механического движения. Использование данного термина свидетельствует о попытке авторов доказать, что людской поток — процесс закономерный, как и процессы механического движения.

Дело в том, что в то время в научном сознании господствовали представления, согласно которым, там, где нет строгой однозначности, нельзя говорить об истинной закономерности: в этих случаях мы имеем дело лишь с подходом к истине, но еще не владем самой истиной (парадигма детерминизма). Отсюда возникает понятие «точные науки», объединяющие классическую механику, физику, химию — дисциплины, на базе которых было взращено целое поколение специалистов технического профиля. Для них, по терминологии психологов, происходила ассимиляция новых данных в сложившуюся систему принципов. Как видно, и разработчики феноменологического этапа развития теории людских потоков явно находились под влиянием парадигмы детерминизма и поэтому стремились рассматривать в ее рамках реально наблюдаемую стохастичность процесса движения людского потока.

Одновременно с такой ассимиляцией исследователи [8] стали уделять постоянное внимание процессам, которые в различных областях знаний

(теория вероятностей [11], гидравлика [12], теория массового обслуживания [13], потоки в сетях [14], ежедневные миграционные потоки в городе [15–17]) рассматривали потоки разного содержания. Здесь можно было бы отметить, что определения типа: «**Транспортный поток** — это упорядоченное транспортной сетью движение транспортных средств. Перемещение пассажиров называется **пассажиропотоком**, перемещение грузов — **грузопотоком**, движение пешеходов — **пешеходным потоком**», приведенные в Википедии, никогда не рассматривались ввиду наивности, мягко сказать, позиции, с которой они формулируются. Данные термины и определения всегда требовали содержательной интерпретации понятия «поток» как постоянного движения массы чего-либо.

В связи с этим напомним: «**Людской поток** — одновременное пешеходное движение групп людей по общему пути в одном направлении» [18]. Движение людей в противоположном направлении называется встречным потоком, поперек — пересекающимся.

И вдруг обнаруживается, что «...диаграмма, показывающая изменение интенсивности потока в зависимости от его плотности, называется основной диаграммой транспортного потока» [19, с. 94] (рис. 8).

«Эта диаграмма является характеристикой определенного места в определенный момент времени для определенной совокупности автомобилей. Форма диаграммы может изменяться при возникновении любого из событий: ухудшение видимости в сумерках, неожиданный дождь или даже появление полицейского автомобиля» [19, с. 95].

И далее, «...р рассматривается как величина, **обратная средней длительности промежутка времени между последовательными автомобилями**,



Рис. 8. Основная диаграмма транспортных потоков [19]: ρ — интенсивность потока (число автомобилей в единицу времени); λ — плотность потока (число автомобилей на единицу длины)

Fig. 8. The principal diagram of traffic streams [19]: ρ — stream intensity (the number of vehicles per unit of time); λ — traffic stream density (the number of vehicles per unit of length)

¹ The Building Regulations 2000. Approved Document B: Fire Safety (Vol. 2. Buildings other than dwelling houses). 2006 ed. Department of Communities and Local Government (DCLG), 2007.

² NFPA 101. Code for safety to life from fire in buildings and structures. Washington, DC : U.S. Department of Commerce, 2012.

а λ — как величина, **обратная среднему интервалу между последовательными автомобилями**» при «средней для группы автомобилей скорости m »

$$\rho = m\lambda. \quad (13)$$

Правильная функциональная форма» выражения (13) будет иметь вид

$$\rho(\lambda) = \lambda m(\lambda). \quad (14)$$

Смысл этого соотношения заключается в том, что нужно находить $\rho(\lambda)$ или функцию $m(\lambda)$; после чего по формуле (14) можно определить значение другой функции» [19, с. 93].

Далее Ф. Хейт пишет: «Нам удобнее предположить, что кривая распределения скорости асимптотически приближается к оси, чем принять, что она обрывается в какой-либо определенной точке» [19, с. 94].

Следует отметить, что при написании своей монографии Ф. Хейт методологически очень правильно предварил рассмотрение конкретных моделей движения дискретных объектов по двумерным транспортным сетям рассмотрением трех основных свойств транспортного потока, «которые характеризуют его как самостоятельную систему» [19, с. 88]. Это:

- **неопределенность** (управление объекта самим объектом);
- **конечность** (соизмеримость физических размеров объектов и сетей);
- **зависимость расстояния от времени** (скорость движения не остается постоянной).

Эти свойства характерны и для людского потока.

По мнению Ф. Хейта, при увеличении числа автомобилей скорость их движения обычно уменьшается, а в **случае потока жидкости**, грубо говоря, имеет место обратное явление, когда при сужении потока **скорость увеличивается**.

«Модели, в которых условие конечности игнорируется и транспортный поток рассматривается как **поток телефонных вызовов, нельзя считать достаточно реальными, чтобы их можно было принять в качестве моделей движения транспортных потоков по дорогам**. ...Положения автомобилей в пространстве и во времени, рассматриваемые как стохастические процессы, не являются идентичными. Это объясняется тем, что скорость движения не остается постоянной. В этом смысле транспортный поток резко отличается от других потоков, включая поток радиоактивных частиц, поток телефонных вызовов и другие рекуррентные процессы. Во всех этих случаях оба измерения — время и расстояние — являются конгруэнтными. **Ничего подобного не наблюдается при движении транспортного потока**. При изучении послед-

него нельзя не учитывать изменения скорости» [19, с. 90–91].

Вышесказанное благотворно повлияло на когнитивный диссонанс [18, с. 291], имевший место в среде участников научной школы людских потоков [20] из-за смыслового противоречия применяемых методов детерминированного расчета и вероятностной статистики эмпирических данных натурных наблюдений, используемых для него.

Особое внимание обращает на себя следующее замечание: «Допустим, что три автомобиля преодолели расстояние 8,3 км со скоростями, равными 41, 50 и 83 км/ч. Очевидно, что средняя скорость равна 58 км/ч. Аналогично среднее время движения равно 28/60 ч. Однако эти три значения (8,3 км, 58 км/ч и 28/60 ч) не удовлетворяют равенству

$$(\text{расстояние}) = (\text{скорость}) \times (\text{время}).$$

Причина этого заключается в том, что данное равенство справедливо для средних значений только в том случае, если для скорости берется гармоническое среднее, а для времени — среднее арифметическое, или наоборот» [19, с. 40].

Такое замечание побуждало к **отказу от парадигмы детерминизма** в теории и практике нормирования людских потоков из-за показанной некорректности практических результатов при использовании детерминированных методов расчета. Однако причина, почему именно так нужно проводить расчет, оставалась загадкой для исследователей не только людских, но и транспортных потоков.

Людской поток — стохастический процесс живой системы

Настойчивое стремление основоположников теории людских потоков описывать связь между скоростью и плотностью потоков $V = \phi(D_f)$ в виде детерминированной зависимости (как в механике) базировалось на убеждении, что «...наиболее фундаментальными следует считать исследования ВНИИПО и МИСИ им. В.В. Куйбышева... Последние исследования, проведенные в МИСИ и ВШ МВД СССР, **не дали существенных отклонений** от ранее установленных закономерностей $V = f(D)...$ » [10, с. 58].

Последнее утверждение требовало статистической оценки. Разработанная к тому времени в СССР методология статистического анализа позволяла сделать это в нескольких вариантах. Исходя из влияния на параметры людских потоков многочисленных факторов и изменчивости состава потока в зданиях различного функционального назначения, в которых проводились натурные наблюдения, в качестве метода статистического анализа была ис-

пользована методология оценки однородности выборочных совокупностей [21], т.е. оценка различий средних и дисперсий выборочных совокупностей.

К концу 1970-х годов в России было проведено более 75 серий натурных наблюдений людских потоков, но их результаты оказались разбросанными более чем по трем десяткам диссертационных работ и отчетов НИР. Впервые собрать большинство из них для статистического анализа удалось в ходе разработки новых строительных норм противопожарного проектирования³.

Анализ собранных эмпирических данных показал, что часть выборочных совокупностей содержит логически несостоятельные допущения. Например, в выборки объединялись данные, полученные при различных условиях эксплуатации зданий (например, в утренние часы «пик» и в дневные часы эксплуатации зданий транспортных сооружений). Подобные выборки были исключены из дальнейшего рассмотрения. Оставшиеся 69 серий, содержащие 24,5 тыс. результатов натурных наблюдений, не вселяли уверенности в методической корректности и идентичности статистической обработки данных [21, 22], поскольку многие серии не содержали дисперсий в качестве числовых характеристик выборочных совокупностей (следует отметить, что зарубежные публикации никогда не содержат этих числовых характеристик). Поэтому представленные в этих исследованиях вариационные ряды наблюдаемых значений скоростей движения людей в потоках $V = f(D_j)$ были обработаны по единой методике на ЭВМ ЕС-10-40. Только после этого был проведен анализ однородности выборочных совокупностей на ЭВМ БСМ-6 по специально разработанной программе.

Статистический анализ показал разнонаправленные с методической точки зрения тенденции формирования эмпирической базы данных. Наиболее значительные расхождения обнаружил анализ однородности выборочных совокупностей пар серий: его результаты показали несостоятельность гипотезы о несущественности отклонений между закономерностями $V = f(D_j)$ в рассмотренных сериях натурных наблюдений. «Более того, и средние выборочных совокупностей Милинского А.И. для горизонтальных путей оказались различающимися значимо. Следовательно, не было необходимых статистических оснований для объединения этих выборок в единую совокупность. Отсюда следует некорректность установленных таким образом расчетных зависимостей для горизонтальных путей, что влечет за собой и не-

корректность определяемых по отношению к ним коэффициентов видов пути, условий движения и состава потока» [21, с. 166]. Эти результаты послужили основой для пересмотра методологии формирования статистической базы данных при нормировании эвакуационных путей и выходов [23, 24].

В то же время оказалось довольно много пар серий, в которых средние скорости движения людей во всех наблюдаемых в них интервалах плотности оказались однородными и поэтому могут быть объединены: анализ эффекта объединения выборок показал увеличение точности оценки математических ожиданий скорости в 2–3 раза.

Группировка пар серий достаточно явно отражает влияние условий движения, а точнее сказать, психологического настроя людей на скорость их движения: например, значительно отличаются скорости движения в городском узле в дневные и вечерние часы. При этом обращает на себя внимание тот факт, что в начальном интервале плотности (0–1 чел./м²) выборок с одинаковыми средними и даже дисперсиями гораздо больше, чем в остальных интервалах плотности потока. Поскольку влияние плотности на скорость движения в этом интервале весьма мало, то, вероятно, значения параметров потоков при достаточно близком составе их участников определяются (в основном) психологическим состоянием людей и **могут быть использованы для классификации психологических условий движения людских потоков.**

Необходимо обратить внимание на то, что загадка результатов очень броского примера (13), приведенного Ф. Хейтом [19], остается нераскрытой и требует понимания теории вероятностей (в частности, **законов распределения функций случайных аргументов**) [11], что в то время не входило в учебную программу подготовки инженеров технических вузов.

Поскольку при установлении значений скорости движения людских потоков (так же, как и транспортных потоков) в процессе натурных наблюдений измеряется не сама скорость V , а определяющие ее параметры — расстояние l и время движения t , то существенным оказывается, что t или l является переменной измеряемой величиной. В зависимости от этого функцией случайного аргумента — скорости людей — является либо распределение людей по длине пути $f_i(l)$, либо распределение людей по времени их прихода в определенное сечение пути (сток) $f_i(t)$.

Согласно теории вероятностей, если случайная величина X (аргумент) имеет распределение $f(x)$, а другая величина Y является ее функцией, то плотность распределения $g(y)$ величины Y определяется по формуле

$$g(y) = f(\phi(y)) |\phi^{-1}(y)|, \quad (15)$$

³ СНиП II-2-80. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений : утвержден 18 декабря 1980 г. Госстроем СССР. СНиП II-2-80 заменен 1 января 1987 г. на СНиП 2.01.02–85 «Противопожарные нормы». СНиП 2.01.02-85 заменен СНиП 21-01–97* «Пожарная безопасность зданий и сооружений».

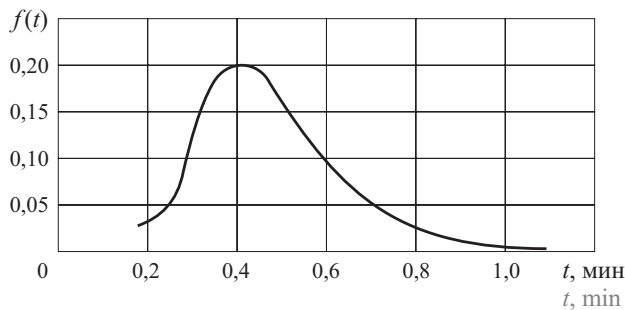


Рис. 9. Пример аппроксимации распределения времени прихода людей в сток — на остановку общественного транспорта [26–28]

Fig. 9. The case of approximate distribution of the time of arrival to a public transport stop [26–28]

где $\phi(y)$ — функция, обратная функции $\phi(x)$, которая существует и имеет производную;

$|\phi^{-1}(y)|$ — модуль производной обратной функции.

В исследованиях людских потоков это правило проявляется, начиная с проведения натурных наблюдений (но мало кто об этом задумывался [25]).

В визуальном методе натурных наблюдений измеряется время Δt прохождения людьми участка пути определенной длины Δl , установленной заранее на определенном расстоянии от источника людского потока. Таким образом, здесь Δl — постоянная величина, а Δt — переменная, которая и является функцией случайной скорости людей в источнике потока (со средним V_{0j}). Тогда величина Δt связана с V зависимостью

$$\Delta t = \Delta l / V, \quad (16)$$

т.е. при постоянном значении Δl она обратно пропорциональна скорости.

Ее производная

$$\phi^{-1}(t) = -l/t^2. \quad (17)$$

Следовательно, при использовании визуального метода функция (15) даст **асимметричный вид**

закона распределения плотности вероятности $f=l(t)$, что мы и видим на рис. 6.

В общем случае для подобных ситуаций имеем распределения, представленные на рис. 9 и 10.

Нам, по-видимому, следует обратить особое внимание на то обстоятельство, что в период, когда была опубликована книга Ф. Хейта [19] (1963–1964 гг.), теория людских потоков [20] еще не имела разработанной методологии натурных наблюдений, обеспечивающей возможность фиксировать изменения параметров потока во времени (в каком-либо сечении пути). Это стало возможным только при применении кинометодов натурных наблюдений [18, гл. 3], поскольку только тогда появилась возможность фиксировать длину участка, которую проходил тот или иной человек за определенный интервал времени Δt . Поэтому в кинометод Δt может быть константой, а Δl — функцией случайного аргумента V , но линейной:

$$\Delta l = \Delta t V. \quad (18)$$

Поскольку $f_i(l)$ является линейной функцией случайного аргумента, она имеет тот же вид закона распределения, что и определяющий ее аргумент V . Как видим, наблюдается симметричный закон распределения плотности вероятностей $g(\Delta l)$, в данном случае распределения людей по длине пути. Поэтому во всех исследованиях, проведенных кинометодом⁴, получены нормальные законы распределения построенных функций $g(\Delta l)$, что свидетельствует и о нормальном законе распределения определяющего его аргумента $f(V)$:

$$f(V) = \frac{1}{S_V \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V-\bar{V})^2}{2S_V^2}}, \quad (19)$$

где $\bar{V}$, S_V — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение скорости движения людей в потоке.

Конкретика требований к моделям, возможным для описания природной сущности транспортного

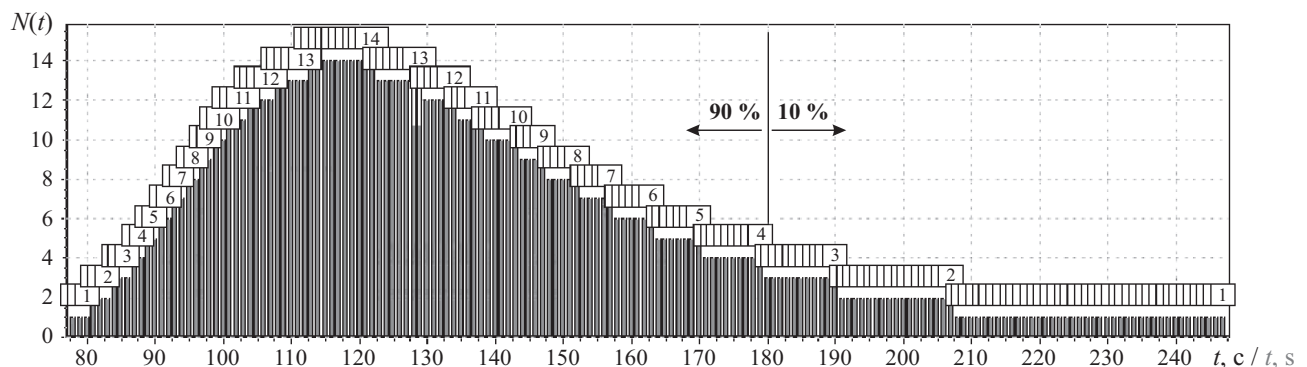


Рис. 10. Гистограмма распределения времени прихода людей на остановку городского транспорта при $l = 200$ м, полученная при расчетах по программе FMT 1.0 [29–31]

Fig. 10. The histogram of distribution of the time of arrival to a public transport stop, if $l = 200$ m, obtained using FMT 1.0 software [29–31]

и людского потоков, в значительной степени стимулировала **описание людского потока как живой системы, вариабельность параметров функционирования которой определяется индивидуализацией свойств ее элементов — людей.** При кажущейся очевидности понятия «живая система» описание ее свойств с общесистемных позиций² [32] прошло многочисленные этапы формирования системного мышления [33–37] в различных областях знаний, включая кибернетику [36, 37].

В теории людских потоков были установлены закономерности связи между параметрами людского потока, основанные на законах психофизики [38, 39], математические ожидания которых описаны элементарной случайной функцией:

$$V_{\Delta Dj} = V_{\Delta 0j} (1 - R_{Dj}), \quad (20)$$

где $V_{\Delta 0j}$ — случайная величина (математическое ожидание скорости свободного движения V_0 людского потока в эмоциональном состоянии по j -му виду пути);

R_{Dj} — неслучайная (функциональная) зависимость от плотности потока;

$$R_{Dj} = a_j \ln(D_i/D_{0j}); \quad (21)$$

a_j — коэффициент, определяющий степень влияния плотности потока при движении по j -му виду пути;

D_i — текущее значение плотности потока;

D_{0j} — пороговое значение плотности потока на участке j -го вида пути, по достижении которого плотность становится фактором, влияющим на скорость движения.

Вид этой зависимости определяет положение значения $q_{\max}$ на оси D , а следовательно, и предельное значение плотности людского потока, при котором обеспечивается беспрепятственность движения по тому или иному виду пути D_j . Поэтому использование величины $q_j = (V_j D_{jj})$ обостряет вопрос о корректности форм математических функций, которые применяются для аппроксимации эмпирических зависимостей $V = f(D)$ — от линейной до полинома четвертого порядка (рис. 11).

С 1980 г. зависимость

$$\bar{V}_{Dj}^{\Delta} = \bar{V}_{0j}^{\Delta} \left(1 - a_j \ln \frac{D_i}{D_{0j}} \right). \quad (22)$$

становится основой для нормирования размеров эвакуационных путей и выходов в зданиях различного назначения. Этот вид функции сохраняется на последовательных этапах поиска принципов гибкого нормирования, от создания обобщенных

q , чел./м·мин
 q , pers./m·min

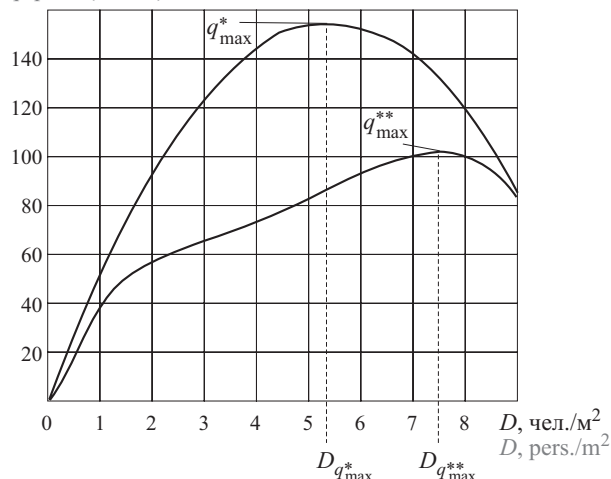


Рис. 11. Графики функции $q = VD$ в зависимости от выражения функции V : $V^* = 57 - 5,256D$; $V^{**} = 112 D^4 - 380D^3 + 434D^2 - 217D + 57$ [2]

Fig. 11. Graphs of function $q = VD$ depending on the expression of function V : $V^* = 57 - 5.256D$; $V^{**} = 112 D^4 - 380D^3 + 434D^2 - 217D + 57$ [2]

по видам зданий строительных норм проектирования⁵ до введения технических регламентов⁶.

Дальнейшие исследования людских потоков, состоящих из крайних возрастных групп людей (людей пожилого возраста и детей дошкольного возраста [40, 41]), выявили **существование психофизиологических коррелятов в виде схемы тела человека**⁷ [42] с присущими ей свойствами распространения на средства действия⁸, являющиеся ее продолжением.

Исследования параметров движения детей с ограниченными возможностями [43] подтвердили факт **распространения модели схемы тела**

⁵ СНиП 2.08.02-89*. Общественные здания и сооружения : утверждены постановлением Государственного строительного комитета СССР от 16 мая 1989 г. № 78.

⁶ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.; Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ принят Государственной Думой 23 декабря 2009 г.; одобрен Советом Федерации 25 декабря 2009 г.; Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : утверждена приказом МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 (далее — Методика № 382).

⁷ Схема тела — психофизиологическая модель собственного тела, формирующаяся в сознании животного на основании сенсорного опыта — синтеза различных ощущений величины, положения и взаимосвязи частей тела.

⁸ Модель схемы тела распространяется и на орудия, предметы, при помощи которых совершаются действия (например, ракетка при игре в теннис, карандаш при рисовании; можно полагать, и средства опоры и передвижения у людей с нарушением опорно-двигательного аппарата).

и на предметы, при помощи которых они выполняют свои действия, в данном случае на кресла-коляски. Это стало еще одним подтверждением того факта, что открытые закономерности связи между параметрами людских потоков опираются на природные психофизиологические свойства людей. Поэтому установленные в ходе исследований закономерности были признаны международным научным сообществом **научным открытием** [44].

В современной методологии нормирования величин пожарного риска (см. Методику № 382) и стандарте строителей России⁹ данные закономерности использованы для упрощенного аналитического и имитационно-стохастического моделирования процесса эвакуации людей.

Таким образом, интеллектуальная поддержка, полученная исследователями людских потоков от профессиональных математиков, занимающихся проблемами моделировании транспортных потоков, позволила им перейти на теоретический уровень познания и широко внедрить новые знания в практику архитектурно-строительного проектирования и противопожарного нормирования эвакуационных путей и выходов — одной из систем противопожарной защиты зданий и сооружений.

Появившаяся возможность корректно фиксировать [25, 45] формирование величины людского потока расширила область наблюдения реальных ситуаций его образования. Наблюдения показали [26], что величину потока следует и рассматривать не как функцию случайной величины, а **как функцию случайного процесса**, величина которого изменяется во времени. Затем стало понятно, что эту функцию можно рассматривать и с более общих позиций как «поток событий» [42], хотя этот поток не является простейшим,

⁹ СТО НОСТРОЙ 2.35.73–2012. Инженерные сети высотных зданий. Системы обеспечения комплексной безопасности высотных зданий и сооружений : утвержден и введен в действие решением Совета Национального объединения строителей, протокол от 22 июня 2012 г. № 30.

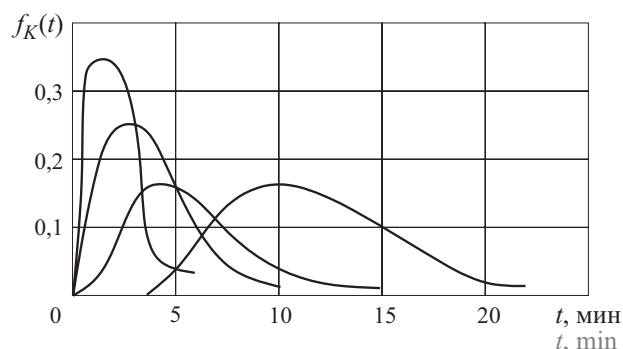


Рис. 12. Пример изменения плотности вероятности распределения Эрланга при изменении его порядка K

Fig. 12. The case demonstrating a change in the density of the probability of the Erlang distribution caused by a change in its order K

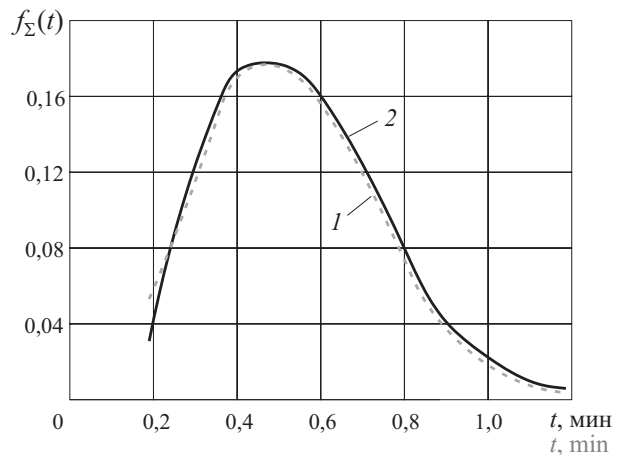


Рис. 13. Аппроксимация наблюдаемого распределения времени прихода людей в сток (1) распределением Эрланга (2)

Fig. 13. The observed approximate distribution of the time of arrival to a bus stop (1) using the Erlang distribution (2)

поскольку он не обладает стационарностью, отсутствием последствия, ординарностью. Однако, если реальный людской поток, формирующийся на городской территории из многих источников, представить как сумму потоков с этими свойствами, то его удастся рассмотреть обобщенно как поток Эрланга того или иного (K -го) порядка [43] (рис. 12).

На рис. 13 приведены графики наблюдаемого распределения времени прихода людей в сечение пути из нескольких источников и распределения, рассчитанного через представление людского потока как потока Эрланга [46]. Анализ результатов расчета движения людских потоков из нескольких источников [47] показывает, что с увеличением расстояния до стока происходит уменьшение влияния расстояния между источниками на характер распределения времени прихода людей в сток. Поэтому при определенных значениях этого расстояния все источники можно заменить одним, расположенным на расстоянии, равном средневзвешенному расстоянию от источников до стока. «Например, расчет на ЭВМ показал, что при $\bar{V} = 60$ м/мин, $S = 12$ м/мин, $K = 4$, $\Delta l = 5$ м и минимальном расстоянии до стока 100 м ($l = 107,5$ м) расхождение между результатами ... не превышает 0,1 %» [48, с. 20].

Поскольку людской поток в стоке близок по свойствам потоку Эрланга, то графики, приведенные на рис. 13, дают представление о характере изменения величины потока и интенсивности движения в различных сечениях пути. На рис. 14 в качестве примера практического использования закона Эрланга представлены графики, описывающие распределение людей, выходящих из нескольких источников, по длине пути в последовательные моменты времени. На графиках наглядно прослеживается процесс растекания потока (увеличение его длины и уменьше-

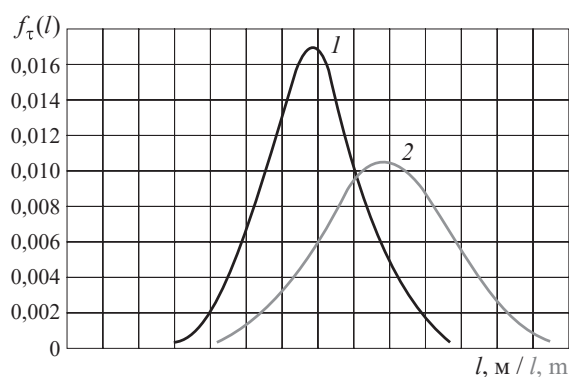


Рис. 14. Пример изменения плотности вероятности распределения людей по длине потока в процессе его свободного движения из источника: 1 — при $t = 1$ мин; 2 — при $t = 2$ мин

Fig. 14. The case of a change in the density of the probability of distribution of persons along the flow length in the process of its free motion, starting from the source: 1 — if $t = 1$ min; 2 — if $t = 2$ min

ние плотности) по мере удаления от источников, хотя время выхода людей из них одинаково.

Таким образом, то, что математики поделились с исследователями людских потоков своими профессиональными знаниями, подтолкнуло последних к интеллектуальным умозаключениям, способствовавшим переходу теории людских потоков на более высокий уровень познания и обеспечившим практику норми-

рования систем противопожарной защиты (эвакуационные пути и выходы) на основе объективных данных о поведении людей в условиях чрезвычайных ситуаций.

А что же имеем сегодня в практике нормирования интенсивности транспортных потоков?

Самым показательным образцом в этой области деятельности является ГОСТ 32965–2014¹⁰. В этом межгосударственном стандарте читаем:

«2.7. интенсивность движения: количество транспортных средств, проходящих через поперечное сечение автомобильной дороги в единицу времени (за сутки или за один час);

2.14. учет интенсивности движения: определение количества различных типов транспортных средств, проходящих в единицу времени через поперечное сечение автомобильной дороги».

Из вышесказанного следует, что мы опять возвращаемся на круги своя, а именно к вопросу: **что характеризует интенсивность движения** — процесс (поток) или путь, на котором он происходит?

¹⁰ ГОСТ 32965–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Методы учета интенсивности движения транспортного потока : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации по переписке (протокол от 20 октября 2014 г. № 71-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Предтеченский В.М. О расчете движения людских потоков в зданиях массового назначения // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1958. № 7.
2. Предтеченский В.М., Милинский А.И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков : учебное пособие. М. : Стройиздат, 1969. 247 с.
3. Беляев С.В. Принципы планировки зал собраний. М. ; Л. : Госстройиздат, 1934. 132 с.
4. Беляев С.В. Эвакуация зданий массового назначения. М. : Изд-во Всес. акад. архитектуры, 1938. 72 с.
5. Fruin J.J. Pedestrian planning and design. New York : Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, Inc., 1971. 206 p.
6. Милинский А.И. Исследование процесса эвакуации зданий массового назначения : дис. ... канд. техн. наук. М., 1951. 178 с.
7. Великовский Л.Б., Гуляницкий Н.Ф., Ильинский В.М., Ковригин С.Д., Кондратенков А.Н., Меньшиков Н.Г. и др. Архитектура гражданских и промышленных зданий. Т. II. Основы проектирования. М. : Стройиздат, 1976. 214 с.
8. Холщевников В.В. Оптимизация путей движения людских потоков. Высотные здания : дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 324 с.
9. Thompson P., Nilsson D., Boyce K., McGrath D. Evacuation models are running out of time // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 78. Pp. 251–261. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.09.004
10. Предтеченский В.М., Милинский А.И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков : учеб. пособие для архит. и строит. специальностей вузов. М. : Стройиздат, 1969. 247 с.
11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Глава 12. Законы распределения функций случайных аргументов. М. : Наука, 1969. С. 263–285.
12. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика : в 2-х ч. М. : Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1963.
13. Khintchine A.Ya. Mathematical methods in the theory of queueing. Griffin's Statistical Monographs and Courses. No. 7. London, 1960. 120 p.

14. Ford L.R., Fulkerson D.R. Flows in networks. Princeton, New Jersey : Princeton University Press, 1962. 194 p. DOI: 10.1515/9781400875184
15. Шелейховский Г.В. Планировка, транспорт, расселение. Харьков, 1934.
16. Давидович В.Г. Количественные закономерности расселения относительно мест работы // Расселение в городах (количественные закономерности) : сб. ст. / под ред. В.Г. Давидовича, О.К. Кудрявцева. М. : Мысль, 1968. 216 с.
17. Merlin Pierre. Methodes quantitatives et espace urbain. Paris, 1973. 190 p.
18. Холщевников В.В. Гносеология людских потоков : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 592 с.
19. Mathematical theories of traffic flow / ed. F.A. Haight. New York, London : Academic Press, 1963. 242 p. DOI: 10.1016/s0076-5392(08)x6020-5
20. Научная школа. Теория людских потоков // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Т. VII. М. : ВНИИТПИ Госстроя России, 2001. С. 96.
21. Холщевников В.В. Статистика зависимостей между параметрами людских потоков // Исследование по основам архитектурного проектирования (функциональные, физико-технические и эстетические проблемы архитектуры) / под ред. Р.М. Дувидзон. Томск : Томский государственный университет, 1983. С. 155–174.
22. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1971. 576 с.
23. Fisher R.A. Statistical methods for research workers. 12th ed., revised. Edinburg : Oliver and Boyd, 1954. 356 p.
24. Холщевников В.В. Исследования людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре : монография. М. : МИПБ МВД России, 1999. 93 с.
25. Холщевников В.В. Влияние методов натурных наблюдений на определение числовых характеристик закона распределения расчетной величины скорости людского потока // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 8. С. 71–80. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20349100>
26. Сапеловская А.А. Формирование транспортных и пешеходных потоков в пересадочных узлах пригородно-городского сообщения : дис. ... канд. техн. наук. М., 1980. 270 с.
27. Холщевников В.В., Хомицкая А.А. Расчет путей движения людских потоков при пересадке и загрузке остановки городского транспорта // Индустриализация строительства. М. : МИСИ, 1981. С. 107–119.
28. Холщевников В.В. Расчет оптимальных вариантов пешеходных путей в городских узлах // На стройках России. 1983. № 3. С. 15–17.
29. Холщевников В.В., Шишов И.А. Моделирование свободного движения людских потоков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 2. С. 89–103. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16387376>
30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614752 от 17.06.2011 г. Программа FMT 1.0 / И.А. Шишов, В.В. Холщевников. М. : Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2011.
31. Холщевников В.В. Моделирование зависимостей между параметрами людских потоков // Исследование по основам архитектурного проектирования (функциональные, физико-технические и эстетические проблемы архитектуры) / под ред. Р.М. Дувидзон. Томск : Томский государственный университет, 1983. С. 36–53.
32. Холщевников В.В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1983. 486 с.
33. Von Bertalanffy L. General system theory — A critical review // General Systems. 1962. Vol. VII. Pp. 1–20.
34. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем // Принципы системной организации функций. М. : Наука, 1973. С. 5–61.
35. Sghrodinger E. What is life? The physical aspect of the living cell. Cambridge : Cambridge University Press, 1967. 178 p.
36. Wiener N. The human use of human beings: cybernetics and society. 2nd ed., revised. NY : Doubleday, 1954. 199 p.
37. Shannon C.E., Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana : University of Illinois Press, 1949. 117 p.
38. Fechner G. Elemente der Psychophysik. 2te Auflagen. Leipzig : Druck und Verlag von Breitkopf und Härtel, 1889.

39. Забродин Ю.М., Лебедев А.Н. Психофизиология и психофизика. М. : Наука, 1977. 288 с.
40. Парфененко А.П. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 153 с.
41. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfyonenko A.P., Belosokhov I.R. Study of children evacuation from pre-school education institutions // *Fire and Materials*. 2012. Vol. 36. No. 5–6. Pp. 349–366. DOI: 10.1002/fam.2152
42. Гурфинкель В.С., Левик Ю.С. Концепция схемы тела и моторный контроль // Интеллектуальные процессы и их моделирование. Организация движений / под ред. А.В. Чернавского. М. : Наука, 1991. С. 59–105.
43. Слюсарев С.В. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам для детей с ограниченными возможностями здоровья в зданиях с их массовым пребыванием : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 189 с.
44. Холицевников В.В. Закономерности связи между параметрами людских потоков : диплом № 24-S на открытие в области социальной психологии // Научные открытия. М. : Российская академия естественных наук, Международная академия авторов научных открытий и изобретений, Международная ассоциация авторов научных открытий, 2005. С. 63–69.
45. Григорьянц Р.Г., Подольный В.П. Графический способ обработки кинокадров движения людских потоков // Известия Северо-Кавказского научного центра. 1975. № 1. С. 17–19.
46. Айбуев З.С.-А. Формирование людских потоков на предзаводских территориях крупных промышленных узлов машиностроительного профиля : дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 292 с.
47. Кисляков В.М., Филиппов В.В., Школяренко И.А. Математическое моделирование и оценка условий движения автомобилей и пешеходов. М. : Транспорт, 1979. 200 с.
48. Холицевников В.В., Никонов С.А., Левин Ю.И. Расчет и моделирование движения людских потоков // Исследование по основам архитектурного проектирования (функциональные, физико-технические и эстетические проблемы архитектуры) / под ред. Р.М. Дувидзон. Томск : Томский государственный университет, 1983. С. 7–28.

REFERENCES

1. Predtechenskiy V.M. On calculation of human flows in general public buildings. *News of higher educational institutions. Construction and Architecture*. 1958; 7. (rus).
2. Predtechenskiy V.M., Milinskiy A.I. *Building design consider the organization of human flows traffic : Manual*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1969; 274. (rus).
3. Belyaev S.V. *Principles of planning a meeting room*. Moscow, Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1934; 132. (rus).
4. Belyaev S.V. *Evacuation of buildings for public use*. Moscow, All-Union Academy of Architecture Publ., 1938; 72. (rus).
5. Fruin J.J. *Pedestrian planning and design*. New York, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, Inc., 1971; 206.
6. Milinskiy A.I. *Research of the evacuation of buildings for public use : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 1951; 178. (rus).
7. Velikovskiy L.B., Gulyanitskiy N.F., Il'inskiy V.M., Kovrigin S.D., Kondratenkov A.N., Men'shikov N.G. et al. *The architecture of civil and industrial buildings. Vol. II. Basics of design*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976; 214. (rus).
8. Kholshchevnikov V.V. *Optimization of the traffic ways of human flows. High-rise buildings : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 1969; 324. (rus).
9. Thompson P., Nilsson D., Boyce K., McGrath D. Evacuation models are running out of time. *Fire Safety Journal*. 2015; 78:251–261. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.09.004
10. Predtechenskiy V.M., Milinskiy A.I. *Building design consider the organization of human flows traffic : Manual for architectural and construction specialties*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1969; 247. (rus).
11. Wentzell E.S. *Probability theory. Chapter 12. Distribution laws of functions of random arguments*. Moscow, Nauka Publ., 1969; 263–285 (rus).
12. Kochin N.E., Kibel I.A., Roze N.V. *Theoretical fluid mechanics : in 2 parts*. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1963. (rus).
13. Khintchine A.Ya. Mathematical methods in the theory of queueing. *Griffin's Statistical Monographs and Courses, No. 7*. London, 1960; 120.

14. Ford L.R., Fulkerson D.R. *Flows in networks*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1962; 194. DOI: 10.1515/9781400875184
15. Sheleikhovskiy G.V. *Planning, transport, resettlement*. Kharkov, 1934. (rus).
16. Davidovich V.G. Quantitative patterns of settlement in relation to places of work. *Settlement in cities (quantitative patterns)*. Davidovich V.G., Kudryavtsev O.K. (eds.). Moscow, Mysl Publ., 1968; 216. (rus).
17. Pierre Merlin. *Methodes quantitatives et espace urbain*. Paris, 1973; 190. (fr).
18. Kholshchevnikov V.V. *Epistemology of human flows : monograph*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2019; 592. (rus).
19. *Mathematical theories of traffic flow*. Haight F.A. (ed.). New York, London, Academic Press, 1963; 242. DOI: 10.1016/s0076-5392(08)x6020-5
20. Scientific school. The theory of human flows. *Russian Architectural and Construction Encyclopedia. Vol. VII*. Moscow, VNIINTPI Gosstroy of Russia, 2001; 96. (rus).
21. Kholshchevnikov V.V. Statistics of dependencies between the parameters of human flows. *Research on the basics of architectural design (functional, physical, technical and aesthetic problems of architecture)*. Duvidzon R.M. (ed.). Tomsk, Tomsk State University Publ., 1983; 155-174. (rus).
22. Mitropolskiy A.K. *Technique of statistical calculations*. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1971; 576. (rus).
23. Fisher R.A. *Statistical methods for research workers*. 12th ed., revised. Edinburg, Oliver and Boyd, 1954; 356.
24. Kholshchevnikov V.V. *Research of human flows and valuation methodology evacuation of people from buildings in case of fire : Monograph*. Moscow, Moscow Institute of Fire Safety of the Ministry of Internal Affairs Publ., 1999; 93. (rus).
25. Kholshchevnikov V.V. The effect of field observation methods on determining numeric characteristics of the law of human flow velocity distribution. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(8):71-80. (rus).
26. Sapelovskaya A.A. *Formation of transport and pedestrian flows in interchange hubs of suburban-urban communication : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 1980; 270. (rus).
27. Kholshchevnikov V.V., Khomitskaya A.A. Calculation of the routes of movement of human flows during transfer and loading of urban transport stops. *Industrialization of construction*. Moscow, Moscow Civil Engineering Institute Publ., 1981; 107-119. (rus).
28. Kholshchevnikov V.V. Calculation of the optimal options for pedestrian paths in urban hubs. *At Construction Sites of Russia*. 1983; 3:15-17. (rus).
29. Kholshchevnikov V.V., Shishov I.A. Modelling of free movement of human flows. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta/Journal of Construction and Architecture*. 2011; 2:89-103. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16387376> (rus).
30. Shishov I.A., Kholshchevnikov V.V. *Certificate of state registration of the computer program No. 2011614752. Program FMT 1.0*. Moscow, Federal Service for Intellectual Property (Rospatent), 2011. (rus).
31. Kholshchevnikov V.V. Modeling the dependencies between the parameters of human flows. *Research on the basics of architectural design (functional, physical, technical and aesthetic problems of architecture)*. Duvidzon R.M. (ed.). Tomsk, Tomsk State University Publ., 1983; 36-53. (rus).
32. Kholshchevnikov V.V. *Human flows in buildings, structures and on the territory of their complexes : dissertation of doctor of technical sciences*. Moscow, 1983; 486. (rus).
33. Von Bertalanffy L. General system theory — A critical review. *General Systems*. 1962; VII:1-20.
34. Anokhin P.K. Principled questions of the general theory of functional systems. *Principles of system organization of functions*. Moscow, Nauka Publ., 1973; 5-61 (rus).
35. Sghrodinger E. *What is life? The physical aspect of the living cell*. Cambridge, Cambridge University Press, 1967; 178.
36. Wiener N. *The human use of human beings: cybernetics and society*. 2nd ed., revised. NY, Doubleday, 1954; 199.
37. Shannon C.E., Weaver W. *The mathematical theory of communication*. Urbana, University of Illinois Press, 1949; 117.
38. Fechner G. *Elemente der Psychophysik*. 2te Auflagen. Leipzig, Druck und Verlag von Breitkopf und Härtel, 1889. (ger).
39. Zabrodin Yu.M., Lebedev A.N. *Psychophysiology and psychophysics*. Moscow, Nauka Publ., 1977; 288. (rus).
40. Parfenenko A.P. *Rationing of fire safety requirements for evacuation paths and exits in buildings of preschool educational institutions : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 2012; 153. (rus).

41. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A., Parfyonenko A.P., Belosokhov I.R. Study of children evacuation from pre-school education institutions. *Fire and Materials*. 2012; 36(5-6):349-366. DOI: 10.1002/fam.2152
42. Gurfinkel V.S., Levik Yu.S. The concept of body patterns and motor control. *Intellectual processes and their modeling. Organization of movements*. Chernavskiy A.V. (ed.). Moscow, Nauka Publ., 1991; 59-105. (rus).
43. Slyusarev S.V. *Rationing of fire safety requirements for evacuation paths and exits for children with disabilities in buildings with massive stay : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 2016; 189. (rus).
44. Kholshchevnikov V.V. Regularities of the connection between the parameters of human flows. Diploma No. 24-S for discovery in the field of social psychology. *Scientific discoveries*. Moscow, Russian Academy of Natural Sciences, International Academy of Authors of Scientific Discoveries and Inventions, International Association of Authors of Scientific Discoveries Publ., 2005; 63-69. (rus).
45. Grigoryants R.G., Podolnyy V.P. A graphic method for processing motion pictures of human streams. *News of the North Caucasian Scientific Center*. 1975; 1:17-19. (rus).
46. Aybuev Z.S.-A. *The formation of human flows on pre-factory territories of large industrial units of engineering profile : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 1989; 292. (rus).
47. Kislyakov V.M., Filippov V.V., Shkolyarenko I.A. *Mathematical modeling and assessment of traffic conditions for cars and pedestrians*. Moscow, Transport Publ., 1979; 200. (rus).
48. Kholshchevnikov V.V., Nikonov S.A., Levin Yu.I. Calculation and modeling of the movement of human flows. *Research on the basics of architectural design (functional, physical, technical and aesthetic problems of architecture)*. Duvidzon R.M. (ed.). Tomsk, Tomsk State University Publ., 1983; 7-28. (rus).

Поступила 16.02.2021, после доработки 29.03.2021; принята к публикации 21.04.2021
Received February 16, 2021; Received in revised form March 29, 2021; Accepted April 21, 2021

Информация об авторах

ХОЛЩЕВНИКОВ Валерий Васильевич, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт — Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы, Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 691753; Scopus Author ID: 57194448578; ResearcherID: AAP-2971-2020; ORCID: 0000-0001-8472-7749; e-mail: reglament2004@mail.ru

ПАРФЕНЕНКО Александр Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, заместитель директора Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

Information about the authors

Valeriy V. KHOLSHCHEVNIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Fire Safety in Construction Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters; Expert of Scientific Research, Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services; Moscow, Russian Federation; ID RISC: 691753; Scopus Author ID: 57194448578; ResearcherID: AAP-2971-2020; ORCID: 0000-0001-8472-7749; e-mail: reglament2004@mail.ru

Aleksander P. PARFENENKO, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Deputy Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru