

# Применение модели «интеллектуальной жидкости» к описанию движения мобильных объектов

Таранцев А. А.  
Институт проблем транспорта  
им. Н. С. Соломенко, РАН,  
Санкт-Петербург, Россия,  
t\_54@mail.ru

Нодь А. П.  
Северо-Западный региональный  
поисково-спасательный отряд  
МЧС России,  
psp.psoor@mail.ru

Таранцев А. А.  
Академия ГПС МЧС России  
Санкт-Петербург, Россия,  
Dask\_cradle@mail.ru

**Аннотация.** Приводятся сравнительные модели «интеллектуальной жидкости» применительно к движению людских потоков и к движению автотранспорта. Проанализированы их общие черты и различия. Показана возможность решения конкретных задач.

**Ключевые слова:** интеллектуальная жидкость, мобильные объекты.

## ВВЕДЕНИЕ

Движение таких мобильных объектов, как люди (например, в процессе эвакуации из зданий [1–4]) и автомобили в дорожной сети [5–8], подчиняется определённым закономерностям, общим для этих совершенно разных, на первый взгляд, объектов (рис. 1).

Многие исследователи заметили, что такие потоки чем-то напоминают течение жидкости, но не такой, как вода, а особой, получившей название «интеллектуальной».

## Движение людских потоков

Исследование движения людских потоков потребовалось для решения прикладных задач, важнейшей из которых является эвакуация людей из помещений и зданий в случае пожара [9, 10]. Исследования показали, что скорость  $V$  движения людей зависит от плотности потока  $D$  и видов участков эвакуационных путей (рис. 2). Для зависимости  $V(D)$  подбирали различные аппроксимации – полиномиальные, степенные и

др., но окончательно было принято и стандартизовано логарифмическое выражение

$$V(D) = \begin{cases} V_0 & \text{при } D \leq D_0; \\ V_0 [1 + a \ln D_0 / D] & \text{при } D > D_0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $V_0$ ,  $a$  и  $D_0$  – параметры аппроксимации, характерные для каждой группы мобильности людей [13] и видов путей эвакуации – горизонтального внутри и вне помещений, пандусов, лестничных клеток и дверных проёмов (табл. 1).

Плотность потока  $D$  можно представить как отношение проекционной площади, занятой людьми, к площади помещения, где эти люди находятся:

$$D = \frac{F}{L\delta}, \quad (2)$$

где  $F$  – общая проекционная площадь эвакуирующихся;  $L$ ,  $\delta$  – длина и ширина помещения, соответственно (предполагается, что прямоугольное).

Если одновременно эвакуируются люди различных групп мобильности, проекционная площадь  $F$  является суммой проекционных площадей различных групп мобильности:

$$F = \sum_{k=1}^4 N_{Mk} f_{Mk}, \quad (3)$$

где  $N_{Mk}$  – число эвакуирующихся  $k$ -й группы мобильности;  $f_{Mk}$  – средняя проекционная площадь человека  $k$ -й группы мобильности (см. табл. 1).

а



б



Рис. 1. Движение потоков мобильных объектов – людских (а) и автомобильных (б)

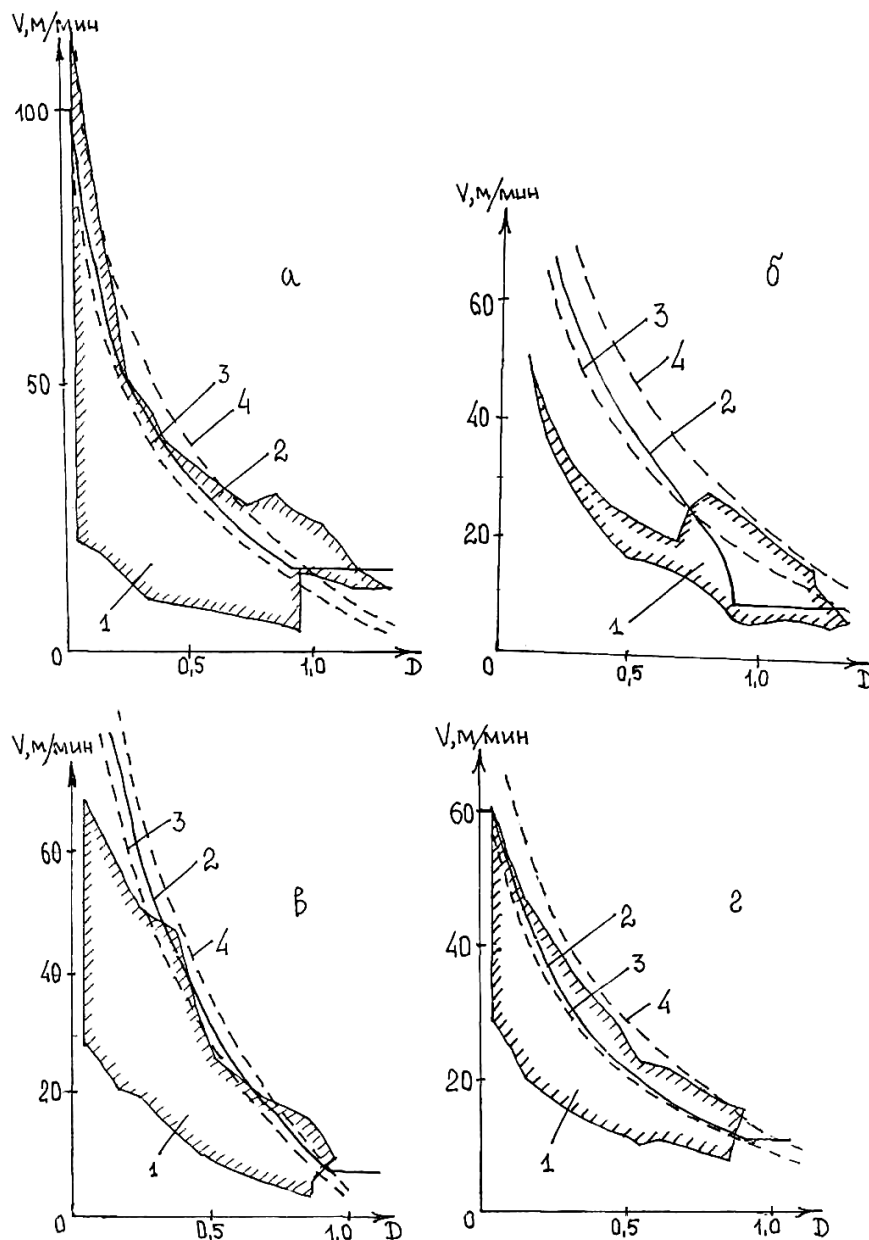


Рис. 2. Определение зависимости скорости людского потока  $V$  от его плотности  $D$ :  
 1 – результаты экспериментов, приведенные в [11]; 2 – нормированные значения согласно ГОСТу [9, 10]; 3 – данные работы [12] при активном движении; 4 – при движении повышенной активности (кривые 2–4 пересчитаны с использованием выражения (1));  
 а) горизонтальный участок; б) лестница вверх; в) лестница вниз; г) дверной проём

Если в потоке движутся люди с вещами (это не характерно для эвакуации при пожаре) и детьми, то их общая проекционная площадь рассчитывается по аналогии с (3) с учётом проекционных площадей в соответствии с табл. 2 [2].

Скорость  $V_i$  смешанного потока людей на каждом  $i$ -м участке эвакуационного пути является средневзвешенным значением [2]:

$$V_i = \sum_{k=1}^4 w_k V_{ik}, i \in [1, n], \quad (4)$$

где  $V_{ik}$  – скорость движения людей  $k$ -й группы мобильности по  $i$ -му участку пути, рассчитываемая по выражению (1) с учётом данных табл. 1;  $w_k$  – весовой коэффициент, рассчитываемый по выражению

$$w_k = \frac{N_{Mk} f_{Mk}}{F}, k \in [1, 4]. \quad (4a)$$

Важным параметром потока людей является его интенсивность  $q$  – поток людей (в пересчёте на их проекционные площади), проходящий в единицу времени через единицу ширины  $i$ -го участка:

$$q_i = V_i D_i, i \in [1, n], \quad (5)$$

где  $V_i, D_i$  – скорость и плотность потока на  $i$ -м участке, соответственно. Зависимости  $q(D)$  для группы мобильности М1 от плотности их потока для горизонтального участка пути (1 – вне зданий, 2 – в зданиях) приведены на рис. 3.

Параметры движения людей различных групп мобильности по участкам пути

Группы мобильности		Участки эвакуационного пути						$f_{cp}, m^2$	
		Гв	Гз	Лвн	Лвв	Пвн	Пвв		Дп
М1	$V_0$	100	100	100	60	115	80	19,6	$f_{M1} = 0,1 m^2$
	$a$	0,407	0,295	0,400	0,305	0,399	0,399		
	$D_0$	0,069	0,051	0,089	0,067	0,171	0,107		
	$q_{max}$	12,06	16,41	15,95	11,97	35,36	15,40		
М2	$V_0$	-	30	30	20	45	25	9,7	$f_{M2} = 0,2 m^2$
	$a$		0,335	0,346	0,348	0,438	0,384		
	$D_0$		0,135	0,139	0,126	0,171	0,146		
	$q_{max}$		9,88	9,55	5,71	12,16	6,97		
М3	$V_0$	-	70	20	25	105	55	17,6	$f_{M3} = 0,3 m^2$
	$a$		0,350	0,454	0,347	0,416	0,446		
	$D_0$		0,102	0,208	0,120	0,122	0,136		
	$q_{max}$		16,01	6,29	6,83	21,69	11,55		
М4	$V_0$	-	60	-	-	115	40	16,4	$f_{M4} = 0,96 m^2$
	$a$		0,400			0,424	0,420		
	$D_0$		0,135			0,146	0,150		
	$q_{max}$		14,52			27,70	10,30		

Примечания. 1. Гв – горизонтальный путь вне зданий; Гз – горизонтальный путь в зданиях; Лвн – лестница вниз; Лвв – лестница вверх; Пвн – пандус вниз; Пвв – пандус вверх; Дп – дверной проём;  $f_{cp}$  – средняя проекционная площадь человека (рис. 3, табл. 2).

2. Размерности:  $V$  и  $V_0$  (м/мин);  $a$  [-];  $D$  и  $D_0$  [ $m^2/m^2$ ].

3. Для участков пути:  $q_{max} = aV_0D_0 \exp(a - 1 - 1)$ ;  $D(q_{max}) = D_0 \exp(a - 1 - 1)$ .

4. М1 – люди, не имеющие ограничения по мобильности; М2 – 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; М3 – инвалиды, использующие при движении дополнительные опоры (костыли, палки); М4 – инвалиды, передвигающиеся на креслах-колясках, приводимых в движение вручную.

Расчётные средние размеры людей

Таблица 2

Человек	Ширина, м	Толщина, м	$f_{cp}, m^2$
Взрослый в одежде летней демисезонной зимней	0,46	0,28	0,100
	0,48	0,30	0,113
	0,50	0,32	0,125
Подросток	0,38–0,43	0,22–0,27	0,067–0,090
Ребёнок	0,30–0,34	0,17–0,21	0,040–0,056

Общее время эвакуации  $t_3$  складывается из времени движения по  $n$  участкам эвакуационного пути:

$$t_3 = \sum_{i=1}^n t_i, \tag{6}$$

где  $t_i$  – время прохождения по  $i$ -му участку, определяемое как отношение длины  $i$ -го участка  $L_i$  к скорости прохождения этого участка:

$$t_i = \frac{L_i}{V_i} + \Delta t_i, i \in [1, n]. \tag{7}$$

где  $\Delta t_i$  – продолжительность задержки на  $i$ -м участке.

Если с  $i-1$ -го участка пути шириной  $\delta_{i-1}$  поток переходит на  $i$ -й участок шириной  $\delta_i$ , то определяется интенсивность движения  $q_i$  на этом участке:

$$q_i = q_{i-1} \delta_{i-1} / \delta_i. \tag{8}$$

Если для  $i$ -го участка выполняется условие

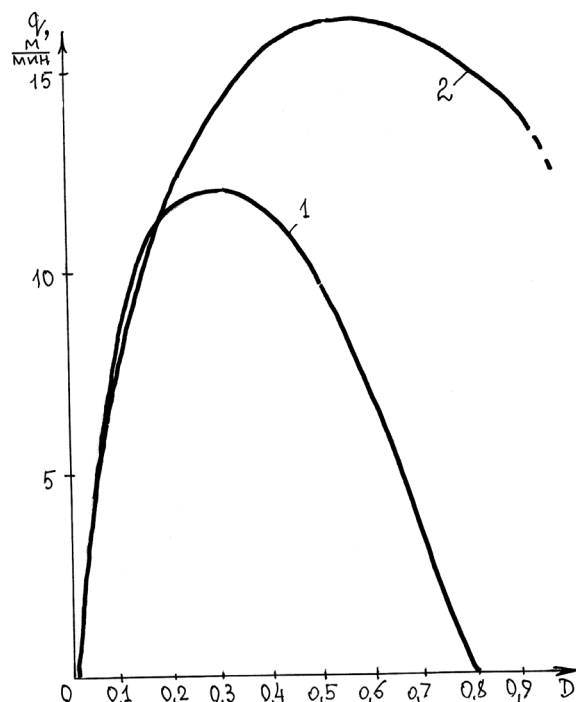


Рис. 3. Зависимость интенсивности движения людей группы мобильности М1 от плотности их потока для горизонтального участка пути: 1 – вне зданий; 2 – в зданиях

$$q_i \leq q_{max} \tag{9}$$

(см. табл. 1), то полагают  $\Delta t_i = 0$ , а скорость  $V_i$  находится либо интерполяцией по таблице [9, 10], либо графически [2] – см., например, рис. 4.

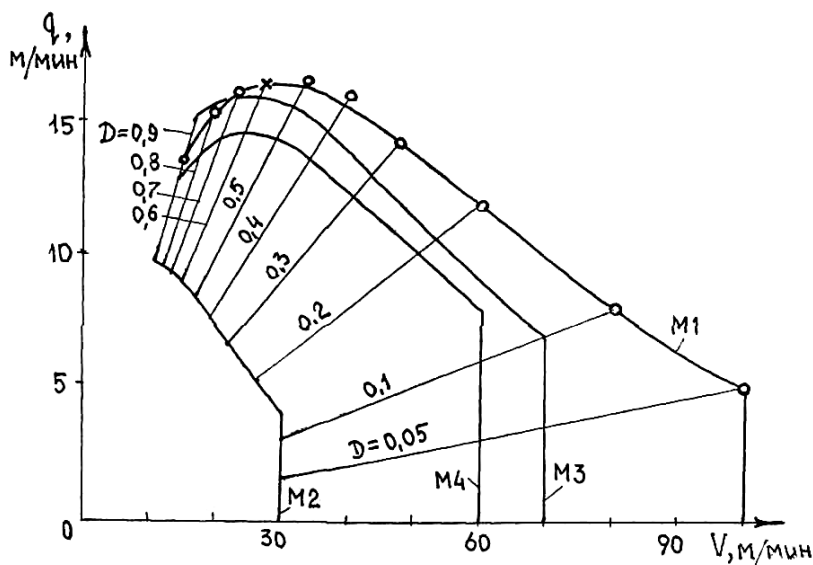


Рис. 4. Зависимость интенсивности от скорости движения людей различных групп мобильности с учётом плотности их потока на горизонтальном участке пути в здании

В некоторых случаях может возникнуть неоднозначная ситуация, когда получаются два значения интенсивности [1, 2] (см. рис. 5). При этом если поток людей переходит в помещение меньшей ширины ( $\delta_i < \delta_{i-1}$ ), то плотность потока увеличится до значения  $D_6$ , а скорость примет меньшее значение  $V_6$ . Если же  $\delta_i > \delta_{i-1}$ , то плотность потока уменьшится до значения  $D_m$ , скорость примет большее значение  $V_m$ .

Если же условие (9) не выполняется, то перед  $i$ -м участком образуется скопление людей, что нежелательно. На уровне проекта здания проблема устраняется увеличением ширины  $\delta_{i+1}$  до величины, позволяющей соблюсти условие (9).

Когда здание эксплуатируется (театр, историческое здание и т. п.), нужно либо ограничить число пребывающих там людей, либо учитывать задержку их движения по выражению

$$\Delta t_i = F \left( \frac{1}{q_c \delta_c} - \frac{1}{q_i \delta_i} \right), \quad (10)$$

где  $\delta_c$  – ширина проёма или следующего участка, перед которым возникает скопление;  $q_c$  – предельная интенсивность, ко-

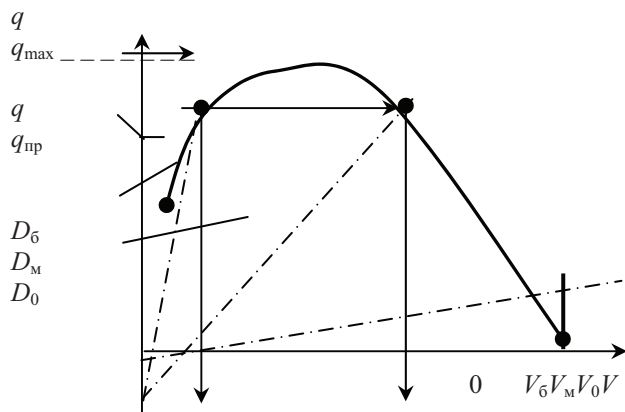


Рис. 5. Определение скорости людского потока для заданной интенсивности:  $V_6$  – скорость при большей плотности потока  $D_6$ ;  $V_m$  – скорость при меньшей плотности потока  $D_m$

торая для проёма шириной  $\geq 1,6$  м равна 8,5 м/мин, а если проём уже 1,6 м,  $q_c = 2,5 + 3,75\delta_c$ ; для лестницы вниз – 7,2 м/мин, для лестницы вверх – 9,9 м/мин. Вычисленная по (10) величина задержки учитывается в выражении (7).

Если  $m$  потоков сливаются, то интенсивность движения  $q_i$  на этом участке находят из выражения

$$q_i = \frac{\sum_{j=1}^m q_j \delta_j}{\delta_i}. \quad (11)$$

Далее проверяют выполнение условия (9) и все последующие действия. В итоге по выражению (6) определяют время  $t_s$ , в течение которого люди смогут эвакуироваться из здания.

#### Движение потоков автомобилей

Как видно из рис. 1, движение потоков автомобилей во многом аналогично движению людских потоков\*. Потоки машин, как и потоки людей, представляют собой «интеллектуальную жидкость», скорость движения  $V$  которой зависит от её плотности (в данном случае под плотностью  $\rho$  подразумевается количество автомобилей на единицу длины шоссе в одном ряду). Для наглядности на рис. 6 представлены графики зависимости скорости от плотности для людских потоков и потоков автомобилей, свидетельствующие о большом сходстве процессов движения. Это понятно хотя бы из того соображения, что автомобилями также управляют люди.

В теории движения потоков автомобилей [5, 6, 14] принято пользоваться номограммой «интенсивность движения – плотность потока» (рис. 7). Под интенсивностью  $q$  понимается число автомашин, проезжающее за единицу времени (как правило, за час) по одной полосе (ряду) дороги. В отличие от движения людских потоков, где принято чёткое разделение на группы мобильности [13] с соответствующими параметрами движения (см. табл. 1), автомобильные по-

\* Этот факт ещё в 1970-х годах отметил проф. В.В. Холщевников.

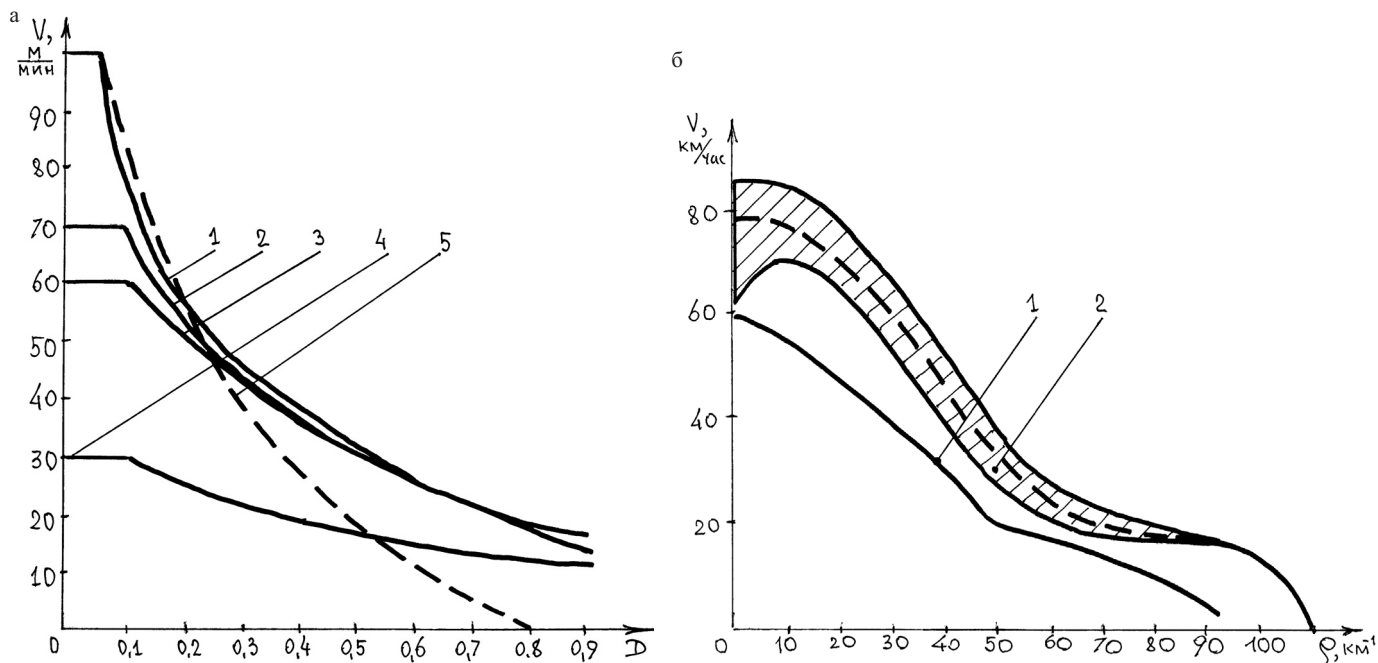


Рис. 6. Зависимости скорости потока от плотности движения:  
 а) людских потоков по горизонтальному участку: 1 – группа М1; 2 – группа М3; 3 – группа М5; 4 – группа М2; 5 – группа М1 вне здания; б) потоков автомобилей: 1 – по [5]; 2 – по [6]

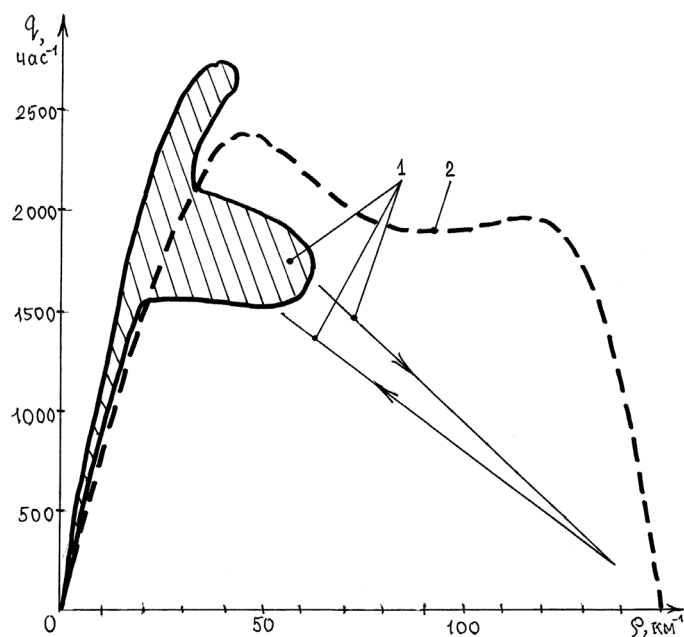


Рис. 7. Номограмма «интенсивность движения – плотность потока автомобилей»:  
 1 – согласно [14]; 2 – согласно [6]

токи представлены большим разнообразием транспортных средств – от малолитражных легковых автомобилей до трейлеров, параметры движения которых не поддаются жёсткому нормированию. Очевидное сходство номограмм на рис. 3 и 7 служит дополнительным подтверждением схожести процессов движения людских и автомобильных потоков.

Для формализации описания движения автомобильных потоков в работе [6] принято представлять зависимости  $q(\rho)$  в виде парабол, треугольников и др. Тем не менее, движение автомобильных потоков, в отличие от потоков людей, имеет ряд особенностей, основное из которых – регулирование

потоков на перекрёстках и других участках дороги посредством светофоров, дорожных знаков или полицейскими, а также правилами дорожного движения [15], например, запрещающими грузовым автомобилям на некоторых участках дороги двигаться в крайнем левом ряду, устанавливающими приоритетность движения транспортных средств и т. п.

Кроме того, в теории движения автомобильных потоков недостаточное внимание по сравнению с теорией движения людских потоков уделено описанию процессов изменения параметров движения при изменении ширины дорожной сети (уменьшении или увеличении рядности) и при слиянии потоков.

В оперативном режиме состояние автомобильных потоков в городе хорошо отражается, например, системой «Яндекс-пробки». При этом участники движения могут прокладывать оптимальные маршруты и прогнозировать время движения из пункта назначения в пункт прибытия. Однако подобные системы не позволяют моделировать (прогнозировать) автотранспортные потоки на этапе проектирования, реконструирования и модернизации городской транспортной сети. Данная задача может решаться методами, изложенными в [5, 6, 14] и в аналогичной литературе. Но точность моделирования автотранспортных потоков может быть увеличена за счёт использования подходов, разработанных в теории движения людских потоков [1, 2, 11, 12].

## Выводы

Показаны сходство и различия в теориях движения людских и автотранспортных потоков. Математический аппарат теории движения автотранспортных потоков можно обогатить наработками теории движения людских потоков, и наоборот. В интересах развития обеих теорий можно рассмотреть возможности использования и других математических аппаратов, например, теории массового обслуживания [16,17], теории нечётких множеств [18,19] и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холщевников В. В. Эвакуация и поведение людей при пожарах : учеб. пособие / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин, А. П. Парфёненко, И. С. Кудрин, Р. Н. Истратов, И. Р. Белосохов. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. – 262 с.
2. Таранцев А. А. Методы расчёта времени эвакуации людей из зданий и сооружений : учеб. пособие / А. А. Таранцев ; под ред. проф. В. С. Артамонова. – СПб. : СПбУ ГПС МЧС России, 2009. – 42 с.
3. Gwynne S. M. V. Optimizing fire alarm notification for high-risk groups / S. M. V. Gwynne // Summary Rep., Prepared for The Fire Prot. Res. Foundation. – 2007, June, NFPA, Quincy, MA.
4. Hyun-Seung H. Calculating and verifying the stair-case-length for evacuation analysis / H. Hyun-Seung, C. Jun-ho, H. Won-Hwa // Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2010 Conf., Springer. – NY, 2011. – P. 601–611.
5. Сильянов В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог / В. В. Сильянов. – М. : Транспорт, 1984. – 287 с.
6. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособие / под ред. А. В. Гасникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МЦНМО, 2013. – 427 с.
7. Handbook of Transport Modelling / ed. D. A. Hensher, K. J. Button. – Pergamon, 2000.
8. Cascetta E. Transportation systems analysis / E. Cascetta // Models and Appl. Optim. Appl. – 2009. – Springer, Vol. 29.
9. ГОСТ 12.1.004-91\* «СППЗ. Пожарная безопасность. Общие требования». Приложение 2 обязательное «Метод обеспечения уровня обеспечения пожарной безопасности людей».
10. ГОСТ Р 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля». Обязательное приложение III «Метод расчета индивидуального и социального риска для производственных зданий».
11. Холщевников В. В. Эвакуация и поведения людей при пожарах : учеб. пособие / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. – 212 с.
12. Холщевников В. В. Психологические закономерности поведения людей при движении в пешеходных потоках / В. В. Холщевников // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – № 4.
13. СП 59.13330.2002. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения.
14. Болл Ф. Критическая масса / Ф. Болл. – М. : Гелиос, 2008. – 528 с.
15. Правила дорожного движения. ПДД-2015.

# Application of Model «Intellectual Liquid» to the Description of the Movement of Mobile

Tarantsev Alexandr A.,  
Transport Research Institute  
named N. Solomenko,  
Russian Academy of Sciences  
Saint-Petersburg, Russia  
t\_54@mail.ru

Nod' Alexandr P.,  
Northwest Regional Search  
and Rescue Team  
of EMERCOM of Russia  
Saint-Petersburg, Russia  
psp.psoor@mail.ru

Tarantsev Andrey A.,  
Academy GPS Russian Ministry  
of Emergencies  
Saint-Petersburg, Russia  
Dask\_cradle@mail.ru

**Abstract.** Comparative models of “intellectual liquid” in relation to the movement of human streams and are given to traffic. Their common features and differences are analysed. Possibility of the solution of specific objectives is shown.

**Keywords:** intellectual liquid, mobile objects.

## REFERENCES

1. Holshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Parfyonenko A. P., Kudrin I. S., Istratov R. N., Belosohov I. R. *Ehvakuciya i povedenie lyudej pri pozharah* [The evacuation and human behavior in fires], Moscow, Akademiya GPS MCHS Rossii, 2015, 262 p.
2. Tarancev A. A. *Metody raschyota vremeni ehvakucii lyudej iz zdaniy i sooruzhenij* [Methods for calculating the time of evacuation of people from buildings and structures], St. Petersburg, SPbU GPS MCHS Rossii, 2009, 42 p.
3. Gwynne S. M. V. Optimizing fire alarm notification for high-risk groups. *Summary Rep., Prepared for The Fire Prot. Res. Foundation*, June 2007, NFPA, Quincy, MA.
4. Hyun-Seung H., Jun-ho C., Won-Hwa H. Calculating and verifying the stair-case-length for evacuation analysis, *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2010 Conf., Springer, NY, 2011, pp. 601-611.
5. Silyanov V. V. *Transportno-ehkspluatacionnye kachestva avtomobilnyh dorog* [Transport-performance roads], Moscow, Transport, 1984, 287 p.
6. Gasnikov A. V. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov* [Introduction to the mathematical modeling of traffic flows], Moscow, MCMO, 2013, 427 p.
7. Handbook of Transport Modelling, ed. D. A. Hensher, K. J. Button, Pergamon, 2000.
8. Cascetta E. Transportation systems analysis, *Models and Appl. Optim. Appl.*, 2009, Springer, Vol. 29.
9. GOST 12.1.004-91\* SPPZ “Pozharnaya bezopasnost Obshchie trebovaniya” Prilozhenie 2 obyazatelnoe “Metod obespecheniya urovnya obespecheniya pozharnoj bezopasnosti lyudej” [“FPS. Fire safety. General requirements”. Annex 2 mandatory “Method to ensure the level of fire safety of people”].
10. GOST R 12.3.047-98 “Pozharnaya bezopasnost’ tekhnologicheskikh processov. Obshchie trebovaniya. Metody kontrolya”. Obyazatel’noe prilozhenie Sh “Metod rascheta individual’nogo i social’nogo riska dlya proizvodstvennyh zdaniy” [“Fire Safety Technologies-cal processes. General requirements. Control methods”. Mandatory application Sh “Method of calculating the individual and social risk for the industrial building”].
11. Holshchevnikov V. V., Samoshin D. A. *Ehvakuciya i povedeniya lyudej pri pozharah* [The evacuation and human behavior in fires], Moscow, Akademiya GPS MCHS Rossii, 2009, 212 p.
12. Holshchevnikov V. V. Psihofizio-logicheskie zakonomernosti povedeniya lyudej pri dvizhenii v peshekhodnyh potokah [Psychophysiological patterns of behavior when driving in pedestrian flows], *Pozharovzryvbezopasnost [Fire and explosion safety]*, 2005, no. 4.
13. SP 59.13330.2092. *Dostupnost zdaniy i sooruzheniy dlya malomobilnyh grupp naseleniya* [The availability of buildings and facilities for people with limited mobility].
14. Boll Ph. *Kriticheskaya massa* [Critical mass], Moscow, Gelios, 2008, 528 p.
15. *Pravila dorozhnogo dvizheniya. PDD-2015* [Traffic Laws. SDA-2015].