

ДОРОЖНІ УМОВИ ТА БЕЗПЕКА РУХУ

УДК 625.7/.8

Смирнова Н.В., д-р техн. наук, Иванов В.Д.

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ДИАГРАММ

Анотація. У статті розглянуті основні особливості алгоритмічно-програмного моделювання руху транспортних потоків на двосмугових дорогах загального користування для побудови транспортних діаграм і рішення задач організації руху.

Ключові слова: автомобільна дорога, транспортний потік, вільний рух, швидкість руху.

Аннотация. В статье рассмотрены основные особенности алгоритмично-программного моделирования движения транспортных потоков на двухполосных дорогах общего пользования для построения транспортных диаграмм и решения задач организации движения.

Ключевые слова: автомобильная дорога, транспортный поток, свободное движение, скорость движения.

Abstract. The article describes basic features of algorithmic and software traffic flow modeling on two-lane roads of general use for the transport diagrams building and organization of movement solving.

Keywords: road, traffic, free movement, speed of movement.

Исследование транспортных диаграмм позволяет оценивать транспортно-эксплуатационные характеристики дороги на всем периоде её жизненного цикла эксплуатации между ремонтами и вплоть до реконструкции. Исследование в пиковых областях и диапазонах транспортных диаграмм служит основой организации движения в пиковые периоды возрастания интенсивности с целью, например, недопущения заторов. Основным

результатом указанных исследований служит транспортная диаграмма, конкретный вид которой определяется дорожными факторами.

Для построения транспортных диаграмм прежде всего необходимо определить вероятностные характеристики скоростей свободного движения [5]. Значение скорости, рассчитанной по приведенным в [5] зависимостям, зависит от модели автомобиля. Но даже в одной и той же точке дороги эти значения не одинаковы в зависимости от цели поездки, психофизиологических свойства водителя [5], загрузки автомобиля, степени его изношенности и т.п. Такого рода факторов много, природа их различна и поэтому в каждой точке и для каждой модели j скорость является случайной величиной с рассчитанным средним значением v_{jcp} и дисперсией D_j или среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_j ($\sigma^2=D$). Значения СКО σ_j устанавливаются опытным путем, см. работы В.Н. Глущенко [4] или А.П. Васильева [2]. Согласно А.П. Васильеву, среднеквадратическое отклонение σ (км/час) зависит от квадрата скорости по эмпирической зависимости

$$\sigma(v) = a + b \cdot v^2, \quad (1)$$

в которой коэффициенты $a = 3$, $b = 0.001$.

Значения, вычисленные по этой зависимости, вполне коррелируются с опытными данными авторов, табл. 1.

Таблица 1 – Среднеквадратические отклонения скорости от среднего значения по типам автомобилей при различных значениях продольного уклона

Группа автомобилей	Среднеквадратические отклонения скорости, м/с, при значениях продольного уклона, %								
	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8
Легкие грузовые	2,90	2,37	3,02	3,27	3,70	3,83	3,91	3,61	3,16
Средние грузовые	2,79	2,26	3,27	3,53	3,67	3,67	3,75	3,61	3,32
Тяжелые грузовые	2,41	2,74	2,81	2,85	2,93	3,05	3,25	3,48	2,88
Автобусы	2,05	2,47	3,30	3,51	3,55	3,58	3,67	3,61	3,32
Легковые	2,49	2,89	3,67	4,34	4,47	4,47	4,47	4,30	3,46

В дальнейшем принято, что распределение скорости в каждой группе j подчинено нормальному закону Гаусса [1,3], плотность распределения вероятностей скорости которого

$$f_j(v) = \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-v_{jcp})^2}{2\sigma_j^2}}. \quad (2)$$

При известном составе потока общая плотность распределения вероятностей скорости $f(v)$ – это средне-весовая плотность частных плотностей $f_j(v)$

$$f(v) = \sum_{j=1}^n s_j f_j(v), \quad (3)$$

где s_j – часть автомобилей j -й группы в составе потока,
 n – количество групп автомобилей.

Для построения транспортных диаграмм необходимо моделировать движение транспортного потока с определением скоростей по всем типам автомобилей, итерационным вычислением интенсивности движения и определением вероятностных характеристик потока. Принято, что характеристики потока правой и левой полосы одинаковы.

Алгоритм моделирования для вывода транспортной диаграммы представлен следующим образом.

1. Моделируют свободное движение всех автомобилей, входящих в состав расчетного потока и вычисляют скорости отдельных его типов: $v_{л}$ – легковых, $v_{г}$ – грузовых и т.д., см. раздел 3. Устанавливают среднеквадратические отклонения скорости свободного движения тех же типов автомобилей: $\sigma_{л}$ – легковых, $\sigma_{г}$ – грузовых и т.д., используя формулу проф. А.П. Васильева [2]. Для каждого типа автомобилей по формуле нормального распределения (2) вычисляют значения плотности скорости $f_i(v)$ и находят по формуле (3) распределение скорости свободного движения всех автомобилей, входящих в поток $f(v)$. Как математическое ожидание находят скорость свободного движения $v_{св}$ всего потока.

2. Назначают плотность потока на правой полосе $r_{п} = 2$ авт/км.

3. При известной плотности потока автомобилей на своей, правой полосе интенсивности потока $q_{п} = r_{п} \cdot v_{п}$, но поскольку средняя скорость потока на

правой полосе $v_{п}$ до начала моделирования неизвестна, то интенсивность потока $q_{п}$ необходимо вычислять итерационным способом, уточняя с каждой итерацией и принимая скорость на первой итерации, например, равной средней скорости свободного движения $v_{св}$, см. п. 1.

4. Для каждого автомобиля типа v , находят плотности переходов [6]. Предварительно нужно вычислить следующие величины:

- $p_{тоб}$ – вероятность наличия во встречном потоке интервала $t_{об}$ между автомобилями, достаточного для выполнения обгона;
- $q'_{л}$ – фиктивную интенсивность потока на встречной полосе.

5. Для каждого автомобиля типа v находят вероятность свободного движения $P(v)$ [6]. Далее вычисляют среднюю скорость транспортного потока $v_{п}$. Сравнивают отклонение этой скорости от значения на предыдущей итерации, и при недопустимом отклонении уточняют плотность потока, переходя к п. 3.

6. Интенсивность потока, соответствующую плотности $r_{п}$ находят по формуле $q_{п} = r_{п} \cdot v_{п}$ [6].

7. Назначают новое значение плотности потока $r_{п} = r_{п} + \Delta r_{п}$ и продолжают вычисления, начиная с п. 3. При превышении плотности максимального значения r_{max} моделирование завершено.

Приведены некоторые результаты моделирования и транспортные диаграммы.

Исходными данными примера моделирования стационарного режима служат характеристики скорости свободного движения, в табл. 2, 3.

Таблица 2 – Исходные данные о свободном движении

	Все	Гм	Гс	Гб	АП	АПп	Ам	Ас	Аб	Лм	Лс	Лб
%	100	2	3	4	5	6	7	8	9	20	14	22
Vmin	км/ч	50.0	50.0	40.0	40.0	40.0	50.0	50.0	60.0	70.0	70.0	80.0
Vmax	км/ч	70.0	70.0	65.0	65.0	65.0	80.0	70.0	90.0	100.0	120.0	150.0
Vcp	км/ч	60.0	60.0	52.5	52.5	52.5	65.0	60.0	75.0	85.0	95.0	115.0
СКО	км/ч	3.3	3.3	4.2	4.2	4.2	5.0	3.3	5.0	5.0	8.3	11.7

Плотности вероятностей скорости свободного движения каждого типа автомобилей $f_i(v)$ в составе потока рассчитаны по формуле нормального распределения, общая плотность $f(v)$ - по формуле (3). Общая плотность, показанная на рис. 2, типична для дорог общего пользования II – IV категорий и

имеет две характерные моды (в области 16 м/с и 24 м/с), а также достаточно большую зону (от 26 м/с и выше) для быстроходных легковых автомобилей, СКО скорости которых (табл. 2) в два и более раз больше СКО других автомобилей в составе потока.

Таблица 3 – Плотности вероятностей скорости свободного движения (фрагмент)

v , м/с	Все	Гм	Гс	Гб	АП	АПп	Ам	Ас	Аб	Лм	Лс	Лб
10	0,000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0,004	0.000	0.000	0.029	0.029	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0,047	0.007	0.007	0.304	0.304	0.304	0.004	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000
.....												
40	0,001											0.006

Анализ распределений вероятностей скорости $\Phi(v)$ в таблице 4 показывает закономерное уменьшение относительного числа более быстроходных автомобилей с ростом от интенсивности потока Q . При интенсивности 300 авт/ч практически нет автомобилей, движущихся со скоростью 38 м/с и больше; аналогичные соотношения и при других интенсивностях: 400 авт/ч – 36 м/с, 500 авт/ч – 34 м/с, 600 авт/ч – 26 м/с, 700 авт/ч – 14 м/с, 800 авт/ч – 12 м/с.

При приближении интенсивности к пропускной способности (824 авт/ч при коэффициенте сцепления 0,4) количество автомобилей, водители которых желали бы двигаться со скоростью 10 м/с, снизилось практически до нуля.

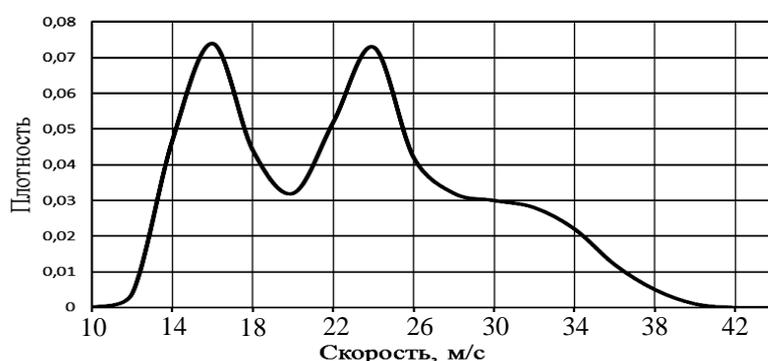


Рисунок 1 – Плотность распределения вероятностей скорости свободного движения общая для всех автомобилей в составе потока

Таблица 4 – Распределения вероятностей скорости $\Phi(v)$ в зависимости от интенсивности потока Q при коэффициенте сцепления 0,4 (фрагмент)

Q , авт/ч	100	200	300	400	500	600	700	800
R , авт/км	1.3	2.8	4.6	6.9	10.3	14.6	19.3	26.9
V , км/час	76.3	72.0	65.7	57.6	48.6	41.0	36.2	29.7
v , м/с	$\Phi(v)$							
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.083	0.906
12	0.007	0.013	0.027	0.067	0.194	0.558	0.935	0.999
.....								
44	0.998	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000

Таблица 5 – Зависимость вероятности свободного движения от интенсивности потока при коэффициенте сцепления 0,4 (фрагмент)

Q , авт/ч	100	200	300	400	500	600	700	800
v , м/с	$P(v)$							
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
8	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.995
10	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.993	0.917	0.094
12	0.997	0.991	0.977	0.937	0.810	0.444	0.065	0.001
.....								
44	0.826	0.665	0.479	0.241	0.097	0.027		

Вероятность свободного движения $P(v)$ – неубывающая функция скорости при некоторой интенсивности, и неубывающая функция интенсивности при некоторой скорости. С приближением к пропускной способности вероятность свободного движения очень быстро убывает и практически нулевая при интенсивности 700 авт/ч для водителей, которые жалали бы двигаться со скоростью более 12 м/с, а при интенсивности 800 авт/ч более 10 м/с.

По результатам моделирования стационарного режима построены транспортные диаграммы. Моделирование выполнено для разных сцепных свойств покрытия: коэффициент сцепления менялся от 0.1 до 0.7. При моделировании плотность потока менялась от начального значения 2 авт/км до максимальной плотности (от 58 до 108 авт/км в зависимости от коэффициента сцепления).

Пример результата моделирования для транспортной диаграммы при коэффициенте сцепления 0.4 с расчетом интенсивности Q и скорости потока V для каждого значения плотности потока R приведен в табл. 6.

Таблица 6 – Результаты моделирования транспортной диаграммы при коэффициенте сцепления 0,4

R , авт/км	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Q , авт/ч	149	270	364	443	491	540	584	626	669	712	745	766	785	812	815
V , км/час	74.5	67.5	60.7	54.2	49.1	45.0	41.7	39.1	37.2	35.6	33.9	31.9	30.2	29.0	27.2
R , авт/км	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	60	70	80	90	96
Q , авт/ч	800	785	771	756	741	727	710	689	668	641	534	405	252	99	7
V , км/час	25	23.1	21.4	19.9	18.6	17.3	16.1	14.9	13.9	13	8.9	5.8	3.2	1.1	0.1

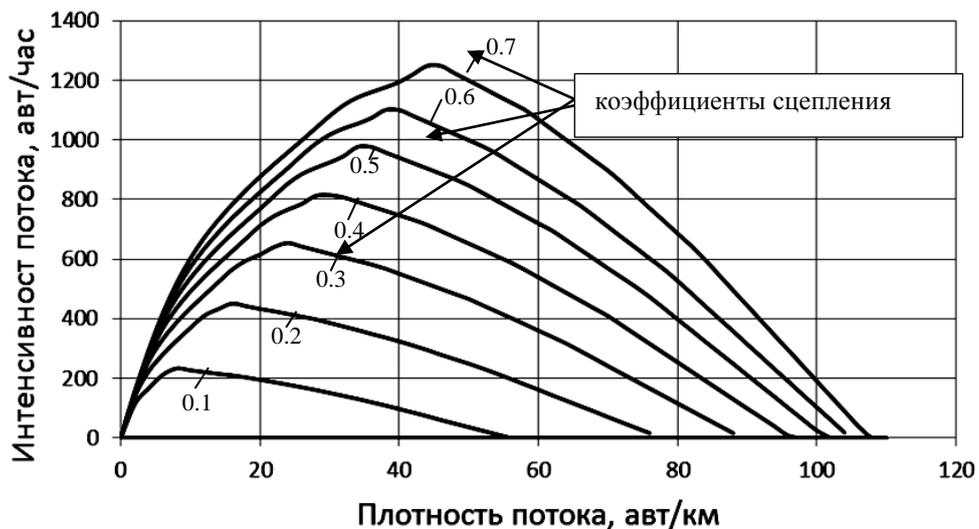


Рисунок 2 – Транспортные диаграммы при стационарном режиме потока

Таким образом, все транспортные диаграммы построенные в диапазоне коэффициентов сцепления от 0,1 до 0,7, показывают существенное снижение пропускной способности в зависимости от ухудшения сцепных свойств проезжей части дороги.

Література

1. Бочаров П. П. Теория вероятностей. Математическая статистика / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – 2-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 296 с.
2. Васильев А. П. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения : учеб. для вузов / А. П. Васильев, В. М. Сиденко ; под ред. А. П. Васильева. – М. : Транспорт, 1990, – 304 с.
3. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2000. – 479 с.
4. Глущенко В. Н. Исследование влияния дисперсии скорости на безопасность движения/ Глущенко В. Н., Филиппов В. В. // Пути повышения безопасности дорожного движения : материалы IV Всесоюз. межвуз. науч. конф. – М. : МАДИ (ГТУ), 1981. – С. 96–98.
5. Лобанов Е. М. Проектирование дорог и организация движения с учётом психофизиологии водителя / Е. М. Лобанов. – М. : Транспорт, 1980. – 311 с.
6. Филиппов В.В., Смирнова Н.В. Моделирование транспортных потоков на дорогах II – IV категорий: монография – М.: ХНАДУ, 2014. – 200 с.

Рецензенти:

Павлюк Д.О., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.
Гончаренко Ф.П., канд. техн. наук, ДП "Укрдіпроддор".

Reviewers:

Pavliuk D.O., Dr. Tech. Sci., National Transport University.
Honcharenko F.P., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), "Ukrdiprodor".

Стаття надійшла до редакції: **29.07.2016 р.**