

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОСТИ КАЧЕСТВА ТОРМОЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Доктор техн. наук, профессор **Данилов О.Ф.**,
кандидат техн. наук, доцент **Колесов В.И.**,
ассистент **Сорокин Д.А.**,
ассистент **Гуляев М.Л.**
(Тюменский индустриальный университет)

STUDY OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE TRANSPORT FLOW UNDER THE CONDITIONS OF HETEROGENEITY OF BRAKING QUALITY OF VEHICLES

O.F. Danilov, Doctor (Tech.), Professor,
V.I. Kolesov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,
D.A. Sorokin, Assistant,
M.L. Gulyaev, Assistant
(Tyumen Industrial University)

Аннотация. Определено понятие качества торможения транспортного средства. Предложен коэффициент, характеризующий неоднородность качества торможения в транспортном потоке и зависящий только от конструктивных особенностей транспортных средств. В условиях неоднородности транспортного потока исследованы его динамические характеристики: скорость, плотность, интенсивность. Проанализирована фундаментальная диаграмма транспортного потока.

Abstract. The concept of vehicle braking quality is defined. A coefficient is proposed that characterizes the heterogeneity of the quality of braking in a traffic flow and depends only on the design features of vehicles. In the conditions of non-uniformity of the traffic flow, its dynamic characteristics were investigated: speed, density, intensity. The fundamental diagram of the traffic flow is analyzed.

Ключевые слова: транспортный поток, транспортное средство, качество торможения, замедление, динамический габарит, скорость, плотность, интенсивность

Keywords: Traffic flow, vehicle, braking quality, deceleration, dynamic interval, speed, density, intensity

1. Введение.

Под качеством торможения транспортного средства (ТС) понимается величина установившегося замедления, зависящая от конструктивных особенностей ТС. В условиях реального движения замедление прямо пропорционально коэффициенту сцепления, который следует разделять на две составляющие. Первая составляющая обусловлена конструкцией ТС, типом используемых шин, их состоянием и некоторыми другими факторами. Вторая составляющая зависит от условий внешней среды. Представленная работа посвящена исследованию динамики транспортного потока (ТП) в условиях неоднородности первой составляющей, принимая допущение, что вторая составляющая является константой для исследуемого перегона.

Как показал анализ, исследований в этом направлении не проводилось. Поставленная задача осложняется тем, что учет конструктивных особенностей каждого ТС в потоке при макромоделировании либо затруднен, либо невозможен в принципе. Авторами предложена методика исследования, позволяющая найти решение, исключаящее это ограничение.

2. Динамические характеристики транспортного потока.

Ключевые математические положения подробно описаны авторами в публикации [1], однако, требуется

обозначить основные динамические характеристики ТП, необходимые для понимания логики исследования.

Продольный динамический габарит (ПДГ) транспортного средства широко используется в математическом моделировании и представляет собой расстояние между ведущим и ведомым ТС, позволяющее обеспечить безопасное функционирование транспортного потока

$$L(V) = m_2 \cdot V^2 + m_1 \cdot V + m_0, \quad (1)$$

где L – продольный динамический габарит, м;

V – скорость ТП, м/с;

m_2 – коэффициент, $\text{с}^2/\text{м}$;

m_1 – коэффициент, с;

m_0 – коэффициент, м.

Плотность потока определяется количеством ТС на единицу длины полосы движения

$$q(V) = 1/L(V) = 1/(m_2 \cdot V^2 + m_1 \cdot V + m_0), \quad (2)$$

где q – плотность, ТС/км.

Экстремум плотности достигается при $V = 0$

$$q_{\max} = 1/m_0, \quad (3)$$

где q_{\max} – максимальная плотность, ТС/км.

Интенсивность ТП характеризуется количеством ТС, преодолевших сечение полосы движения за единицу времени

$$N(V) = V \cdot q(V) = V / (m_2 \cdot V^2 + m_1 \cdot V + m_0), \quad (4)$$

N – интенсивность, ТС/ч.

Максимальная интенсивность достигается при выполнении условия $dN(V)/dV = 0$, что приводит к решению

$$V_{\max N} = \sqrt{m_0 / m_2}, \quad (5)$$

$V_{\max N}$ – скорость достижения максимальной интенсивности, м/с.

Для анализа обозначенных характеристик ТП необходимо исследовать коэффициент ПДГ m_2 , обозначить его физический смысл в контексте микро- и макромоделирования.

3. Исследование коэффициента m_2 .

Величину m_2 можно определить, используя уравнение пути, пройденного ТС за время установившегося замедления

$$S_{ss} = V^2 / (2 \cdot j), \quad (6)$$

где S_{ss} – путь, пройденный ТС за время установившегося замедления, м;

j – установившееся замедление ТС, м/с².

Рассмотрим стандартную ситуацию, представленную на рис. 1. Два автомобиля движутся с определенной скоростью, соблюдая безопасный интервал, равный ПДГ (положение «а»). «Ведущий» автомобиль (под номером «1») начинает торможение, в результате чего останавливается, преодолев дистанцию S_{ss1} .

Остановочный путь «ведомого» автомобиля (под номером «2») состоит из двух участков: первый пройден за время реакции водителя и срабатывания системы торможения (обусловлен значением m_1), а второй участок S_{ss2} – за время установившегося замедления. В результате дистанция между ТС сократилась до величины l_0 (положение «б»).

При этом ситуация смоделирована таким образом, что величина замедления «ведущего» ТС превышает аналогичное значение «ведомого», либо они равны ($j_1 \geq j_2$). Это связано с тем, что поставленное условие приводит к росту значения ПДГ и является наиболее актуальным с позиции безопасности. В этом случае, используя соотношение (6), получим, что $S_{ss2} \geq S_{ss1}$.

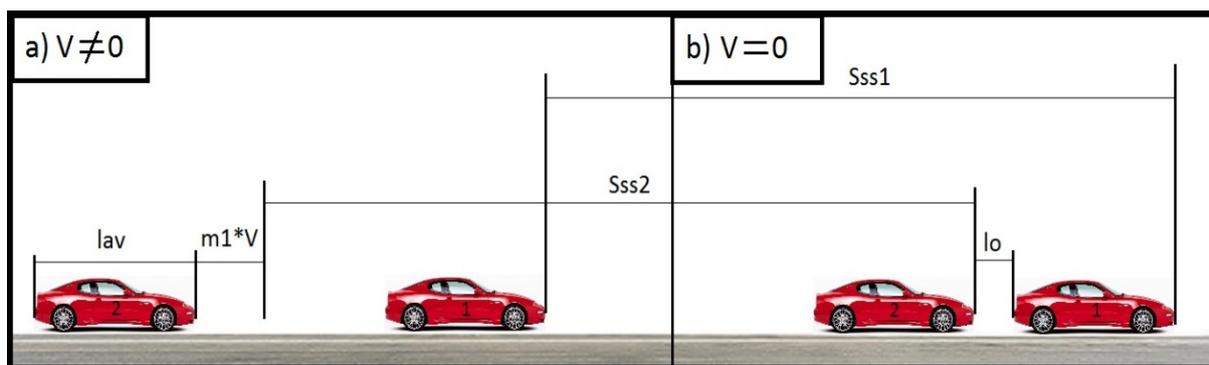


Рис. 1. Определение интервала между двумя смежными ТС

Участок ПДГ, характеризуемый коэффициентом m_2 , представляет собой разницу

$$S_{ss2} - S_{ss1} = \frac{V^2}{2 \cdot j_2} - \frac{V^2}{2 \cdot j_1} = V^2 \cdot \left[\frac{j_1 - j_2}{2 \cdot j_1 \cdot j_2} \right]. \quad (7)$$

Таким образом, m_2 можно найти из выражения

$$m_2 = \frac{j_1 - j_2}{2 \cdot j_1 \cdot j_2}, \quad (8)$$

где j_1 и j_2 – замедления двух смежных автомобилей, м/с².

Формула (8) отражает физический смысл коэффициента m_2 в контексте микромоделирования, что позволяет решать ряд стандартных задач, связанных, например, с экспертизой дорожно-транспортных происшествий. Эти задачи подразумевают структурную и параметрическую идентификацию модели j , поскольку установившееся замедление зависит от большого числа факторов.

В публикации [1] авторами предложены базовые модели ТП, функционирующего в различных дорожных условиях, однако, важно отметить, что на величину

замедления существенно влияют конструктивные особенности ТС. Реалии таковы, что в условиях макромоделирования, когда ТП неоднороден, достоверно учесть влияние конструкции отдельных ТС на динамику потока невозможно.

Для исследования динамических характеристик ТП на макроуровне введем нормированный параметр

$$B = \frac{j_2}{j_1}, \quad (9)$$

где B – коэффициент, характеризующий неоднородность тормозных качеств транспортных средств в потоке.

Следует отметить, что условие $j_1 \geq j_2$ превращает B в повышающий показатель безопасности функционирования потока. При $B=1$ поток полностью однороден ($m_2=0$), а при его снижении в потоке вынужденно увеличивается ПДГ, что логично. При этом, принято допустить, что внешние факторы, влияющие на величину установившегося замедления одинаковы для всех ТС на определенном интервале полосы движения. Таким образом, коэффициент B зависит исключительно от неоднородности технических характеристик ТС.

Для дальнейшего анализа необходимо определиться с эталонным значением j . Целесообразно установить минимальное значение замедления в потоке, поскольку оно всегда регламентировано государственными стандартами [2], однако, при необходимости, легко задать и максимальное значение в качестве эталона.

Решая совместно уравнения (8) и (9) с учетом того, что $j_2 = \text{Const} = j_{\min}$ получим выражение

$$m_2 = \frac{1 - B}{2 \cdot j_{\min}}, \quad (10)$$

где j_{\min} – минимальное допустимое установившееся замедление ТС, м/с^2 .

Подходящее значение j_{\min} можно определить и аналитически, опираясь на выбор требуемых для анализа коэффициентов m_2 и B (рис. 2). В рамках данной работы используем ГОСТ [2] для ТС категории М2 и примем значение минимального установившегося замедления $j_{\min} = 5 \text{ м/с}^2$.

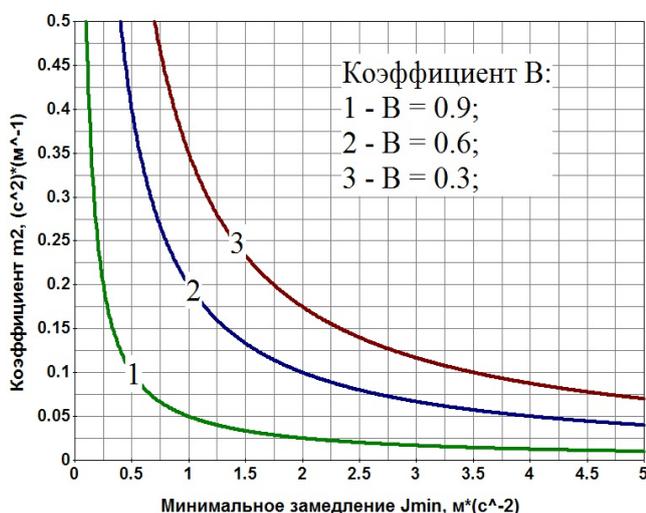


Рис. 2. Зависимость коэффициента m_2 от замедления ТС j_{\min}

Формула (10) отражает физический смысл коэффициента m_2 в контексте макро моделирования, что позволяет проанализировать динамические характеристики ТП для всего диапазона значений коэффициента B .

4. Исследование динамических характеристик ТП в условиях неоднородности тормозных качеств ТС

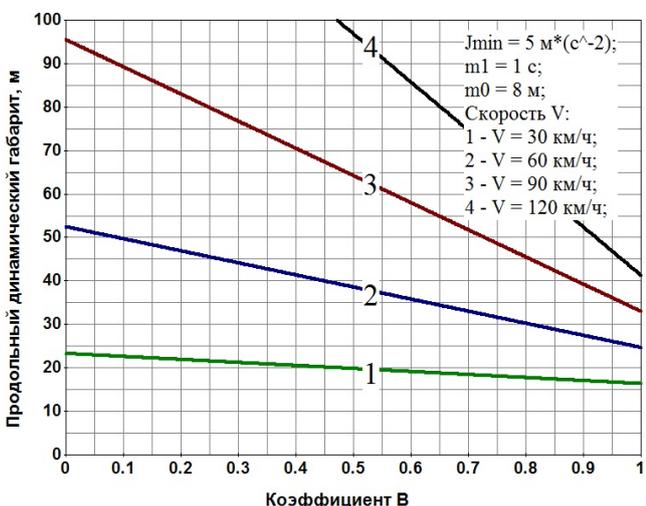


Рис. 3. Зависимость ПДГ от коэффициента B

На рис. 3 представлена зависимость ПДГ от коэффициента B . Следует отметить, говоря о макропоказателях, авторы расценивают ПДГ не как расстояние между двумя конкретными ТС, а как усредненный интервал между ТС в потоке. Как видно из упомянутой иллюстрации, повышение однородности потока приводит к снижению ПДГ, при этом, чем выше скорость ТП, тем он чувствительнее к коэффициенту B .

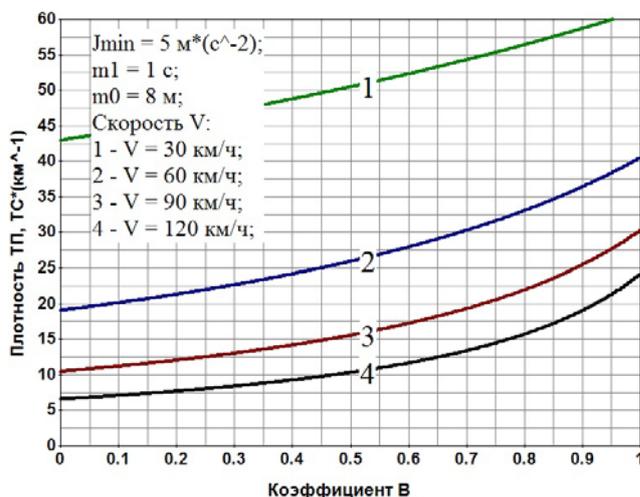


Рис. 4. Зависимость плотности ТП от коэффициента B

Рис. 4 иллюстрирует взаимосвязь плотности и коэффициента B . Тут все логично: чем выше однородность потока, тем меньше усредненный интервал между ТС, а, следовательно, больше плотность.

Однако, важно отметить, что увеличение плотности приводит к снижению скорости потока.

С одной стороны, уменьшение скорости снижает риски дорожно-транспортных происшествий, с другой – может существенно снизить интенсивность движения, которая является одним из показателей эффективности функционирования ТП.

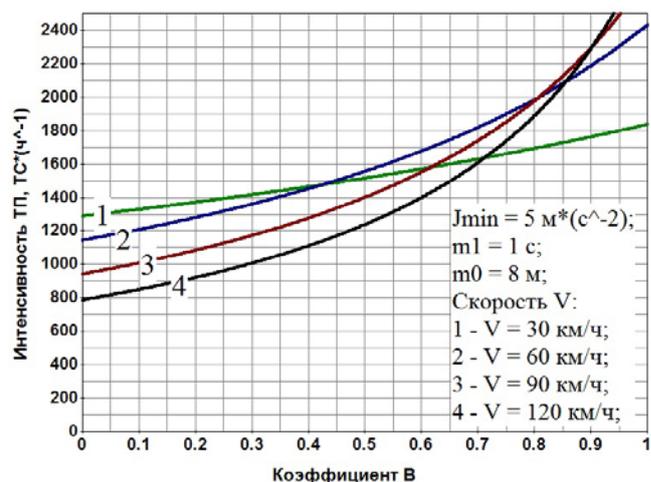


Рис. 5. Зависимость интенсивности ТП от коэффициента B

На рис. 5 представлена зависимость интенсивности ТП от коэффициента B , а на рис. 6 – взаимосвязь интенсивность-скорость. Анализ иллюстраций позволяет утверждать, что рост неоднородности потока приводит не только к повышению N при установившейся скорости, но и к дрейфу экстремума интенсивности в сторону увеличения скорости достижения максимальной интенсивности $V_{\max N}$. Таким образом, калибровка коэффициента B – это ключ к увеличению производительности ТП.

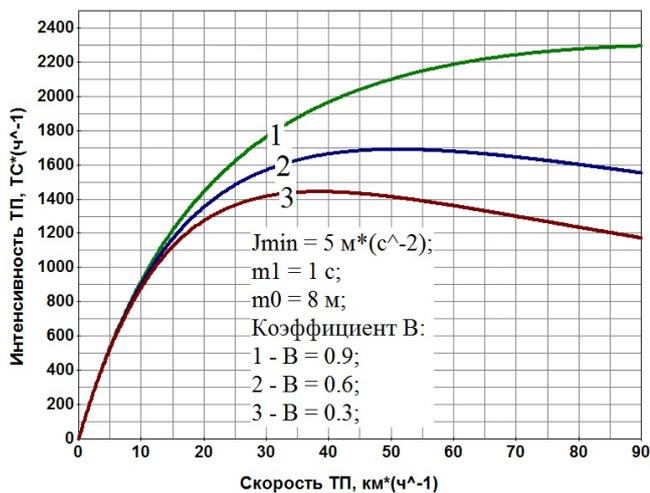


Рис. 6. Зависимость интенсивности ТП от скорости

Практический интерес представляет фундаментальная диаграмма ТП (рис. 7). Важно понимать, что в реальном транспортном потоке именно плотность является первородной, так как она диктует ТС максимально возможную скорость движения. Иными словами, загруженность полосы движения определяет скорость и интенсивность ТП. Анализ рис. 7 позволяет сделать вывод, что для любых условий движения существует оптимальная плотность, при которой интенсивность максимальна. При этом, упомянутый экстремум очень чувствителен к коэффициенту B , то есть к неоднородности тормозных качеств транспортных средств в потоке.

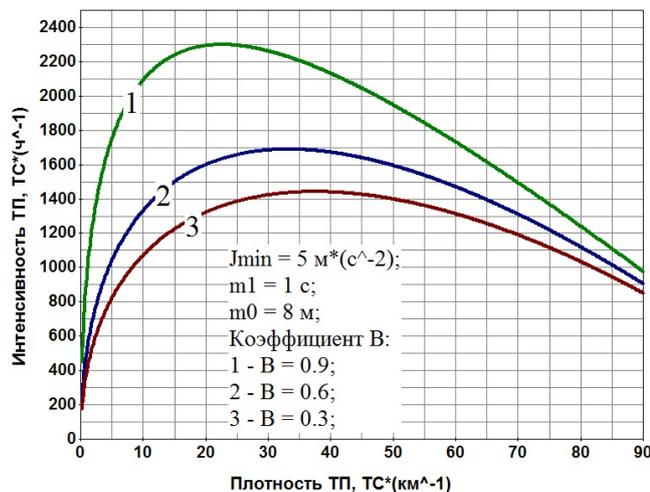


Рис. 7. Зависимость интенсивности ТП от плотности

5. Заключение

Результаты исследования ориентированы на решение прикладных задач в области управления дорожным движением на микро- и макроуровне с использованием различных вариаций моделей «следования за лидером» [3-8]. Проведенный анализ позволяет комплексно оценить влияние неоднородности ТП на его динамические характеристики. Предложенный коэффициент B имеет явный физический смысл, что позволяет управлять неоднородностью потока, например, через стандартизацию нормативов эффективности торможения ТС.

Открытая структура предложенных моделей позволяет любому исследователю провести параметрическую идентификацию самостоятельно. При этом автоами заложены базовые модели, позволяющие оценить

динамику ТП не только в условиях неоднородности технических характеристик ТС, но и в широком спектре условий внешней среды [1].

Предложенные алгоритмы успешно прошли комплексное программное тестирование.

Литература

1. Danilov O. F. Study on the Vehicle Linear Dynamic Interval in a Traffic Flow / O.F. Danilov, V.I. Kolesov, D.A. Sorokin, M.L. Gulaev. – Text : electronic // Communications - Scientific Letters of the University of Zilina. – 2021. – № 23 (1), p. E11-E22. – URL: <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.1.E11-E22> (date of the application 05.01.2022).

2. ГОСТ Р 51709-2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки : государственный стандарт Российской Федерации : издание официальное : принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 1 февраля 2001 г. N 47-ст : введен впервые : дата введения 2002-01-01 / разработан Государственным научно-исследовательским институтом автомобильного транспорта (НИИАТ), Научно-исследовательским центром по испытаниям и доводке автомобильной техники (НИЦИАМТ), Научно-исследовательским центром Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации (НИЦ ГИБДД МВД России). – Москва : Стандартинформ, 2010. – 86 с. – Текст : непосредственный.

3. SEARLE J. Equations for speed, time and distance for vehicles under maximum acceleration / J. SEARLE // In: Safety Technology session of the 1999 SAE International Congress and Exposition and is included in the SAE Special Publication, "Advances in Safety Technology 1999" (SP-1433): proceedings. Society of Automotive Engineers. – 1999. – p. 1-11. – Текст : непосредственный.

4. TREIBER M. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations / M. TREIBER, A. HENNECKE, D. HELBING. – Text : electronic // Physical Review E. – 2000. – № 62 (2), 1805. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805> (date of the application 05.01.2022)

5. JIANG R. Full velocity difference model for a car-following theory / R. JIANG, Q. WU, Z. ZHU. – Text : electronic // Physical Review E. – 2001. – № 64 (1), 017101. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.017101> (date of the application 05.01.2022).

6. NEWELL G. F. A simplified car-following theory: a lower order model / G. F. NEWELL. – Text : electronic // Transportation Research Part B: Methodological. – 2002. – № 36 (3), p. 195-205. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(00\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(00)00044-8) (date of the application 05.01.2022).

7. OLSTAM J. J. Comparison of car-following models / J. J. OLSTAM, A. TAPANI. – Text : electronic // Swedish National Road and Transport Research Institute. – 2004. – URL: https://www.researchgate.net/publication/265198439_Comparison_of_Car-following_models (date of the application 05.01.2022).

8. RAKHA H. Validation of Van Aerde's simplified steady state car-following and traffic stream model / H. RAKHA. – Text : electronic // Transportation Letters - The International Journal of Transportation Research. – 2009. – № 1 (3), p. 227-244. – URL: <https://doi.org/10.3328/TL.2009.01.03.227-244> (date of the application 05.01.2022).

Сведения об авторах:

Данилов Олег Федорович - Заслуженный деятель науки РФ, Почетный работник высшего профессионального образования России, заведующий кафедры «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин» г.Тюмень, ул. Луначарского, 2, каб. 605. Индекс 625001.

Телефон: 8(3452) 68-10-09,
e-mail: danilovof@tyuiu.ru.

Колесов Виктор Иванович - Заслуженный работник высшей школы РФ, ведущий научный сотрудник. Тюменский индустриальный университет, кафедра «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин»,

Телефон: 8(3452) 68-10-09,
e-mail: vikolesov@yandex.ru.

Сорокин Денис Александрович - ассистент, кафедры «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин»

Телефон: 8(3452) 68-10-09,
e-mail: sorokinda@tyuiu.ru.

Гуляев Максим Леонидович - ассистент, кафедра «Автомобильного транспорта, строительных и дорожных машин», каб. 605.

Телефон: 8(3452) 68-10-09,
e-mail: gulyev_ml72@mail.ru.

Адрес университета: 625001 г.Тюмень, ул. Луначарского, 2, каб. 605.