



Математическая модель транспортного поведения на основе теории транспортных макросистем



Игорь АГУРЕЕВ



Андрей АХРОМЕШИН

*Игорь Евгеньевич Агуреев¹,
Андрей Владимирович Ахромешин²*

*^{1, 2} Тульский государственный университет (ТулГУ),
Тула, Россия.*

✉ ¹ agureev-igor@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

В продолжение исследования, целью которого была разработка нового подхода к определению транспортного поведения жителей городских агломераций, наметить главные пути его развития, предложено новое описание транспортного поведения с позиций самых разных научных дисциплин и теории макросистем.

Это, по мнению авторов, закладывает базис для создания теории транспортного поведения, которая в настоящее время отсутствует.

Разработана математическая модель транспортного поведения, которая основана на положениях теории макросистем академика Ю. С. Полкова, с использованием

энтропийного подхода при определении равновесного состояния транспортной системы. При этом в модели определён первоначальный список параметров, отвечающих за описание «транспортного поведения». Последнее рассматривается как коллективный феномен, создающий детерминированное представление, возникающее в результате взаимодействия множества стохастически действующих элементов (участников дорожного движения).

Составлена предварительная схема решения задачи о поиске неизвестных системы уравнений и неравенств в модели.

Ключевые слова: транспортная система, теория макросистем, транспортное поведение, математическая модель, энтропийный подход.

Благодарности. Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-48-710015/20 р._а.

Для цитирования: Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Математическая модель транспортного поведения на основе теории транспортных макросистем // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 6 (97). С. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-2>.

*Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.*



ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы

В статье [1] был представлен новый подход к определению транспортного поведения населения городских агломераций, намечены основные векторы развития данной тематики, а также предложен «новый подход к описанию транспортного поведения с позиций различных научных дисциплин, теории макросистем, что закладывает базис для создания теории транспортного поведения, которая в настоящее время отсутствует» [1]. *Цель* – «исследование транспортного поведения проводится на уровне «система в целом», а не отдельных её элементов, что позволяет формировать общие подходы к управлению транспортным поведением с целью достижения оптимальных характеристик функционирования транспортной системы города (агломерации). Математическое описание транспортной системы, представленное в работе, имеет общий вид, требует расширения и дополнения» [1].

Построение математических моделей на основе теории макросистем, в предположении о том, что любая транспортная система – это многокомпонентная неоднородная открытая система, «имеет научную новизну и перспективы для изучения и внедрения на практике в транспортной отрасли. Актуальной задачей на этом пути является изучение природы коллективного поведения с позиций влияния мотивов при принятии решения о поездке и возникновения пространственных структур перемещений пассажиров и транспортных средств, т.е. образование пассажиропотоков и потоков транспорта, а также рассмотрение понятия ТП с точки зрения психологии, социологии и урбанистики» [1]. При этом построение соответствующей математической модели должно каким-то образом отражать особенности индивидуального поведения на уровне системы в целом.

Настоящая работа является продолжением работы [1].

Формирование представления о передвижениях населения на данный момент складывается из четырёх типов поездок [2–5]: «передвижения от мест жительства к местам приложения труда и обратно (так называемые трудовые корреспонденции); передвижения от мест жительства к местам культурно-бытового обслуживания (магазинам и др.) и обратно; передвижения, совершаемые между местами приложений труда (деловые

поездки); передвижения, совершаемые между объектами культурно-бытового обслуживания. В литературе наиболее широко представлены следующие способы расчёта корреспонденций» [2]:

- нормативные [6];
- статистические [6];
- гравитационная модель [3];
- энтропийные модели [4; 5];
- модели самоорганизующихся потоков [7];
- метод конкурирующих центров [8];
- модель промежуточных возможностей Стоуффера [8] и др.

Выводы по рассмотренным выше публикациям могут быть сделаны следующие:

1) транспортное поведение может быть рассмотрено с различных позиций, а именно, с точки зрения факторов, обуславливающих выбор вида передвижения в соответствии с определёнными целями поездок;

2) транспортное поведение может быть исследовано различными методами, в частности, с помощью метода графов связей описывается общая картина подвижности индивидов по целям, времени, дальности поездки и виду используемого транспорта;

3) коллективное транспортное поведение есть результат взаимодействия отдельных транспортных процессов каждого из пассажиров;

4) имеется конструктивный термин «паттерн ежедневной индивидуальной активности пассажира», лежащий в основе изучения закономерностей в поведении пассажиров и согласующийся с предложенным ранее авторами в [1] понятием транспортной системы индивидуальных перемещений (ТСИП);

5) подтверждается целесообразность изучения транспортного поведения с помощью теории транспортных макросистем.

Важно отметить, что в отечественной и зарубежной литературе мало информации о том, как именно пассажир принимает решение о том, совершит он поездку или нет, то есть поведенческие модели практически не исследуются.

Краткие сведения о современном состоянии исследований транспортного поведения [9–14]

«Транспортное поведение имеет сложную природу, описание данного термина связано с определением понятий «транспортная подвижность (мобильность) населения» [1].

«Транспортное поведение как феномен отличается следующими свойствами, которые относятся к коллективному уровню его описания:

- 1) стохастическая природа;
- 2) множество участников, определяющих характеристики транспортного поведения;
- 3) множественность факторов выбора, формирующих динамику феномена;
- 4) междисциплинарность как база знаний для изучения данного предмета. Проблему транспортного поведения необходимо рассматривать тоже комплексно, исследовать не только в рамках транспортной науки (теории пассажирских перевозок), но и смежных областей знаний, таких как: социология, урбанистика, экономика» [1] и т. д.

В настоящей работе нас, прежде всего, интересуют измеримые параметры транспортного поведения, которые могли бы войти в состав математической модели как исходное данное, либо быть вычисленными с её помощью. К таким параметрам следует отнести:

- 1) коэффициент расщепления по видам транспорта, используемым населением на моделируемом отрезке времени;
- 2) коэффициент расщепления по целям поездки;
- 3) распределение корреспонденций по конкретным маршрутам;
- 4) коэффициент пересадочности;
- 5) распределение поездок по дальности;
- 6) распределение времени ожидания пассажиров на остановочных пунктах;
- 7) пассажирообмены на остановочных пунктах как функция времени и др.

Необходимый и достаточный перечень параметров, которые однозначно характеризуют транспортное поведение в составе математической модели, предстоит выявить и обосновать в результате дальнейших исследований и расчётов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Математическая модель транспортного поведения (вариант)

Транспортное поведение в целом может быть описано с помощью математического аппарата теории макросистем, так как транспортное поведение индивидуального пассажира (как элемента ТСИП) «имеет случайную природу, практически не подвергается описанию, а в некоторых случаях и логике. Поведение одного пассажира

имеет частный случай», в то «время, как практический интерес для управления, планирования и развития транспортной системы города (агломерации) представляет описание транспортного поведения групп пассажиров с целью выдачи практических рекомендаций» [1].

В статье [1] приведена математическая модель, которая в наиболее общем случае описывает транспортную систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ q = q(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\ V(t) = \left\{ V_1, \dots, V_\alpha, \dots, V_p : V_\alpha = \sum_{v=1}^{v_f} n_v(t) \mid v \in P_\alpha \right\}; \\ v = 1, \dots, v_f(t); \\ \pi_v = \pi_v(t); \\ \Pi(t) = \{ \pi_1(t), \dots, \pi_\alpha(t), \dots, \pi_{v_f}(t) \}; \\ G(t) = g, \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(V \bullet (\Delta\tau_k)) = - \sum_{n=1}^m V_n \ln \frac{V_n}{a_n} - (G_n + V_n) \ln(G_n + V_n) \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (1)$$

где k – индекс (номер) интервала времени $\Delta\tau_k$;

K – число временных интервалов $\Delta\tau_k$;

$\tilde{\Gamma}$ – граф УДС;

ρ – матрица транспортных связей;

q – матрица действующих провозных (пропускных) способностей;

t – непрерывное время;

$V(t)$ – множество, каждый из элементов которого равен числу автомобилей (транспортных средств), находящихся в момент времени t на маршруте (или формирующих корреспонденцию) α ;

v – индекс автомобиля (его уникальный идентификатор);

$v_f = N_\alpha$ – наибольший индекс автомобиля, соответствующий количеству транспортных средств в текущий момент времени;

p – общее число маршрутов (корреспонденций);

n_v – булева переменная, которая определяется соотношением (2) и равна 1, если ТС находится на маршруте p_α и 0 в противном случае;

p_α – α -й маршрут;

π_v – уравнение транспортного процесса для автомобиля, определяющее долю выполненного транспортного процесса (транспортной работы);

$\Pi(t)$ – множество, состоящее из отдельных уравнений транспортного процесса;



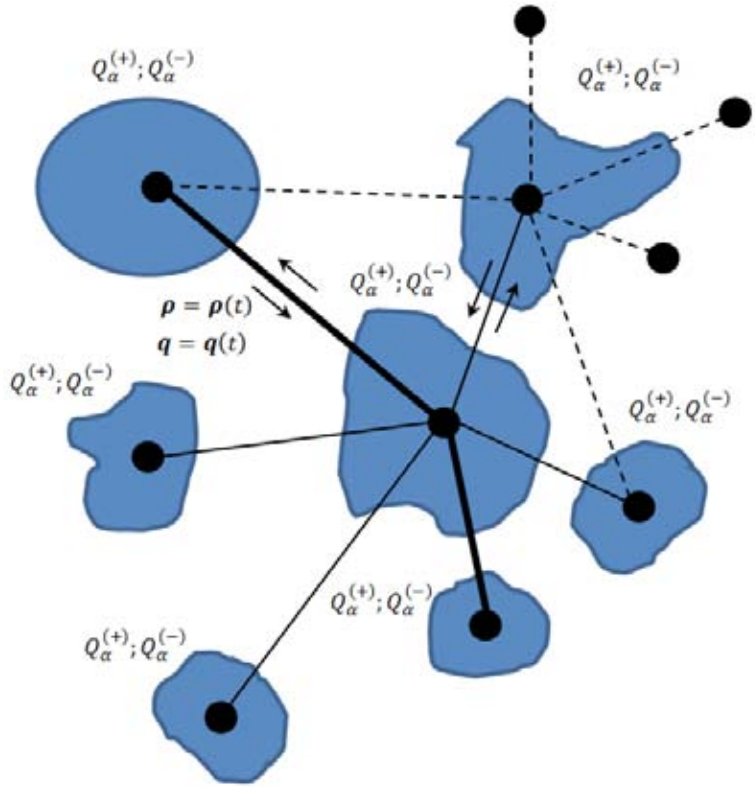


Рис. 1. Схема транспортных связей (корреспонденций) между районами [выполнено авторами].

- β – индекс транспортного процесса;
- $G(t)$ – векторная функция расходования ресурса (-ов);
- g_n – вектор удельных расходов ресурса для каждого автомобиля;
- H – информационная энтропия транспортной системы;
- G^* – вектор ограничений на расход ресурсов;
- a_n – априорные вероятности нахождения элемента в состоянии n ;
- G_n – ёмкость состояния n ;
- n – порядковый номер состояния элементов;
- m – общее число различных состояний.

В теории макросистем существует несколько способов заполнения состояний системы (Ю. С. Попков [5]). Для расчёта информационной энтропии H в системе (1) выбрана статистика Эйнштейна–Бозе как наиболее предпочтительная. Данная статистика означает, что в одном и том же состоянии может находиться большое (в пределе – бесконечное) число элементов. Например, на одном и том же маршруте одновременно может находиться достаточно большое число транспортных средств, чтобы обоснованно применять данную статистику.

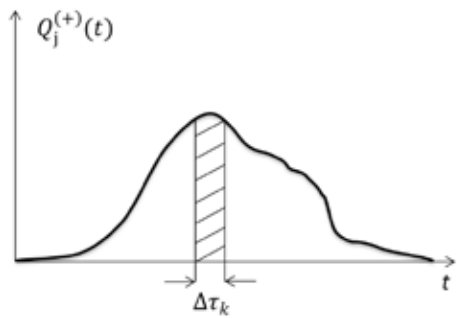


Рис. 2. Зависимость интенсивности источника транспорта [выполнено авторами].

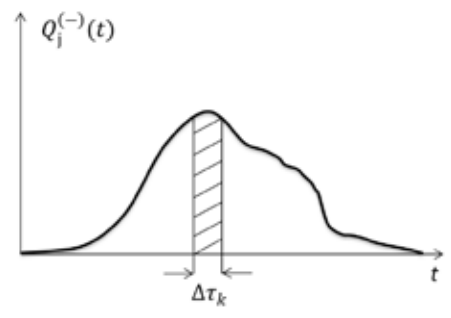


Рис. 3. Зависимость интенсивности стока транспорта [выполнено авторами].

Система уравнений и ограничений (1) решается численными методами с целью поиска равновесного состояния (максимум информационной энтропии), которое даёт распределение элементов множества $V(t)$ по корреспонденциям. Эти элементы являются основными неизвестными системы (1).

Схема корреспонденций в системе представлена на рис. 1.

Далее,

$$n(t) = f(x) = \begin{cases} 1, v \in p_\alpha \\ 0, v \notin p_\alpha \end{cases} \quad (2)$$

Для замыкания системы (1) к ней необходимо добавить ряд элементов:

1) Характеристики источников транспорта могут быть записаны в виде (3) и дают возможность рассчитать число транспортных средств (ТС), «сгенерированных» за любой интервал времени (рис. 2 и 4):

$$Q_i^{(+)} = Q_i^{(+)}(t); \quad (3)$$

2) Характеристика стока (центра поглощения, центра массового тяготения), находящегося в конце маршрута α (рис. 3);

3) Уравнение баланса автомобилей, находящихся на маршруте α :

$$V_\alpha \Big|_{\Delta\tau_k} = V_\alpha \Big|_{\Delta\tau_{k-1}} + \Delta V_\alpha^{(+)} \Big|_{\Delta\tau_k} - \Delta V_\alpha^{(-)} \Big|_{\Delta\tau_k}, \quad (4)$$

где учитывается количество автомобилей, вышедших на маршрут на отрезке времени $\Delta\tau_k$ (рис. 2):

$$\Delta V_\alpha^{(+)} \Big|_{\Delta\tau_k} = \int_{\Delta\tau_k} Q_\alpha^{(+)}(t) dt. \quad (5)$$

Количество автомобилей, закончивших транспортный процесс маршрута на отрезке времени $\Delta\tau_k$ (рис. 3):

$$\Delta V_\alpha^{(-)} \Big|_{\Delta\tau_k} = \int_{\Delta\tau_k} Q_\alpha^{(-)}(t) dt. \quad (6)$$

Таким образом, переменными величинами, требующими вычислений, в модели (1) являются члены множеств: а) $V(t)$; б) $\Pi(t)$.

Для поиска неизвестных необходимо на каждом шаге $\Delta\tau_k$ решать задачу, содержащую расчет:

- 1) $Q_i^{(+)}$;
- 2) $Q_i^{(-)}$, то есть объемы отправок и прибытий для всех транспортных районов;
- 3) H_{\max} – максимальное значение энтропии, при соответствующем распределении элементов множеств $V(t)$ по маршрутам p_α предположительно учитывающее только те транспортные средства, которые достигли цели поездки ($\pi_v = 1$);
- 4) элементов множества $\Pi(t)$, что требует дополнительных условий о скорости движения транспортных средств;

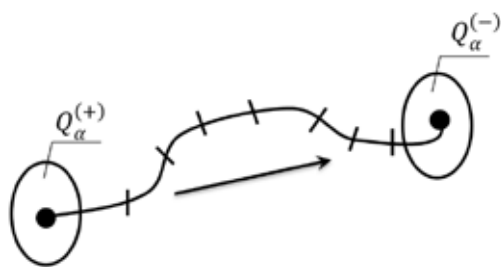


Рис. 4. Схема маршрута [выполнено авторами].

5) априорных вероятностей, которые предположительно отражают обобщенную стоимость (цену) поездки.

Таким образом, дополнительно требуется ввести в описание формулу для расчета априорных вероятностей $p_1, p_2, \dots, p_\alpha$, а также способ учета e_β^* (обобщенная цена поездки).

ВЫВОДЫ

Разработанная в настоящей работе в рамках макросистемного подхода [15] математическая модель транспортного поведения на данном этапе требует в качестве априорной информации знания следующих параметров:

- 1) коэффициента расщепления по видам транспорта, используемым населением на моделируемом отрезке времени;
- 2) коэффициента расщепления по целям поездки;
- 3) распределения корреспонденций по конкретным маршрутам.

Предполагается, что данная модель позволит определить в результате расчётов:

- 1) коэффициент пересадочности;
- 2) распределение поездок по дальности;
- 3) распределение времени ожидания пассажиров на остановочных пунктах;
- 4) пассажирообмены на остановочных пунктах как функцию времени и др.

Безусловно, в ближайшей перспективе следует получить ответы на вопросы о том, каким образом будет рассчитываться матрица корреспонденций для предложенной модели [16–18], а также о применимости энтропийных методов решения задач о равновесии транспортной системы к современным городским системам [19–23].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агурев И. Е., Ахромешин А. В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 2. – С. 60–70. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.



2. Алиев А. С., Стрельников А. И., Швецов В. И., Шершевский Ю. 3. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к московской агломерации // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 11. – С. 113–125. [Электронный ресурс]: http://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=at&paperid=1465&what=fullt&option_lang=rus. Доступ 19.11.2021.
3. Carrothers, G. A. P. An Historical Review of the Gravity and Potential Concepts of Human Interaction. Journal of the American Planning Association, 1956, Vol. 22, pp. 94–102. DOI: 10.1080/01944365608979229.
4. Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем / Пер. с англ. – М.: Наука, 1978. – 247 с.
5. Попков Ю. С. Теория макросистем: Равновесные модели. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 320 с. ISBN 5-8360-0035-2.
6. Васильева Е. В., Игудин Р. В., Лившиц В. Н. Оптимизация планирования и управления транспортными системами. – М.: Транспорт, 1987. – 207 с.
7. Васильева Е. В., Левит Б. Ю., Лившиц В. Н. Нелинейные транспортные задачи на сетях. – М.: Финансы и статистика, 1972. – 103 с.
8. Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 11. – С. 3–46. [Электронный ресурс]: http://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=at&paperid=1966&what=fullt&option_lang=rus. Доступ 19.11.2021.
9. Фёдоров В. А. Транспортное поведение индивидуумов – основной источник городских транспортных проблем // Молодой учёный. – 2015. – № 18 (98). – С. 309–316. [Электронный ресурс]: <https://moluch.ru/archive/98/21292/>. Доступ 19.11.2021.
10. Мулеев Е. Ю. «Транспортное поведение», «Подвижность», и «Мобильность»: к вопросу о концептуальности терминов // Социологический журнал. – 2015. – Т. 21. – № 3. – С. 8–28. DOI: <https://doi.org/10.19181/socjour.2015.21.3.2375>.
11. Савельева В. Ю. Факторы формирования транспортного поведения в крупнейших городах России // Журнал «Градостроительство». – Всесоюзный научно-исследовательский институт проблем научно-технического прогресса информации в строительстве (Москва). – 2018. – № 5 (57). – С. 54–62. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35781220>. Доступ 19.11.2021.
12. Мулеев Е. Ю. Транспортное поведение населения России: краткий отчёт о социологическом исследовании. – М.: Институт экономики транспорта и транспортной политики НИУ ВШЭ, 2015. – 37 с. [Электронный ресурс]: https://www.hse.ru/data/2015/03/10/1093862032/Транспортное%20поведение%20населения%20РФ_2014.pdf. Доступ 19.11.2021.
13. Mobility in cities database. Synthesis report. UITP, 2015. [Электронный ресурс]: https://cms.uitp.org/wp-content/uploads/2020/06/MCD_2015_synthesis_web_0.pdf. Доступ 27.12.2021.
14. Quan Liang; Jiancheng Weng; Wei Zhou; Selene Baez, Santamaria; Jianming Ma; Jian Rong. Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction. Hindawi Journal of Advanced Transportation, Vol. 2018, Article ID 3859830. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3859830>.
15. Агуреев И. Е. Развитие теории макросистем как необходимое условие повышения качества транспортного моделирования // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 6–20. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-06-20>.
16. Гасников А. В., Гасникова Е. В., Мендель М. А., Чепурченко К. В. Эволюционные выводы энтропийной модели расчёта матрицы корреспонденций // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28. – С. 1–16. [Электронный ресурс]: http://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=mm&paperid=3724&what=fullt&option_lang=rus. Доступ 19.11.2021.
17. Имельбаев Ш. С., Шмульян Б. Л. Моделирование стохастических коммуникационных систем // Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: Наука, 1978. – С. 170–233. [Электронный ресурс]: http://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=at&paperid=7358&what=fullt&option_lang=rus. Доступ 19.11.2021.
18. Гасникова Е. В. О возможной динамике в модели расчёта матрицы корреспонденций // Введение в математическое моделирование транспортных потоков / Под ред. А. В. Гасникова и др. – 2-е изд. – М.: Московский центр непрерывного математического образования, 2013. – С. 248–270. ISBN 9785443921501. [Электронный ресурс]: <https://ru.pt1lib.org/dl/2899886/f9150c>. Доступ 19.11.2021.
19. Нестеров Ю. Е., Шпирко С. В. Стохастическое транспортное равновесие // Введение в математическое моделирование транспортных потоков / Под ред. А. В. Гасникова и др. – 2-е изд. – М.: Московский центр непрерывного математического образования, 2013. – С. 314–324. ISBN 9785443921501. [Электронный ресурс]: <https://ru.pt1lib.org/dl/2899886/f9150c>. Доступ 19.11.2021.
20. Wilson, A. G. Complex Spatial Systems: The Modelling Foundations of Urban and Regional Analysis. London, New York, 2000. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315838045>.
21. Dearden, J., Wilson, A. Exploring urban retail phase transition – 1: an analysis system. UCL, Working Papers Series, July, 2008. Paper 140. [Электронный ресурс]: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/15193/1/15193.pdf>. Доступ 19.11.2021.
22. Wilson, A. G. The «Thermodynamics» of City: Evolution and Complexity Science in Urban Modelling. In: Complexity and Spatial Networks, Advances in Spatial Science. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 11–31. DOI: 10.1007/978-3-642-01554-0_2.
23. Purvis, B., Mao, Yo., Robinson, D. Entropy and its Application to Urban Systems. Entropy, 2019, Vol. 21, 56 p. DOI: 10.3390/e21010056. ●

Информация об авторах:

Агуреев Игорь Евгеньевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой автомобилей и автомобильного хозяйства Тульского государственного университета (ТулГУ), Тула, Россия, agureev-igor@yandex.ru.

Ахромешин Андрей Владимирович – докторант кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Тульского государственного университета (ТулГУ), Тула, Россия, aakhromeshin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 07.11.2021, одобрена после рецензирования 20.12.2021, принята к публикации 27.12.2021.