

## ТРАНСПОРТ

УДК 656

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-30-35

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТРАНСПОРТНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ И ПОТОКОВ

*д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)  
**В.В. КАСЬЯНИК**

(Брестский государственный технический университет)  
*д-р техн. наук, доц. А.Г. БАХАНОВИЧ*  
(Министерство образования Республики Беларусь, Минск)  
*д-р техн. наук, проф. Г.М. КУХАРЕНКО*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Рассмотрены вопросы оценки и выявления заторовых и предзаторовых ситуаций на примере магистралей крупнейшего города, а также выявления мест изменения качества дорожного движения на различных участках улично-дорожной сети на основе модели Хермана–Пригожина.*

**Ключевые слова:** *качество дорожного движения, моделирование, модель Хермана–Пригожина.*

**Введение.** Оценка качества дорожного движения была и остается одной из самых неразрешенных проблем. Дело в том, что совокупное качество дорожного движения определяется несколькими свойствами, в первую очередь аварийностью, экологичностью, экономичностью и социологичностью, оценивая степень соответствия дорожного движения своему назначению. Для оценки *аварийности* используются абсолютные, относительные, удельные и сравнительные показатели [1–4]. Оценка *экологичности* дорожного движения осуществляется по двум факторам: приведенному (к CO) объему выбросов вредных веществ в атмосферу и уровню эквивалентного транспортного шума. При оценке выбросов используется удельный (кг (CO)/км) объем выбросов, произведенный транспортным потоком, и объем выбросов, приведенный непосредственно к потребителю: водителям, пассажирам, пешеходам и жителям (посетителям) близлежащих зданий [4; 5]. В работе<sup>1</sup> оценку выбросов предлагается осуществлять отдельно по каждому (примерно 30) из веществ, что не позволяет выполнить ее из-за бесконечного множества возможных комбинаций. Оценка транспортного шума проводится, как правило, по его уровню, приведенному к потребителям [5]. Оценка экономичности дорожного движения выполняется по нескольким критериям, важнейшими из которых являются удельная (на один автомобиль) задержка и удельная остановка<sup>2; 3</sup> [6–10 и др.]. Часто используются суммарные (для всего потока) значения этих показателей. Д. Дрю [9] предложил, пожалуй, самый универсальный на сегодня оценочный критерий качества дорожного движения – «уровень обслуживания» (LOS – Level of Service). Под уровнем обслуживания понимают качественное состояние транспортного потока, при котором устанавливаются характерные условия движения. Разработаны классификации уровней обслуживания для загородных дорог, городских улиц и пешеходного движения. Уровни обслуживания и методики их применения вошли во все издания американского руководства по регулированию – Highway Capacity Manual<sup>2</sup> (НСМ 1950, 1965, 1985, 2000 и др.), и постоянно совершенствуются. Одним из недостатков рассматриваемого критерия является его в целом качественная оценка и трудность, а иногда и невозможность количественной оценки эффективности отдельных решений. В [10] рекомендован оценочный критерий «уровень удобства движения», зависящий от нескольких факторов и очень напоминающий «уровень обслуживания». Приведена классификация уровней удобства, согласно которой транспортные потоки делятся на свободные, частично связанные, связанные и плотные (насыщенные). К сожалению, приведенная классификация недостаточно проработана, что делает проблематичным ее практическое использование.

<sup>1</sup> ТКП 17.08-03-2006(02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов механическими транспортными средствами в населенных пунктах = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Атмасфера. Выкіды забруджвальных рэчываў і цяплічных газаў у атмасфернае паветра. Правілы разліку выкідаў механічнымі транспартнымі сродкамі ў населенных пунктах. – Минск: БелНИЦ «Экологія». – 18 с.

<sup>2</sup> Highway Capacity Manual / TRB. NRC. – Washington, 2000. – 1134 p. URL: [https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway\\_capacital\\_manual.pdf](https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway_capacital_manual.pdf)

<sup>3</sup> Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen / Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. – Köln: FGSV, 2005. – 384 s.

Ю.А. Врубель [3] представил новый универсальный оценочный критерий – «потери в дорожном движении», под которыми понимается социально-экономическая стоимость *невынужденных* издержек процесса движения. Этот критерий применим для оценки качества как дорожного движения в целом, так и отдельных его свойств.

С появлением современных технологий определения местоположения, таких как GPS и Глонас, для решения задач оценки параметров ТП на магистралях и УДС началось более активное применение двухжидкостной модели ТП Хермана–Пригожина [11; 12]. В качестве основных характеристик ТП для расчетов с использованием двухжидкостной математической модели Хермана–Пригожина рассматриваются: интенсивность, объем движения, средняя скорость движения, время сообщения, коэффициент загрузки движением. С использованием данной модели определяются нелинейные зависимости между удельным временем в пути, затрачиваемым на единицу расстояния, и удельным временем задержек на единицу расстояния. Модель Хермана–Пригожина привлекательна для практического использования, поскольку по сравнению с другими моделями она легко применима при проведении регулярных обследований условий дорожного движения. Модель двух потоков представляет макроскопическое измерение качества функционирования дорожной сети.

**Основная часть.** *GPS-мониторинг транспорта* – одна из разновидностей систем спутникового мониторинга транспорта, основанная на использовании американских спутников GPS.

Принцип мониторинга заключается в отслеживании и анализе пространственных и временных координат транспортного средства. Существует два варианта мониторинга: «on-line» (с дистанционной передачей координатной информации) и «off-line» (информация считывается по прибытию на диспетчерский пункт). На транспортном средстве устанавливается мобильный модуль, состоящий из следующих частей: приемник спутниковых сигналов, модули хранения и передачи координатных данных. Программное обеспечение мобильного модуля получает координатные данные от приемника сигналов, записывает их в модуль хранения и по возможности передает посредством модуля передачи. Мобильный модуль может быть построен на основе приемников спутникового сигнала, работающих в стандартах NAVSTAR, GPS или ГЛОНАСС.

Сбор данных о характеристиках треков транспортных средств, получаемых с навигационного оборудования, может осуществляться двумя методами:

- пассивный эксперимент, при котором осуществляется сбор выборочных данных по совокупности случайных маршрутов движения автомобилей, располагающих бортовыми навигационными системами (GPS или ГЛОНАСС-оборудованием), с последующей привязкой треков к ГИС-карте города;

- активный эксперимент, при котором сбор данных осуществляется автомобилем-лабораторией на заранее выбранных маршрутах движения по УДС.

Методика пассивного эксперимента наряду с использованием модели Хермана–Пригожина позволяет оценить параметры транспортного потока и построить систему поддержки принятия решений для управления перевозками, выбором маршрутов движения и оценки возможных изменений в транспортной системе.

От качества организации дорожного движения зависят сегодня практически все сферы деятельности государства. Работа в области повышения качества организации дорожного движения начинается с оценки существующей ситуации на магистралях, улицах городов, поэтому разработка современных программных систем для оценки и анализа условий дорожного движения с использованием новых технологий достаточно актуальна.

Появление новых технологий распределенного сбора, хранения и обработки сверхбольших объемов данных, методологии Data Mining позволяют современным программным системам собирать и обрабатывать статистический материал, получая новые результаты, недоступные технологиям ранее. Применение таких программных систем к исследованиям существующей дорожной сети дает возможность лицам, принимающим решения, адекватно и количественно обосновывать свои решения. Это приводит к устранению проблем в узких местах дорожной сети, позволяет уменьшить удельную стоимость принятых мер, а также в режиме реального времени отслеживать изменения, происходящие в улично-дорожной сети.

Разработанная программная система предназначена в первую очередь для специалистов по оценке транспортных потоков, влияния условий дорожного движения на производительность всей сети, анализу возможностей наращивания или перераспределения транспортных потоков между магистральными линиями.

При выполнении данной работы для анализа использовались обезличенные данные о треках в формате csv, полученные с навигационного оборудования, установленного на транспортных средствах нескольких компаний (треки были предоставлены ОАО «АГАТ – системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления»). Для их обработки был написан модуль, позволяющий обрабатывать большие объемы данных из предоставленных файлов. Эти данные содержат следующую информацию: дата, время, идентификатор автомобиля, широта, долгота, скорость.

Для каждого кластера приведена краткая характеристика дорожных условий, определенная на основании анализа показателей для других городов. Сравнения показатели различных городов, можно сделать вывод о характеристиках организации дорожного движения в г. Минске. Так, была определена степень влияния нагрузки транспортного потока на качество обслуживания. Кроме того, полученная кластеризация маршрутов была применена для отображения маршрутов на карте в различной цветовой дифференциации в зависимости

от класса маршрута. Это позволяет визуально выделить участки дорог с различными дорожными условиями. Результаты визуализации приведены на рисунке 1.

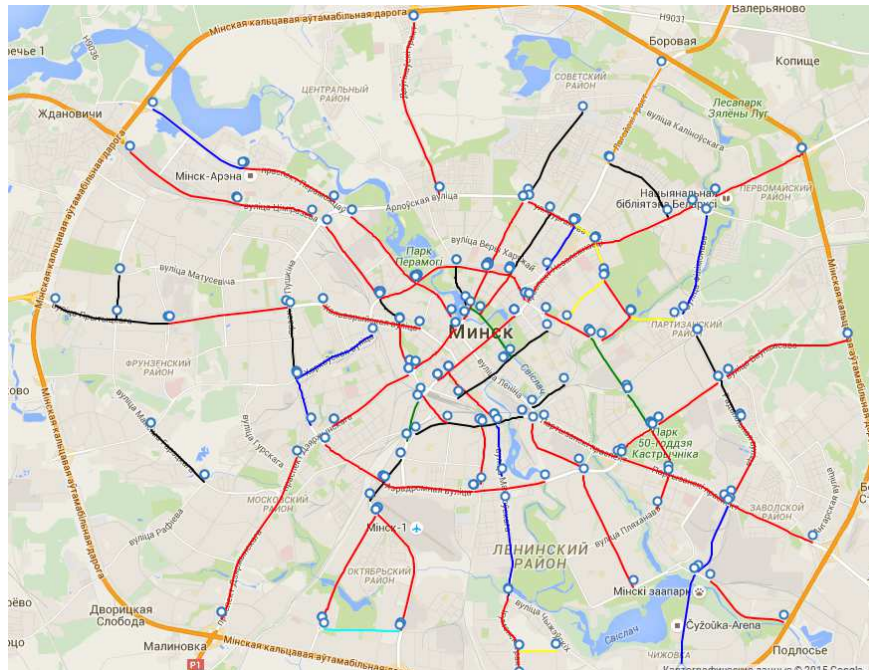


Рисунок 1. – Цветовая дифференциация маршрутов по классам

По нажатию на маршрут (начало или конец маршрута) есть возможность получить информацию о данном маршруте вместе с графиком в движении и остановках авто. Данная возможность продемонстрирована на рисунке 2.

На данном рисунке можно увидеть зависимость времени от номера трека. Синим цветом на рисунке изображено общее время движения каждого участника, зеленым – время в движении (без времени стояния). Таким образом, визуально можно определить адекватность треков по разрывам между общим временем и временем в движении.

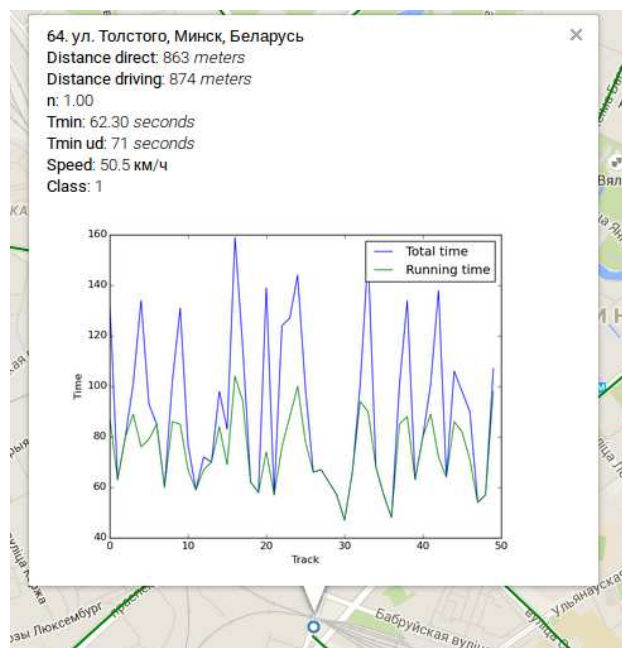


Рисунок 2. – Краткая информация о маршруте

В результате тестирования подсистемы кластеризации была получена классификация улиц г. Минска по качеству организации дорожного движения, определены проблемные улицы и визуализированы результаты.

Важным применением полученной системы является оценка международных и республиканских транспортных коридоров. Данная система позволяет получить численные показатели качества обслуживания для магистралей. Эта информация может применяться для поддержки принятия решений по перераспределению транспортных потоков в пределах транспортных коридоров, анализу их нагрузки и возможностей обслуживания. Для тестирования данного функционала системы из набора треков был выбран участок магистрали М-1 Кобрин–Держинск (рисунок 3).

bysaferyindex: [Map](#) [Add street](#)

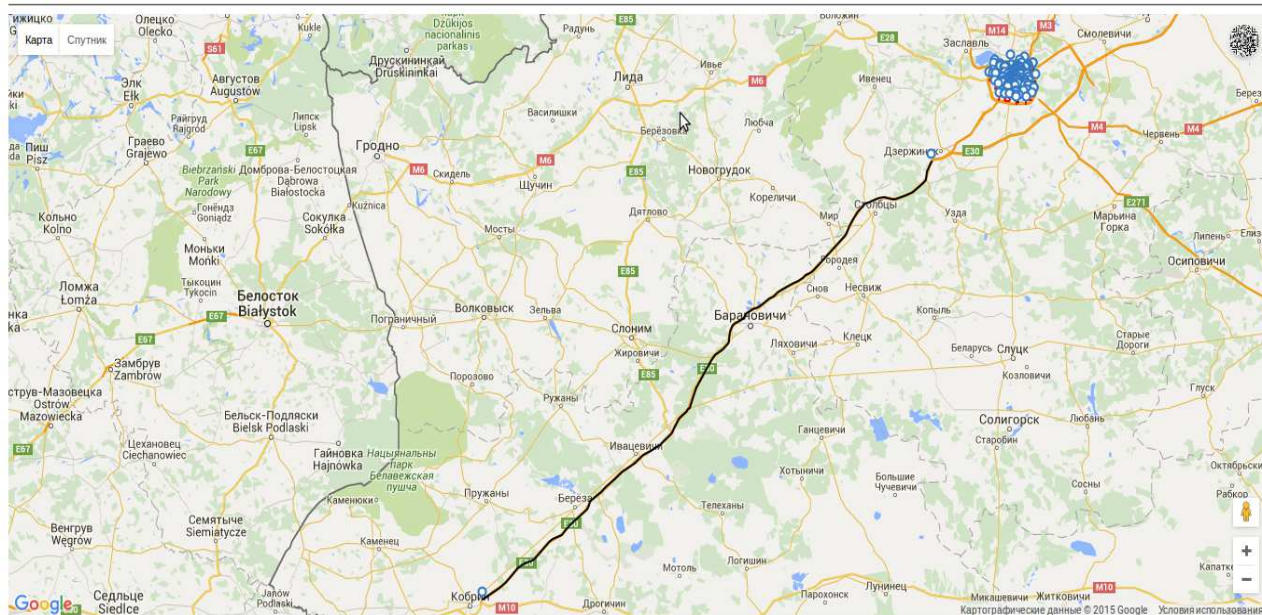


Рисунок 3. – Участок международной магистрали М-1, выбранный для анализа

Для данного участка трассы был произведен расчет параметров модели Хермана–Пригожина. Отчет по результатам параметров модели представлен на рисунке 4.

```

=====
Номер маршрута: 230
Адрес: Е30, Держинск–Кобрин, Беларусь
Начальная точка: [53.64997988644802, 27.07310199737549]
Конечная точка: [52.23320757003185, 24.430932998657227]
Расстояние по прямой: 236813 метра(ов)
Расстояние по дороге: 246949 метра(ов)
Скорость: 80.8 км/ч
-----
#   TT      RT      logTT      logRT      TT*TT      TT*RT      x-avg (x)      (x-avg (x) ) ^2
1   18686.014942.09.6605238737726   9.6119313185357   93.3257215157306   92.8562919757772   0.1298575119255   0.0168629734035
2   11637.011628.09.3619449561081   9.3611712616788   87.6460133611975   87.6387700765374   -0.1687214057390   0.0284669127546
3   14062.012944.09.6512314027591   9.4683876392983   91.2260213090517   90.4347613539618   0.0205650409120   0.0004229209077
4   13398.012620.09.5028607210682   9.4430381360952   90.3043618840211   89.7358761910483   -0.0278056407789   0.0007731536591
5   15686.014942.09.6605238737726   9.6119313185357   93.3257215157306   92.8562919757772   0.1298575119255   0.0168629734035
6   12669.012669.09.4469133436021   9.4469133436021   89.2441717215265   89.2441717215265   -0.0837530182451   0.0070145680652
-----

x - logTT      y - logRT

Подгоночные параметры для y=kx+b
k      =      0.822026497023356
b      =      1.656101885896788

Параметры модели Германа-Пригожина
n      =      4.618813942945377
Tmin   =      10996.456542833406274
Tmin_ud =      44.529261275945260

Статус: ОК
=====
    
```

Рисунок 4. – Отчет по результатам расчета параметров Хермана–Пригожина



Согласно отчету, данный участок имеет длину 246 км, средняя скорость транспортных средств на данном участке составляет 81 км/ч. Качество обслуживания для данного участка равно 4,61, что соответствует сильно-му влиянию интенсивности на качество обслуживания по ранее приведенной классификации. Таким образом, на данном участке магистрали при увеличении нагрузки средняя скорость движения будет сильно уменьшаться, а время проезда увеличиваться. В связи с исключительной важностью данной магистрали необходимо рассматривать варианты совершенствования инфраструктуры магистрали для уменьшения влияния нагрузки на качество обслуживания.

**Заключение.** В рамках данной работы была разработана программная система, включающая в себя модули сбора навигационных данных, хранения, верификации данных треков, управления данными улиц или дорог, расчета показателей модели Хермана–Пригожина и классификации улиц по данным параметрам. В результате тестирования программной системы были получены результаты, подтверждающие работоспособность разработанного программного обеспечения. Также в результате использования полученного инструмента к навигационным данным, собранным в Республике Беларусь, а именно для г. Минска, была продемонстрирована способность программной системы выделять классы улиц с различными условиями организации дорожного движения и влияния нагрузки транспортного потока на пропускную способность. Таким образом, данный инструмент может быть применен для анализа транспортных коридоров, основных магистралей и улиц города с целью нахождения участков первостепенной важности, которые требуют модернизации и усовершенствования.

Основным достоинством разработанной системы является возможность работы как с уже собранными навигационными данными, так и сбор параметров с использованием специально разработанного мобильного приложения для ОС Android. Использование для хранения больших объемов данных облачного хранилища, а для расчетов и обработки веб-приложения позволяет сделать систему веб-сервисом. Применение такого решения в структуре современных транспортных компаний и государственных органов даст возможность в перспективе улучшить механизм принятия решения в процессе выбора дорог для модернизации.

Дальнейшее развитие системы требует исследований в области повышения производительности подсистем обработки и хранения данных. Рост количества данных о треках положительно сказывается на увеличении статистической достоверности полученных данных, поэтому необходимо улучшить производительность с точки зрения увеличения объема обработанных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения. – М.: Транспорт, 1982. – 288 с.
2. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.: вкл.
3. Врубель Ю.А. Потери в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2003. – 380 с.
4. Elvik R. Cost-benefit analysis of road safety measures: applicability and controversies // *Accident Analysis and Prevention*. – 2001. – Vol. 33(1). – P. 9–17. DOI: 10.1016/s0001-4575(00)00010-5
5. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
6. Михайлов А.Ю., Головных И.М. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.
7. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: в 2 ч. – Минск: Белорус. фонд безопасности дорожного движения, 1996. – Ч. 1. – 328 с.
8. *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice* / Anthony E. Boardman, David H. Greenberg, Aidan R. Vining et al. – 3rd ed. – New Jersey: Prentice Hall, 2005. – 560 p.
9. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими / пер. с англ. Е.Г. Коваленко и Г.Д. Шермана; под ред. Н.П. Бусленко. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
10. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
11. Prigogine I., Herman R. *Kinetic theory of vehicular traffic*. – New York: Elsevier, 1971. – 100 p.
12. Herman R., Prigogine I. A Two-Fluid Approach to Town Traffic // *Science*. – 1979. – Vol. 204. – P. 148–151. DOI: 10.1126/science.204.4389.148

#### REFERENCES

1. Babkov, V.F. (1982). *Dorozhnye usloviya i bezopasnost' dvizheniya*. Moscow: Transport. (In Russ.)
2. Kapskii, D.V. (2008). *Prognozirovaniye aviariynosti v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
3. Vruble', Yu.A. (2003). *Poteri v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
4. Elvik, R. (2001). Cost-benefit analysis of road safety measures: applicability and controversies. *Accident Analysis and Prevention*, 33(1), 9–17. DOI: 10.1016/s0001-4575(00)00010-5 (In Engl.)
5. Vruble', Yu.A., Kapskii, D.V. & Kot, E.N. (2006). *Opredeleniye poter' v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
6. Mikhailov, A.Yu. & Golovnykh, I.M. (2004). *Sovremennyye tendentsii proektirovaniya i rekonstruktsii ulichno-dorozhnykh setei gorodov*. Novosibirsk: Nauka. (In Russ.)
7. Vruble', Yu.A. (1996). *Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya: v 2 ch. Ch. 1*. Minsk: Belorusskii fond bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. (In Russ.)

8. Boardman, Anthony E., Greenberg, David H., Vining, Aidan R. & Weimer, David L. (2005). *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice*. New Jersey: Prentice Hall. (In Engl.)
9. Dryu, D. (1972). *Teoriya transportnykh potokov i upravlenie imi. [Theory of traffic flows and their management]*. Moscow: Transpopt. (In Russ.)
10. Sil'yanov, V.V. (1977). *Teoriya transportnykh potokov v proektirovanii dorog i organizatsii dvizheniya.* – Moscow: Transport. (In Russ.)
11. Prigogine, I. & Herman, R. (1971). *Kinetic theory of vehicular traffic*. New York: Elsevier. (In Engl.)
12. Herman, R. & Prigogine, I. (1979). A Two-Fluid Approach to Town Traffic. *Science*, (204), 148–151. DOI: 10.1126/science.204.4389.148 (In Engl.)

Поступила 16.08.2023

## MATH MODELING TRANSPORT CORRESPONDENCE AND FLOWS

**D. KAPSKII**

*(Belarusian National Technical University, Minsk)*

**V. KASYANIK**

*(Brest State Technical University)*

**A. BAKHANOVICH**

*(Ministry of Education of the Republic of Belarus, Minsk)*

**G. KUKHARENOK**

*(Belarusian National Technical University, Minsk)*

*The issues of assessing and identifying congestion and pre-congestion situations on the example of highways of the largest city, as well as identifying places of change in the quality of traffic in various sections of the road network based on the Herman–Prigozhin model, are considered.*

**Keywords:** *traffic quality, modeling, Herman–Prigozhin model.*