

**Волков В.П.<sup>1</sup>,  
Грицук И.В.<sup>2</sup>,  
Володарец Н.В.<sup>3</sup>,  
Волкова Т.В.<sup>1</sup>,  
Погорлецкий Д.С.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Харьковский национальный  
автомобильно-дорожный  
университет,  
г. Харьков, Украина

**E-mail:** tesa@khadi.kharkov.ua

<sup>2</sup>Херсонская государственная  
морская академия,  
г. Херсон, Украина

**E-mail:** gritsuk\_iv@ukr.net

<sup>3</sup>Украинский государственный  
университет железнодорожного  
транспорта,  
г. Харьков, Украина

**E-mail:** kart@kart.edu.ua

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ И ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 629+656+004.94

*В работе рассмотрен процесс моделирования транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники для участка транспортной сети. Моделирование совокупности участков сети позволит выбрать в дальнейшем оптимальный маршрут следования транспортного средства исходя из поставленной задачи оптимизации. Создана соответствующая имитационная модель в программной среде AnyLogic, которая проверена на адекватность.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, условия эксплуатации, транспортная техника, средства транспорта, транспортная сеть.

**Введение.** Транспортная система является сложной системой, которая характеризуется стохастичностью, а именно: случайной величиной транспортного спроса, погодноклиматическими факторами, изменением характеристик улично-дорожной сети, аварийными ситуациями и износом дорожного покрытия. Поэтому наиболее адекватным средством описания и прогнозирования поведения такого объекта представляется моделирование, суть которого заключается в замене реального объекта управления его моделью. В качестве модели может выступать любой объект, с достаточной для целей пользователя точностью, воспроизводящий свойства реальной системы. В последнее время активно развиваются информационные системы на транспорте. В связи с этим возникает необходимость интеграции транспортных средств, инфраструктуры и человека в единую информационную систему. Одним из шагов для решения данного вопроса является моделирование транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники, что позволит в дальнейшем выбрать оптимальный маршрут движения техники с учетом изменения этих условий во времени.

Рассматриваемый процесс является сложным, поэтому в данном случае эффективным является имитационное моделирование, главным преимуществом которого является то, что в отличие от аналитического моделирования имитационное позволяет многократно воспроизводить исследуемую сложную систему и определять ее оптимальное состояние.

В области транспортного моделирования проведено множество исследований [1-14], но в них моделированию транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники уделено либо недостаточное внимание, либо рассмотрены только аналитические модели, не позволяющие учесть все многообразие условий эксплуатации.

**Цель статьи.** Цель статьи заключается в моделировании транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники с использованием средств имитационного моделирования.

**Результаты исследования.** Существуют отдельные классификации условий работы различных машин, в том числе транспортных, сельскохозяйственных и дорожно-строительных, учитывающие состояние поверхности качения, рельеф местности, высоту над уровнем моря, атмосферно-климатические, культуру труда и др. условия. Все, что окружает систему и находится с ней в тесном контакте, является условиями ее работы. В частности, дорожные и транспортные условия эксплуатации автомобилей определяют скорость движения машин, расход топлива, надежность и долговечность агрегатов и шин, утомляемость водителя и от них зависит производительность, себестоимость и безопасность движения, что свидетельствует о том, что эти условия необходимо правильно учитывать при осуществлении моделирования [14, 15].

Согласно [15] дорожные условия делятся на постоянные (конструкция покрытия, продольный профиль, ширина дорог) и переменные (степень ровности покрытий, сцепление колес с дорогой, видимость дороги водителем и др.).

К транспортным условиям относится целый ряд специфических условий, которые характеризуют организация и протекание транспортного процесса и определяются видом перевозимого груза, объемом и расстоянием перевозок, партионностью отправок, способами погрузки и разгрузки, организацией перевозок, специализацией подвижного состава и сохранностью перевозимого груза. Но важной характеристикой транспортных условий являются интенсивность движения подвижного состава и плотность потока, которые значительно влияют на скорость движения машин.

Рассмотренные условия эксплуатации транспортной техники в наибольшей мере влияют на средние технические скорости и эффективность работы транспортных машин. Поэтому возникает задача минимизации времени движения транспортного средства по участку и расхода топлива им, что возможно выполнить с помощью средств имитационного моделирования. Но на первом этапе необходимо выполнить имитационное моделирование рассмотренных условий эксплуатации транспортной техники.

Динамическую модель транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники можно описать в виде соответствия между элементами множества входов системы  $X$  «возможных значений»  $x$  и элементов упорядоченного множества  $T$  «моментов времени»  $t$ , т.е. в виде следующего отображения:

$$T \rightarrow X : x(t) \in XT, t \in T. \quad (1)$$

Рассматривая выход  $y(t)$  системы как ее реакцию на входы  $x(t)$  можно представить модель как совокупность двух процессов (рис. 1).

$$XT = \{x(t)\} \text{ и } YT = \{y(t)\}, t \in T. \quad (2)$$

Множество входящих параметров  $x(t)$  представлено следующими параметрами:

- $\lambda_{veh}(t)$  – интенсивность движения транспортных средств;
- $\lambda_{pub}(t)$  – интенсивность движения общественного транспорта;
- $\lambda_{ped}(t)$  – интенсивность движения пешеходов;
- $p(t)$  – матрица переходных вероятностей;
- $i(t)$  – тип транспортных средств;
- $D_{pub}(t)$  – время задержки общественного транспорта на остановке;
- $Cr(t)$  – состояние дорожного полотна;
- $TCi(t)$  – техническое состояние транспортных средств;
- $Pr(t)$  – параметры дороги;
- $PI(t)$  – параметры инфраструктуры;
- $PS(t)$  – параметры системы регулирования и контроля.

Множество выходящих параметров модели представлено следующими параметрами:

- $p1(t)$  – длительность первой фазы светофорных объектов в транспортном узле;
- $p2(t)$  – длительность второй фазы светофорных объектов в транспортном узле.

В настоящее время существует множество программных средств для выполнения имитационного моделирования. В ходе анализа этих средств был остановлен выбор на программном продукте AnyLogic [16], имеющего поддержку всех существующих методов имитационного моделирования, а также мощную встроенную библиотеку для моделирования дорожного движения.

На рис.1 приведена процедура построения имитационной модели транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники для участка транспортной сети.

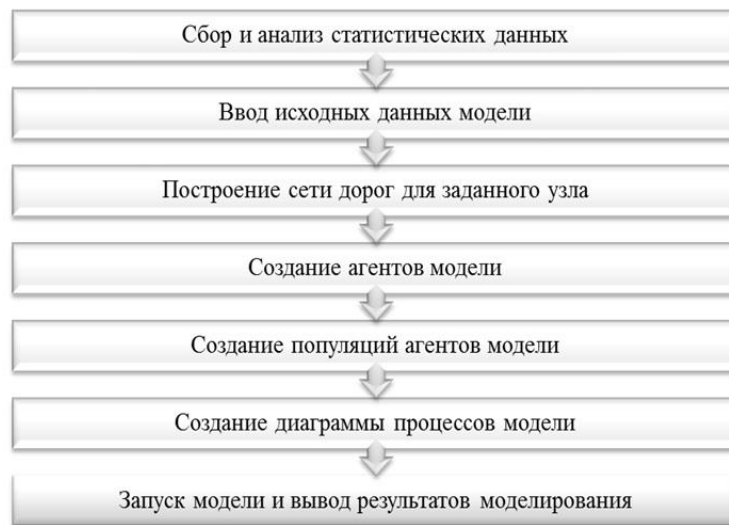


Рис. 1 – Процедура построения имитационной модели транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники

Моделирование совокупности рассмотренных участков позволит выбрать в дальнейшем оптимальный маршрут следования транспортного средства исходя из поставленной задачи оптимизации.

Была построена соответствующая модель для участка транспортной сети.

В таблице 1 приведены параметры моделирования и их соответствующие значения.

Таблица 1

**Параметры имитационной модели транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники**

Параметр	Значение
<b>Основные параметры</b>	
Единицы модельного времени	секунды
<b>Численные методы</b>	
Метод решения дифференциальных уравнений	Эйлер
Метод решения алгебр. уравнений	Измененный Ньютон
Метод решения смешанных уравнений	RK45+Newton
Абсолютная точность	$10^{-5}$
Временная точность	$10^{-5}$
Относительная точность	$10^{-5}$
Фиксированный шаг по времени	0.001

В таблице 2 приведены параметры области построения имитационной модели транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники

Таблица 2

**Параметры области построения имитационной модели транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники**

Параметр	Значение
Агент в диаграмме процесса	
Использовать в диаграммах процесса как	Агент
Движение	
Скорость	(10 : MPS)
Поворачивать анимацию согласно направлению движения	true
Также наклонять и вертикально	false
Пространство и сеть	
Тип пространства	Непрерывное
Ширина (динамич.)	500
Высота (динамич.)	500
z высота (динамич.)	0
Тип расположения	Задается пользователем
Применить расположение при запуске	true
Тип сети	Задается пользователем
Создать сеть при запуске	true
Выполнять шаги	false
Java для экспертов	
Параметр класса	false
Специфические	
Logging	true
Автоматич. создание наборов данных	true
AOC_DATASETS_UPDATE_TIME_PROPERTIES	- Recurring Event Properties
Ограничить количество хранимых значений	false

На первом этапе создания модели в AnyLogic была создана дорожная сеть исследуемого транспортного узла (рис. 2) на основе реальной схемы.

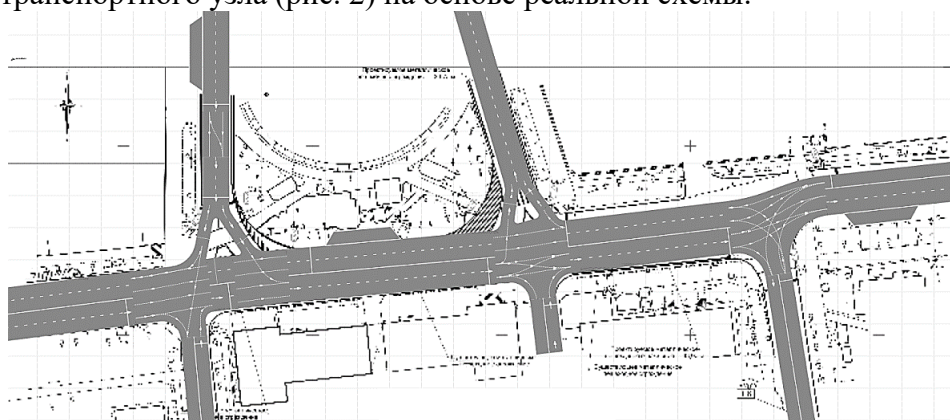


Рис. 2 – Дорожная сеть транспортного узла в AnyLogic

На следующем этапе была создана диаграмма процесса имитационной модели (рис. 3), отображающая переходы из одного состояния в другое согласно матрице переходов для приведенных интенсивностей движения.

В процессе построения диаграмм процессов имитационной модели использовались следующие блоки:

carSource\_1, carSource\_4, carSource\_7, carSource\_8 – входящие потоки для модели;  
selectOutput\_2, selectOutput\_3, selectOutput\_4, selectOutput\_5, selectOutput\_7, selectOutput\_8 – блоки, предназначенные для разделения входящих в них потоки на два потока;

carMoveTo\_9, carMoveTo\_10, carMoveTo\_11, carMoveTo\_12 – блоки, отображающие выходящие потоки для модели;

carDispose – блок, удаляющий транспортные средства из системы.

В процессе выполнения модели были созданы новые типы агентов с параметрами, отображающими время нахождения каждого агента в системе, а также соответствующие им популяции агентов, которые были добавлены в блоки типа carSource.

Для сбора данных о времени прохождения агентами транспортного узла был создан элемент *travel\_time*, который вычисляет разницу между текущим временем *time()* и временем появления агентов в системе *t\_bs*, т.е.

$$travel\_time = main.travel\_time.add(time() - t\_bs). \quad (3)$$

Длительность фаз светофоров задавалась параметрами *p1* и *p2* со значениями по умолчанию 37 с и 25 с в соответствии с исходными данными. Для отображения светофорного регулирования в систему были добавлены 4 блока типа Traffic Light. В Свойствах этих блоков были заданы режимы работы светофорных объектов для заданных стоп-линий. Блоки были разделены по группам направлений движения

В модели движение пешеходов не учитывалось, так как в рассматриваемом транспортном узле его интенсивность является несущественной и им можно пренебречь. Движение трамвая тоже не моделировалось, так как оно не влияет существенно на загрузку узла, при этом отсутствуют пересечения трамвайного пути с автодорогой, по которой движутся другие транспортные средства.

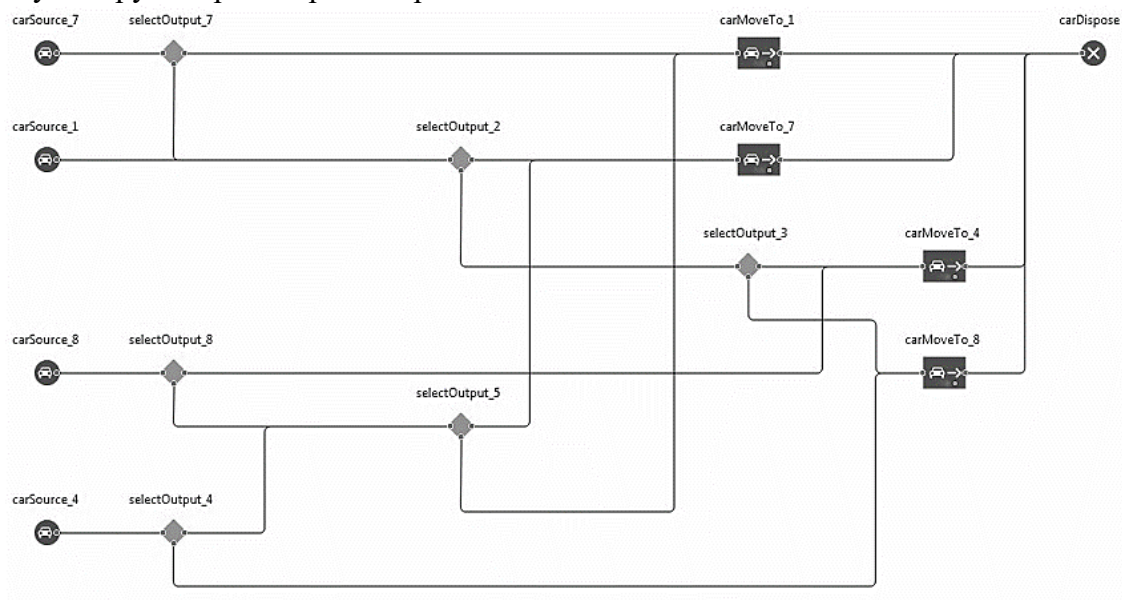


Рис. 3 – Диаграмма процесса имитационной модели для приведенных

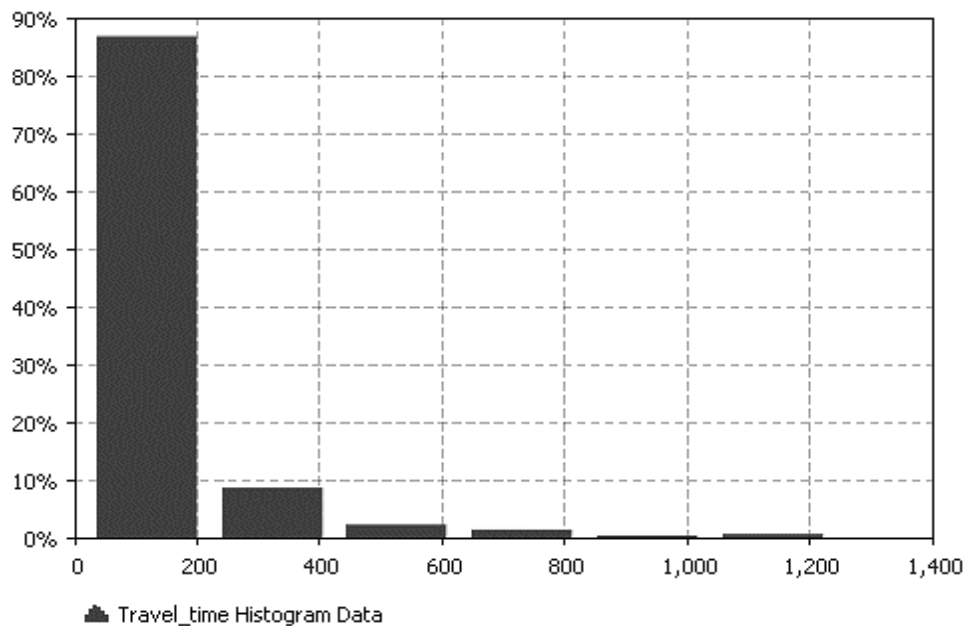
На рис. 4 приведены результаты моделирования для рассматриваемого участка сети с текущими значениями  $p1=37$ с и  $p2=25$ с.

```
travel_time
Кол-во 1,160
Среднее 136.846
Мин 15.776
Макс 1,182.575
Среднеквадр. отклонение 148.766
Доверит. интервал для среднего 8.561
Сумма 158,741.588
```

а

```
roadNetworkDescriptor
root.roadNetworkDescriptor: RoadNetworkDescriptor
Road Network: roadNetwork3
Roads: 15
Intersections: 7
Parking lots: 0
Bus stops: 3
Cars: 48
Road section length: 50 м
Enable density map: true
Green speed level: 40 км/ч
Red speed level: 1 км/ч
Map transparency: 0.6
```

б



в

Рис.4 – Результаты имитационного моделирования:  
а – результаты моделирования travel\_time; б – результаты моделирования пробок в транспортном узле;  
в – гистограмма вероятности распределения travel\_time

Относительная погрешность реальных испытаний с результатами имитационного моделирования (рис. 4) составила 3 %, что говорит о том, что имитационное моделирование в AnyLogic вполне адекватно описывает реальные процессы. В качестве измеряемого параметра принималось среднее время прохождения транспортными средствами транспортного узла `travel_time`. Измерения проводились в тех же точках, в которых транспортные средства заходят в транспортный узел согласно имитационной модели и выходят из него. На погрешность повлияло несколько факторов, связанных с ограничениями, имеющимися в дорожной библиотеке AnyLogic, при этом в качестве основных можно выделить следующие:

1) невозможность использования в одной транспортной сети полос движения с разной шириной, при этом последняя задается для всей сети одинаковая, в связи с чем приходится имитировать движение не по одной более широкой полосе, а по двум более узким.

2) невозможность отображения остановочных пунктов общественного транспорта на полосе движения без выездного кармана, что вносит определенные погрешности в процесс имитационного моделирования.

Особенностью AnyLogic является то, что в стандартной библиотеке нет элемента трамвай, а его движение приходится имитировать, как движение какого-либо другого агента (или создавать новый агент) и по ходу его следования вносить множество ограничений, которые также будут влиять на адекватность имитационной модели.

**Выводы.** Создана имитационная модель транспортных и дорожных условий эксплуатации транспортной техники, которую можно использовать для решения задач оптимизации движения средств транспорта, а также может быть использована при моделировании и эксплуатации интеллектуальной транспортной системы. Модель опробована на участке транспортной сети, а ее адекватность составила 3%.

### Литература:

1. Allsop, R. Some reflections on forty years' evolution of transport studies [Electronic resource] / 38th Annual Conference of the Universities Transport Study Group, Dublin, January, 2006. – Available from: <http://discovery.ucl.ac.uk/55070/> (accessed: 19.12.2017).
2. Дубелир, Г. Планировка городов: (отд. оттиски из журн. «Городское дело») / Г. Дубелир. - СПб.: Слово, 1910. - 82 с.
3. Шелейховский, Г.В. Композиция городского плана как проблема транспорта / Г.В. Шелейховский. – М.: ГИПРОГОР, 1946. – 129 с.
4. Зильберталь А.Х. Трамвайное хозяйство: руководство для работников трамвая и учащихся / А.Х. Зильберталь. – М.-Л.: ОГИЗ – Гострансиздат, 1932. – Ч. 1. – 304 с.
5. Киселев А.Б. Математическое моделирование автотранспортных потоков на регулируемых дорогах / А.Б. Киселев, А.В.Кокорева, В.Ф. Никитин, Н.Н. Смирнов // Прикл. матем. и механ. – 2004. – Т.68, №.6. – С. 1035-1042.
6. Киселев А.Б. Оптимальное регулирование автотранспортных потоков / А. Б. Киселев, А. В. Кокорева, В. Ф. Никитин, Н. Н. Смирнов // Ломоносовские чтения. Научная конф. Секция механики. Апрель 2005 года. Тезисы докладов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. - С. 115-116.
7. Регирер С. А. Математическая модель взаимодействия движущихся коллективов: общественного транспорта и пассажиров / С. А. Регирер, Н. Н. Смирнов, А. Е. Ченчик // Автоматика и телемеханика. - 2007. - Выпуск 7. - С. 116-131.
8. An Analysis of the Relationship Between Highway Expansion and Congestion in Metropolitan Areas: Lessons from the 15-Year Texas Transportation Institute Study [Electronic resource] / Surface Transportation Policy Project. November 1998. Available

- from: <http://www.daclarke.org/AltTrans/analysis.html>. – Title from the screen (accessed: 10.07.2017).
9. Семёнов В.В., Ермаков А.В. Исторический анализ моделирования транспортных процессов и транспортной инфраструктуры // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 3. 36 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3>.
  10. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three. Springer, 2009. – 278 p.
  11. C. F. Daganzo, Fundamentals of Transportation and Traffic Operations. New York, USA: Pergamon Press, 1997. – 356 p.
  12. Hensher D. A. Handbook of Transport Modelling / D. A. Hensher, K. J. Button // London, United Kingdom: Pergamon Press, 2000. – 690 p.
  13. Banks, J. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, vol. 57 / J. Banks // New York, United States: John Wiley & Sons Inc, 1998. – 864 p.
  14. Говорущенко Н.Я. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта). Ч.1 / Н.Я. Говорущенко, А.Н. Туренко – Х.: РИО ХГАДТУ, 1998. – 255 с.
  15. Говорущенко Н.Я. Системотехника проектирования транспортных машин / Н.Я. Говорущенко, А.Н. Туренко // Учебное пособие. 2-е изд.- Харьков: ХНАДУ, 2004. – 166с.
  16. AnyLogic [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании AnyLogic. – Режим доступа: <http://www.anylogic.ru>, свободный. – Загл. с экрана. (27.04.2018).

## Summary

**V. Volkov, I. Gritsuk, M. Volodarets, T. Volkova, D. Pogorletskiy** Modeling transport and road conditions of operation of transport equipment

*In this paper, the process of simulating transport and road conditions for the operation of transport equipment is considered. The transport and road conditions for the operation of transport equipment are considered, since they affect the average technical speeds and the efficiency of the operation of transport vehicles to the greatest extent. Therefore, the problem arises of minimizing the time of movement of the vehicle over the section and of the fuel consumption to them, which can be done with the help of simulation tools. At the first stage, the task was to simulate the considered conditions for the operation of transport equipment. A corresponding simulation model has been created in the AnyLogic software environment for the transport network site. Simulation of the set of examined sites will allow to choose the optimal route of the transporter in the future based on the set optimization problem. The relative error of actual tests with simulation results was 3%, which means that simulation modeling in AnyLogic quite adequately describes the real processes. As the measured parameter, the average travel time of the transport node *travel\_time* was taken. The measurements were made at the same points in which the vehicles enter the transport node according to the simulation model and exit it. The error was affected by several factors related to the restrictions that exist in the AnyLogic road library.*

**Keywords:** simulation modeling, operating conditions, transport machinery, means of transport, transport network

## References

1. Allsop, R. Some reflections on forty years' evolution of transport studies [Electronic resource] / 38th Annual Conference of the Universities Transport Study Group, Dublin, January, 2006. – Available from: <http://discovery.ucl.ac.uk/55070/> (accessed: 19.12.2017).



2. Dubelir, G. Planirovka gorodov: (otd. ottiski iz zhurn. «Gorodskoe delo») / G. Dubelir. - SPb.: Slovo, 1910. - 82 s
3. Shelejhovskij, G.V. Kompozicija gorodskogo plana kak problema transporta / G.V. Shelejhovskij. – M.: GIPROGOR, 1946. – 129 s.
4. Zil'bertal' A.H. Tramvajnoe hozjajstvo: rukovodstvo dlja rabotnikov tramvaja i uchashhijsja / A.H. Zil'bertal'. – M.-L.: OGIZ – Gostransizdat, 1932. – Ch. 1. –. 304 s.
5. Kiselev A.B. Matematicheskoe modelirovanie avtotransportnyh potokov na reguliruemym dorogah / A.B. Kiselev, A.V.Kokoreva, V.F. Nikitin, N.N. Smirnov // Prikl. matem. i mehan. – 2004. – T.68, №.6. – S. 1035-1042.
6. Kiselev A.B. Optimal'noe regulirovanie avtotransportnyh potokov / A. B. Kiselev, A. V. Kokoreva, V. F. Nikitin, N. N. Smirnov // Lomonosovskie chtenija. Nauchnaja konf. Sekcija mehaniki. April' 2005 goda. Tezisy dokladov. — M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2005. - S. 115-116.
7. Regirer S. A. Matematicheskaja model' vzaimodejstvija dvizhushhijsja kollektivov: obshhestvennogo transporta i passazhirov / S. A. Regirer, N. N. Smirnov, A. E. Chenchik // Avtomatika i telemekhanika. - 2007. - Vypusk 7. - S. 116-131.
8. An Analysis of the Relationship Between Highway Expansion and Congestion in Metropolitan Areas: Lessons from the 15-Year Texas Transportation Institute Study [Electronic resource] / Surface Transportation Policy Project. November 1998. Available from: <http://www.daclarke.org/AltTrans/analysis.html>. – Title from the screen (accessed: 10.07.2017).
9. Semjonov V.V., Ermakov A.V. Istoricheskij analiz modelirovanija transportnyh processov i transportnoj infrastruktury // Preprinty IPM im. M.V.Keldysha. 2015. № 3. 36 s. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3>.
10. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three. Springer, 2009. – 278 p.
11. C. F. Daganzo, Fundamentals of Transportation and Traffic Operations. New York, USA: Pergamon Press, 1997. – 356 p.
12. Hensher D. A. Handbook of Transport Modelling / D. A. Hensher, K. J. Button // London, United Kingdom: Pergamon Press, 2000. – 690 p.
13. Banks, J. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, vol. 57 / J. Banks // New York, United States: John Wiley & Sons Inc, 1998. – 864 p.
14. Govorushhenko N.Ja. Sistemotehnika transporta (na primere avtomobil'nogo transporta). Ch.1 / N.Ja. Govorushhenko, A.N. Turenko – H.: RIO HGADTU, 1998. – 255 s.
15. Govorushhenko N.Ja. Sistemotehnika proektirovnija transportnyh mashin / N.Ja. Govorushhenko, A.N. Turenko // Uchebnoe posobie. 2-e izd. – Har'kov: HNADU, 2004. – 166s.
16. AnyLogic [Jelektronnyj resurs] // Oficial'nyj sajt kompanii AnyLogic. – Rezhim dostupa: <http://www.anylogic.ru>, svobodnyj. – Zagl. s jekrana. (27.04.2018).