

## Графовая модель конфликтного взаимодействия транспортных средств на различных перекрестках

Кандидаты техн. наук, доценты Д. В. Капский<sup>1)</sup>, В. Н. Шуть<sup>2)</sup>, докт. техн. наук, доц. П. А. Пегин<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Брестский государственный технический университет (Брест, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** В статье введено понятие графа транспортных потоков перекрестка. Показано, что данный граф является объединением графов конфликтов. Приводятся числовые характеристики графов конфликтного взаимодействия транспортных потоков в процессе их слияния и пересечения на перекрестках разной конфигурации. Выполнено построение: графов слияния, в которых вершины соответствуют конфликтующим потокам, а ребра указывают, какие из потоков вступают в конфликт слияния между собой; графов пересечения, в которых вершины соответствуют конфликтующим потокам, а ребра указывают, какие из потоков вступают в конфликт пересечения между собой. С учетом конфликтного взаимодействия транспортных и пешеходных потоков, условий движения, а также траекторий движение до возможного физического взаимодействия приобретает вид графа транспортных потоков, который для перекрестка содержит полную информацию об имеющихся конфликтах. В результате построений в соответствии с теоретическими аспектами теории графов и реальным взаимодействием транспортных и пешеходных потоков на перекрестках выявлены закономерности, позволяющие судить об опасности того или иного перекрестка на улично-дорожной сети городов. Предложения могут быть идентифицированы как маркеры опасности объекта, что особенно актуально с учетом имеющихся фактических данных о режимах движения, светофорном регулировании, интенсивности потоков, формирующих граф автомобилей или пешеходов, а также скорости движения (особенно единичных транспортных средств, превышающих допустимое значение разрешенной скорости для городского движения или с учетом местных ограничений на отдельных участках улично-дорожной сети). Данные подходы могут применяться для оценки качества дорожного движения на конфликтных участках улично-дорожной сети городов и населенных пунктов, а также на дорогах общего пользования.

**Ключевые слова:** транспортный и пешеходный потоки, конфликт, конфликтная точка, траектория движения, перекресток, теория графов, граф пересечения, граф слияния, опасность

**Для цитирования:** Капский, Д. В. Графовая модель конфликтного взаимодействия транспортных средств на различных перекрестках / Д. В. Капский, В. Н. Шуть, П. А. Пегин // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 3. С. 246–254. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-246-254>

## Graph Model of Vehicle Conflict Interaction at Various Crossroads

D. V. Kapskiy<sup>1)</sup>, V. N. Shutst<sup>2)</sup>, P. A. Pegin<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Brest State Technical University (Brest, Republic of Belarus),

<sup>3)</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint Petersburg, Russian Federation)

**Abstract.** The paper introduces a new notion that is a graph of crossroad transport flows. It has been shown that the given graph serves as a unification of conflict graphs. The paper provides numerical characteristics of graphs on conflict interaction

---

### Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-70  
oapdd\_atf@bntu.by

### Address for correspondence

Kapskiy Denis V.  
Belarusian National Technical University  
12 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-70  
oapdd\_atf@bntu.by

of transport flows in the process of their merging and intersection at crossroads of various configuration. The following construction of the graph has been carried out: merging graphs where their nodes correspond to conflicting flows and their edges indicate what flows enter into a merging conflict between themselves; intersection graphs where graph nodes correspond to conflicting flows and their edges indicate what flows enter into an intersection conflict between themselves. Taking into account the conflict interaction between traffic and pedestrian flows, traffic conditions and traffic trajectories before possible physical interaction the traffic flow graph takes such form which contains complete information about existing conflicts for the required intersection. As a result of the construction in accordance with theoretical aspects of a graph theory and actual interaction of transport and pedestrian flows at intersections, some regularities have been revealed that allow to estimate a danger of any particular intersection within the urban street-road network. The proposals can be identified as hazard markers of an object and that is especially topical with due account of available actual data on driving regimes, traffic light regulation, flow intensity and driving speed (especially single vehicles exceeding permissible driving speed for urban traffic or taking into account local restrictions on certain sections of street-road network) which form a vehicle or pedestrian graph. The proposed approaches can be used to assess quality of road traffic in conflict areas of the street-road network in cities and settlements and public roads as well.

**Keywords:** transport and pedestrian flows, conflict, conflict point, motion trajectory, intersection, graph theory, intersection graph, merging graph, danger

**For citation:** Kapskiy D. V., Shutst V. N., Pegin P. A. (2018) Graph Model of Vehicle Conflict Interaction at Various Crossroads. *Science and Technique*. 17 (3), 246–254. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-246-254> (in Russian)

## Введение

Конфликты занимают особое место в дорожном движении, и их разрешение является одной из самых актуальных задач.

Под словом «конфликт» в дорожном движении понимается столкновение сил, сторон, какое-либо противостояние. В дорожном движении имеют место самые разнообразные конфликты – технические (физические), экономические, социальные, экологические и др. [1]. Рассмотрим физические конфликты на дороге, в частности конфликт транспорт – транспорт (Т–Т).

Физические конфликты Т–Т подразделяются на несколько видов: встречные, боковые (пересечение), поворотные и попутные (слияние). При этом физический ущерб определяет тяжесть последствий аварии, по которой они традиционно делятся на три категории [2–4]: легкие (когда нанесен умеренный материальный ущерб, а люди не пострадали); средние (когда имели место ранения людей или нанесение очень большого материального ущерба); тяжелые (при которых имела место гибель людей или нанесение чрезвычайно большого материального ущерба).

Перекресток на улично-дорожной сети является местом повышенной опасности [3–5]. Светофорное регулирование предназначено для очередного пропуска конфликтующих участников дорожного движения (ДД) [6]. Имеется возможность формализовать некоторым образом с помощью теории графов модель перекрестка с учетом взаимодействующих на нем транспортных потоков, конфликтующих между собой.

## Модель перекрестка и его графы

На рис. 1 число конфликтующих участков ДД равно 16, т. е. по числу транспортно-пешеходных потоков. Здесь имеем:

– четыре пешеходных потока  $X_{п} = \{X_{п1}, X_{п5}, X_{п9}, X_{п13}\}$ ;

– четыре транзитных транспортных потока  $X_{тт} = \{X_{тт3}, X_{тт7}, X_{тт11}, X_{тт15}\}$ ;

– четыре правоповоротных транспортных потока  $X_{тп} = \{X_{тп2}, X_{тп6}, X_{тп10}, X_{тп14}\}$ ;

– четыре левоповоротных транспортных потока  $X_{тл} = \{X_{тл4}, X_{тл8}, X_{тл12}, X_{тл16}\}$ .

Переменная  $X$  означает число пешеходов либо транспортных единиц на конкретном направлении движения перекрестка. Построим граф перекрестка или граф пешеходно-транспортных потоков (рис. 2). Вершины графа соответствуют транспортным потокам. Две вершины графа соединены ребром, если соответствующие траектории движения этих потоков в зоне перекрестка имеют точки пересечения (конфликтные точки).

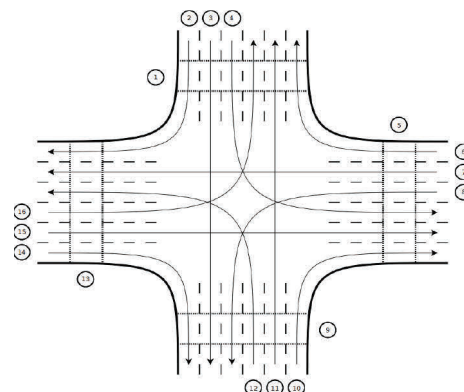


Рис. 1. Транспортные потоки перекрестка

Fig. 1. Crossroad transport flows

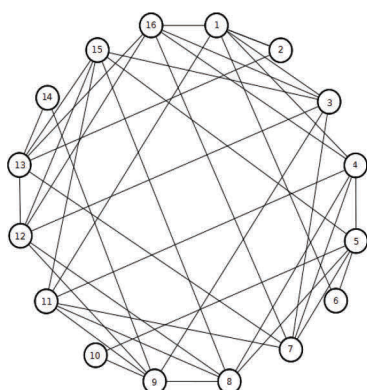


Рис. 2. Граф транспортно-пешеходных потоков  
Fig. 2. Graph of transport and pedestrian flows

Вынесение пешеходных потоков из зоны перекрестка путем обустройства подземных переходов позволяет упростить граф транспортных потоков, резко сократить число конфликтных точек (рис. 3).

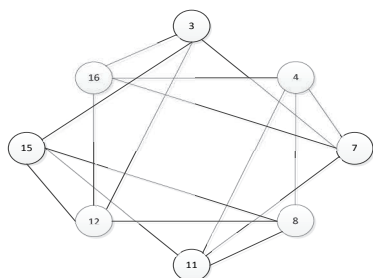


Рис. 3. Граф  $G$  транспортных потоков  
Fig. 3. Graph of transport flows  $G$

Построим граф  $\bar{G}$  – дополнительный к графу  $G$ . Полученный граф назовем графом светофорного регулирования (рис. 4). Пара вершин, инцидентных одному ребру этого графа, указывает на то, что данные потоки могут двигаться через перекресток одновременно, т. е. они не имеют конфликтных точек соприкосновения. Таким образом, процесс оптимального управления разъездом транспорта на перекрестке сводится к формированию групп неконфликтующих потоков максимального объема.

Приведем данную постановку к известной в теории графов задаче о выделении в графе клик максимального размера. Известно следующее определение клики: «Подмножество  $V'$  вершин графа  $G$  называется кликой, если любые две входящие в него вершины смежны, т. е. если порожденный подграф  $G(V')$  является “полным”» [7–9].

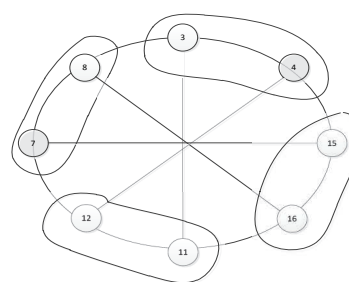


Рис. 4. Граф  $\bar{G}$  светофорного регулирования  
Fig. 4. Graph of traffic signalization  $\bar{G}$

Характеристикой графа светофорного регулирования будет кликовое число  $\varphi(G)$ . Оно определяет число фаз в светофорном цикле. Фаза регулирования – это совокупность основного такта и следующего за ним переходного интервала. В основной такт (зеленый сигнал светофора) дается разрешение на проезд перекрестка группе автотранспортных средств, не конфликтующих между собой.

### Графы конфликтов

Рассмотрим подробнее модели конфликтов и, в частности, конфликты слияния и пересечения. Введем понятия графов этих конфликтов и получим основные характеристики графов.

Слияние – ситуация, когда взаимодействующие участники одновременно претендуют на одну и ту же ограниченную, точечную территорию. Конфликт слияния изображен на рис. 5.

Пересечение – ситуация, когда взаимодействующие участники сталкиваются в конфликтной точке, близкой к углу  $90^\circ$ . Конфликт пересечения и слияния в упрощенном виде изображен на рис. 5 [3, 4, 10]. Это отображение представляет собой так называемую конфликтную точку.

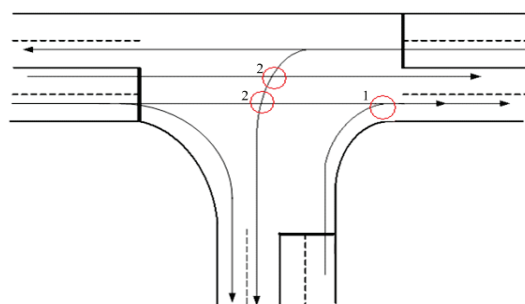


Рис. 5. Изображение конфликта слияния (1) и пересечения (2)  
Fig. 5. View of convergence (1) and intersection (2) conflict

Графом слияния назовем такой граф, в котором вершины соответствуют конфликтующим потокам, а ребра указывают, какие из потоков вступают в конфликт слияния между собой. Графом пересечения назовем такой граф, в котором вершины соответствуют конфликтующим потокам, а ребра указывают, какие из потоков вступают в конфликт пересечения между собой.

Можно утверждать, что граф транспортных потоков, рассмотренный выше, содержит полную информацию о конфликтах. Он же является объединением двух графов: слияния и пересечения. То есть если  $G$  – это граф транспортных потоков, а  $G_1$  и  $G_2$  – графы слияния и пересечения соответственно, то  $G = G_1 \cup G_2$ .

Далее для характерных, часто встречающихся перекрестков изобразим графы конфликтов слияния и пересечения. Пара вершин, инцидентных одному ребру, указывает на то, что данные потоки имеют конфликтные точки и не могут двигаться через перекресток одновременно.

#### Взвешенные графы конфликтов, характеристика графов конфликтов

Взвешенным называется граф, каждому ребру которого поставлено в соответствие некоторое число, называемое весом ребра [11, 12].

Рассмотрим перекресток  $2 \times 1$  (рис. 6). Это перекресток, образованный пересечением дорог с двумя и одной полосами движения соответственно, в одном направлении. Аналогичное

число полос и в обратном направлении для каждой дороги.

Обозначим  $\lambda_i$  вес каждого ребра на графе пересечений. Таким образом,  $\lambda_i$  – это показатель тяжести аварии с возможной гибелью участников и большими материальными потерями. На графе слияний расставим весовые коэффициенты  $\mu_j$ , которые являются показателями средней или легкой аварии, несущей за собой сравнительно небольшие материальные потери (рис. 7).

Поскольку тяжесть аварии в конфликте пересечения потоков гораздо выше, то  $\lambda_i \gg \mu_j$  ( $i = \overline{1,12}, j = \overline{1,10}$ ) (рис. 7). Показатели  $\lambda_i$  и  $\mu_j$  могут изменяться в зависимости от аварийной статистики, которая зависит от самого перекрестка непосредственно, от дорожного покрытия, количества участвующих потоков и ряда других факторов. Таким образом, конфликты, возникающие в местах пересечений, влекут за собой более серьезные последствия и нуждаются в устранении. С практической точки зрения, возможно хранение в компьютере информации об аварийности конкретного перекрестка в форме взвешенных графов пересечения и слияния. В процессе функционирования перекрестка и возникающих аварий веса ребер будут меняться в зависимости от того, какие потоки участвовали в аварии. Со временем анализ и обобщение данной статистики, хранящейся в графе, инициируют привинчивные меры по улучшению ситуации на данном перекрестке.

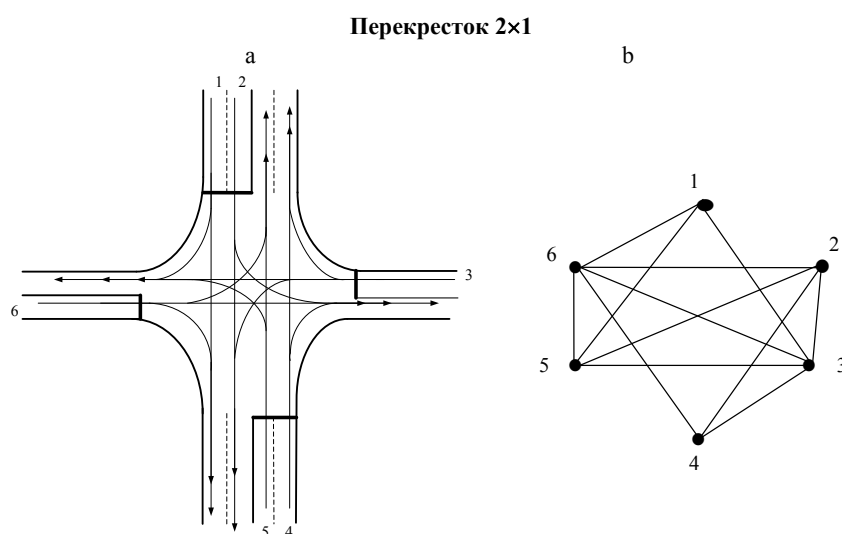


Рис. 6. Транспортные потоки перекрестка  $2 \times 1$ : а – изображение перекрестка  $2 \times 1$ ; б – граф транспортных потоков

Fig. 6. Crossroad transport flows  $2 \times 1$ : а – view of crossroad  $2 \times 1$ ; б – graph of transport flows

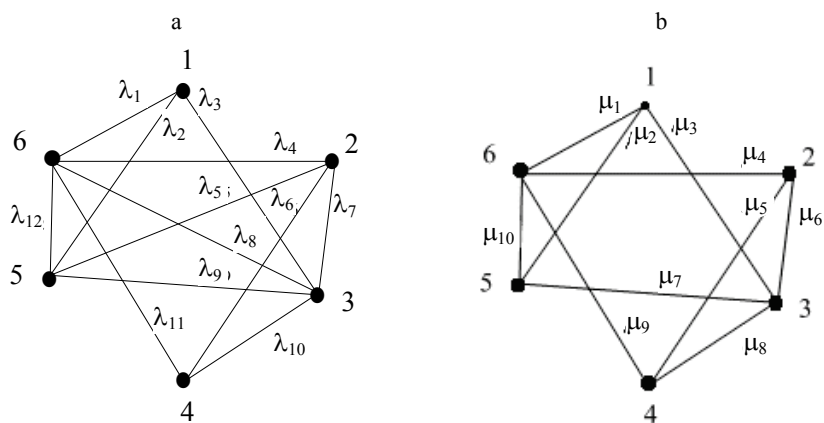


Рис. 7. Графы конфликтов перекрестка 2x1: а – пересечения; б – слияния  
 Fig. 7. Graphs of crossroad conflicts 2x1: a – intersection; b – convergence

**Число ребер в графе конфликтов некоторых характерных перекрестков**

Важной характеристикой графа конфликтов является число ребер в нем. Чем больше ребер, тем конфликтнее перекресток. Учитывая количество различных потоков на каждом перекрестке, можно подсчитать число ребер в графах слияния и пересечения для каждого из них. Обозначим потоки перекрестка следующим образом:  $t$  – число транзитных потоков на перекрестке;  $p$  – то же правоповоротных потоков на перекрестке;  $l$  – то же левоповоротных потоков на перекрестке;  $n-1$  – то же ребер в графе слияния;  $n-2$  – то же ребер в графе пересечения.

Очевидно, что для перекрестка 2x1 число ребер в графах слияния и пересечения (рис. 7) выразится формулами:

$$n-1 = p + l + 2; \tag{1}$$

$$n-2 = t + 3l/2.$$

Тогда для перекрестка 2x1 при параметрах перекрестка  $t = 6; p = 4; l = 4$  имеем  $n-1 = 10, n-2 = 12$ .

Выполним аналогичные расчеты для перекрестка 2x2 (рис. 8). Очевидно, что для него число ребер в графах слияния и пересечения (рис. 9) выражается формулами:

$$n-1 = p + l; \tag{2}$$

$$n-2 = t + 3l + 2.$$

Итак, число ребер в графах конфликтов перекрестка 2x2 при параметрах перекрестка  $t = 8, p = 4, l = 4$  будет 8 и 22.

**Перекресток 2x2**

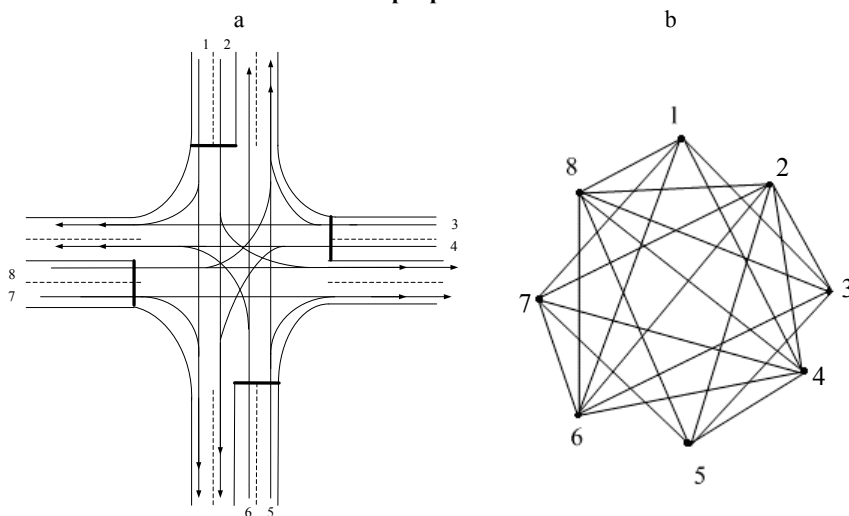


Рис. 8. Транспортные потоки перекрестка 2x2: а – изображение перекрестка 2x2; б – граф транспортных потоков  
 Fig. 8. Crossroad transport flows 2x2: a – view of crossroad 2x2; b – graph of transport flows

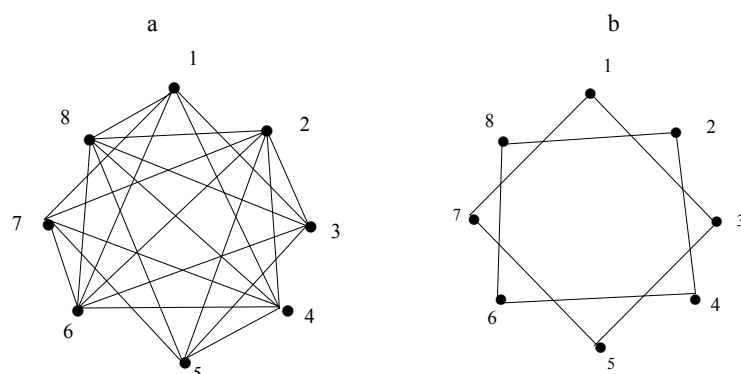


Рис. 9. Графы конфликтов перекрестка 2×2: а – пересечения; б – слияния

Fig. 9. Graphs of crossroad conflicts 2×2: a – intersection; b – convergence

Выполним приведенные выше расчеты для перекрестка 3×2 (рис. 10). Очевидно, что для него число ребер в графах слияния и пересечения (рис. 11) выражается формулами:

$$n-1 = p + l; \quad (3)$$

$$n-2 = 2t + 2p + l.$$

Итак, число ребер в графах конфликтов перекрестка 3×2 при параметрах перекрестка  $t = 10$ ,  $p = 4$ ,  $l = 4$  будет 8 и 32.

Выполним аналогичные расчеты для перекрестка 3×3 (рис. 12), для которого число ребер в графах слияния и пересечения (рис. 13) выражается формулами:

$$n-1 = p + l; \quad (4)$$

$$n-2 = 3t + 2l + 2.$$

Итак, число ребер в графах конфликтов перекрестка 3×3 при параметрах перекрестка  $t = 12$ ,  $p = 4$ ,  $l = 4$  будет 8 и 46.

Выполним аналогичные расчеты для Т-образного перекрестка (рис. 14), для которого число ребер в графах слияния и пересечения (рис. 15) выражается формулами:

$$n-1 = l/2; \quad (5)$$

$$n-2 = l + l + l/2 = 2,5l.$$

Итак, число ребер в графах конфликтов Т-образного перекрестка при параметрах перекрестка  $t = 4$ ,  $p = 2$ ,  $l = 2$  будет 1 и 5.

Можно отметить, что графы слияния перекрестков 2×2, 2×3, 3×3 схожи. Это объясняется тем, что на данных перекрестках для левоповоротных потоков имеется отдельная полоса. Это позволяет избежать возможного конфликта слияния. В перекрестке 2×1 в одном из направлений такой полосы нет, поэтому на движение по одной полосе претендуют сразу три потока, что приводит к возникновению конфликта слияния.

#### Перекресток 3×2

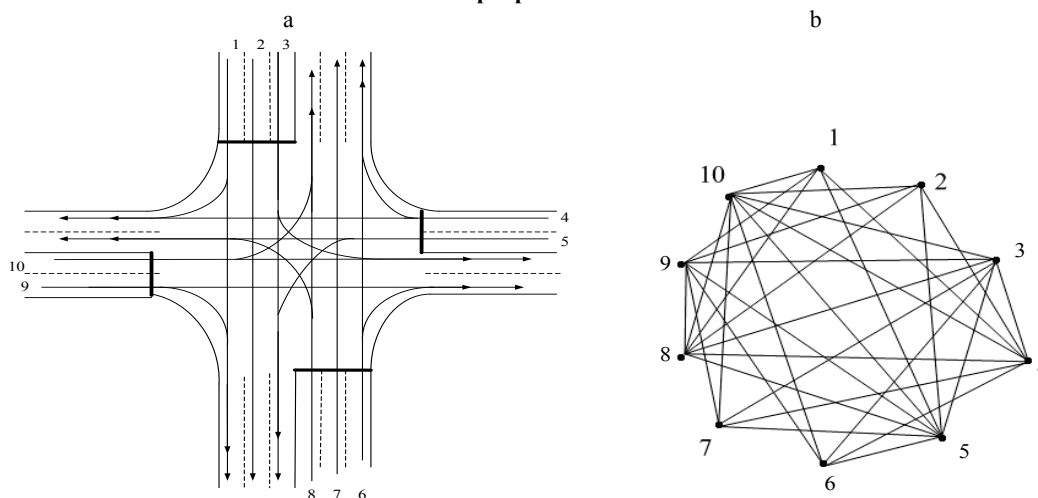


Рис. 10. Транспортные потоки перекрестка 3×2: а – изображение перекрестка 3×2; б – граф транспортных потоков

Fig. 10. Crossroad transport flows 3×2: a – view of crossroad 3×2; b – graph of transport flows

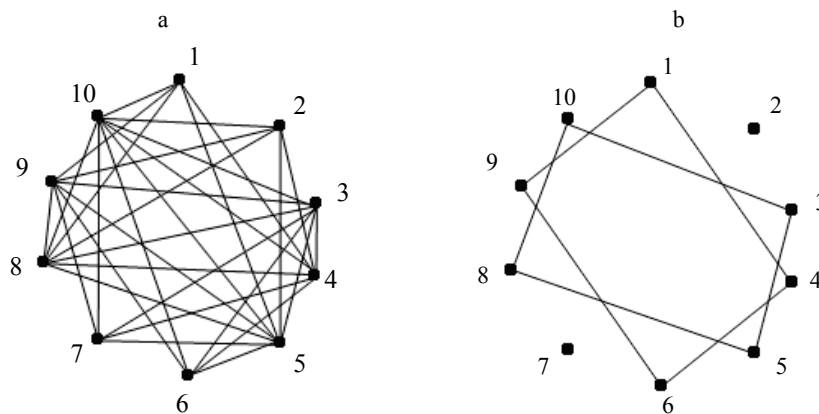


Рис. 11. Графы конфликтов перекрестка 3×2: а – пересечения; б – слияния  
 Fig. 11. Graphs of crossroad conflicts 3×2: a – intersection; b – convergence

Перекресток 3×3

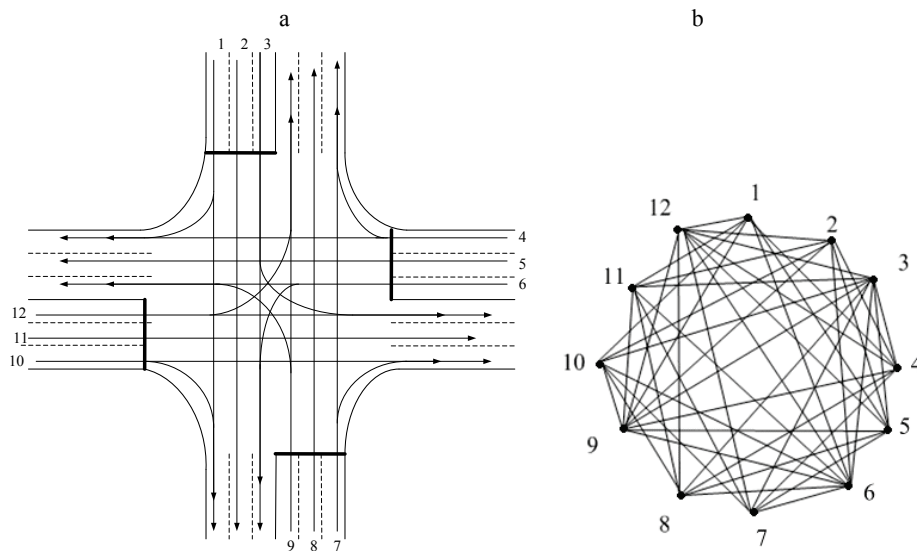


Рис. 12. Транспортные потоки перекрестка 3×3: а – изображение перекрестка 3×3; б – граф транспортных потоков  
 Fig. 12. Crossroad transport flows 3×3: a – view of crossroad 3×3; b – graph of transport flows

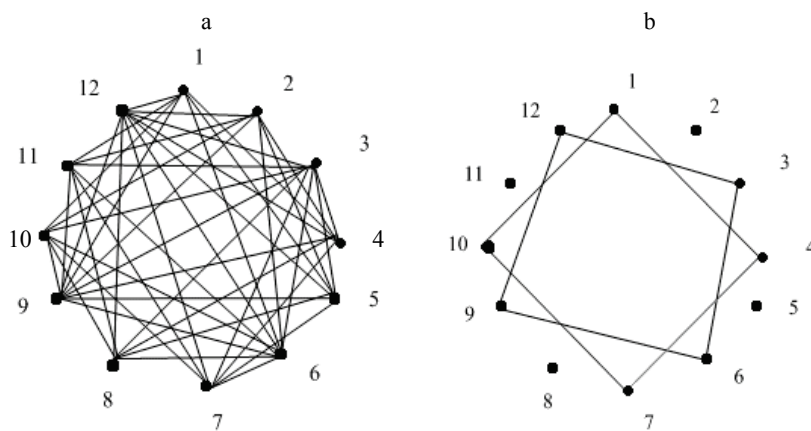


Рис. 13. Графы конфликтов перекрестка 3×3: а – пересечения; б – слияния  
 Fig. 13. Graphs of crossroad conflicts 3×3: a – intersection; b – convergence

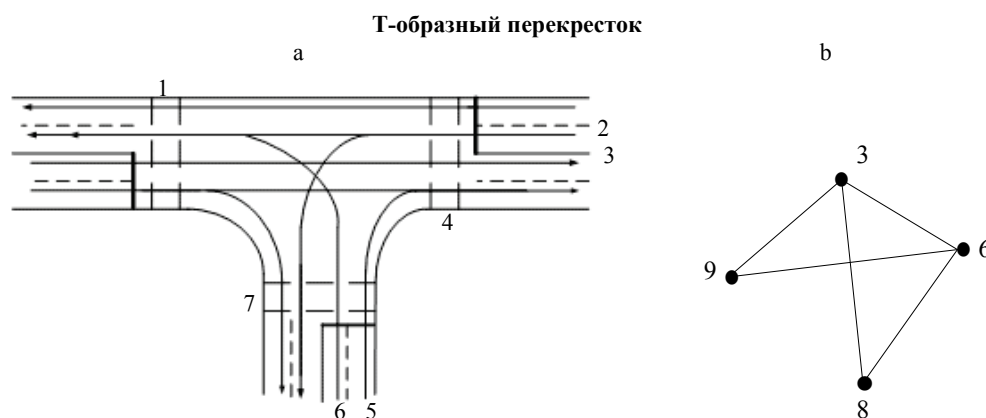


Рис. 14. Транспортные потоки Т-образного перекрестка: а – изображение Т-образного перекрестка; б – граф транспортных потоков

Fig. 14. Transport flows of T-junction: a – view of T-junction; б – graph of transport flows

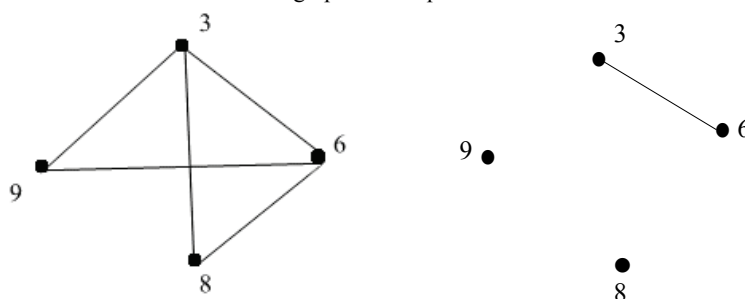


Рис. 15. Графы конфликтов Т-образного перекрестка

Fig. 15. Graphs of T-junction conflicts

## ВЫВОДЫ

1. Перекресток, как нерегулируемый, так и регулируемый, по своей природе является большой конфликтной зоной, в которой сконцентрированы устремления временного сообщества водителей автотранспортных средств в скорейшем и безопасном пересечении этой зоны. Большая часть таких устремлений находится между собой в антагонистическом противостоянии.

2. Предложенная авторами графовая модель позволяет достаточно подробно описать структурное взаимодействие в конфликтной зоне, разделить участников движения, указать всевозможные группировки бесконфликтных автотранспортных средств.

3. Конфликты слияния менее тяжелые, чем конфликты пересечения, потому что в них участвуют только лево- и правоповоротные по-

токи (что отражается в формулах для нахождения числа ребер в графе слияния).

4. В конфликте пересечения участвуют еще и транзитные потоки, отчего их тяжесть заметно увеличивается. Этот факт отражается формулами для нахождения количества ребер в графе пересечения. В зависимости от этого можно сделать вывод, что для любого перекрестка заданной разметки будем иметь  $n-1 < < n-2$ . Для Т-образного перекрестка ситуация несколько иная: все конфликтные точки перекрестка вызваны левоповоротными потоками. Поэтому в формулах по вычислению числа ребер для графов слияния и пересечения участвует только переменная  $l$  (число левоповоротных потоков на перекрестке). С учетом специфики взаимодействия транспортных потоков возможно определить потенциальную опасность того или иного перекрестка, зная геометриче-



ские параметры объекта и режимы светофорного объекта или действующего приоритета на перекрестке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель, Ю. А. Опасности в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский. М.: Новое знание, 2013. 244 с.
2. Врубель, Ю. А. Организация дорожного движения: в 2 ч. / Ю. А. Врубель. Минск: Белорус. фонд безопасности дорожного движения, 1996. Ч. 1. 205 с.
3. Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д. В. Капский. Минск: БНТУ, 2008. 243 с.
4. Капский, Д. В. Метод прогнозирования дорожно-транспортной аварийности по потенциальной опасности / Д. В. Капский. М.: Новое знание, 2015. 327 с.
5. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.
6. Координированное управление дорожным движением / Ю. А. Врубель [и др.]. Минск: БНТУ, 2011. 230 с.
7. Харари, Ф. Теория графов / Ф. Харари. М.: Мир, 1973. 300 с.
8. Уилсон, Р. Введение в теорию графов / Р. Уилсон. М.: Мир, 1977. 207 с.
9. Харари, Ф. Пересечение графов / Ф. Харари, Э. Палмер. М.: Мир, 1977. 324 с.
10. Rappoport, H. A. Die Ausbildung Plangeicher Knotenpunkte im Landstrassennetz / H. A. Rappoport // Strassen und Tiefbau. 1955. No 8. P. 499–510.
11. Лекции по теории графов / В. А. Емеличев [и др.]. М.: Наука, 1990. 384 с.
12. Домнин, Л. Н. Элементы теории графов / Л. Н. Домнин. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. 144 с.

Поступила 09.10.2017  
 Подписана в печать 08.01.2018  
 Опубликована онлайн 29.05.2018

REFERENCES

1. Vruble Yu. A., Kapsky D. V. (2013) *Traffic Hazard*. Moscow, Novoye Znanie Publ. 244 (in Russian).
2. Vruble Yu. A. (1996) *Organization of Traffic. Part 1*. Minsk, Belarusian Road Safety Fund. 205 (in Russian).
3. Kapsky D. V. (2008) *Forecasting of Traffic Accidents*. Minsk, Belarusian National Technical University. 243 (in Russian).
4. Kapsky D. V. (2015) *Method for Forecasting of Road and Transport Accidents Due to Possible Hazard*. Moscow, Novoye Znanie Publ. 327 (in Russian).
5. Vruble Yu. A., Kapsky D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of Losses in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 240 (in Russian).
6. Vruble Yu. A., Kapsky D. V., Kot E. N., Navoi D. V., Rozhanskii D. V. (2011) *Coordinated Control of Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 230 (in Russian).
7. Harary F. (1969) *Graph Theory*. Addison-Wesley Publishing Company.
8. Wilson R. (1972) *Introduction in Graph Theory*. Longman Group Ltd.
9. Harary F., Palmer E. (1973) *Graphical Enumeration*. Elsevier. 286. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-10826-4>.
10. Rappoport H. A. (1955) Die Ausbildung Plangeicher Knotenpunkte im Landstrassennetz. *Strassen und Tiefbau*, (8), 499–510 (in German).
11. Emelichev V. A., Mel'nikov O. I., Sarvanov V. I., Tyshkevich R. I. (1990) *Lectures on Graph Theory*. Moscow, Nauka Publ. 384 (in Russian).
12. Domnin L. N. (2007) *Elements of Graph Theory*. Penza, Penza State University. 144 (in Russian).

Received: 09.10.2017

Accepted: 08.01.2018

Published online: 29.05.2018