

УДК 711.656

к.т.н., доцент Дубова С.В., к.т.н., доцент Васильева А.Ю.,  
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ.

*Рассмотрена магистральная улично-дорожная сеть, как подсистема транспортно-планировочной инфраструктуры города. Представлена математическая модель, на основе которой произведена оценка пропускной способности полосы движения для городского пассажирского транспорта общего пользования.*

*Ключевые слова: магистральная улично-дорожная сеть, пропускная способность полосы движения, городской пассажирский транспорт общего пользования.*

Улично-дорожная сеть представляет собой неотъемлемую подсистему транспортно-планировочной инфраструктуры (ТПИ) города [3], которая находится в неразрывной взаимосвязи с транспортными и пассажирскими потоками. Величины пассажирских потоков являются основной характеристикой, на основе которой производятся транспортные расчеты, в том числе и выбор видов городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТОП).

В плотном транспортном потоке современного города, где приоритет отдан легковому индивидуальному автомобилю, наземный ГПТОП становится помехой из-за своих габаритов и присущего только ему графика движения. Учитывая его неоспоримое преимущество в способности перевозить пассажиров, давно говорится (но не делается) о необходимости его частичного или полного отделения от общего транспортного потока. Крайняя правая полоса должна по праву принадлежать ГПТОП, а тротуар и разделительные полосы – являться зоной для организации остановочных пунктов и заездных карманов. Создание различных типов отдельных специальных полос для движения ГПТОП и заездных карманов, как элемента инженерного оборудования и благоустройства остановочного пункта, является основой в организации движения на магистральной улично-дорожной сети. Следующим этапом, следующим за созданием специальных приоритетных полос для движения ГПТОП, является общий системный подход к решению вопросов организации городского дорожного движения, когда основой являются транспортные средства общего пользования.

Пропускная способность проезжей части ( $N$ ) определяется, как количество единиц транспорта, которое может быть пропущено в данном сечении в одном направлении в единицу ( $T$ ) времени (в час) в условиях безопасности движения. В основе лежит пропускная способность 1 полосы движения и зависимость вида:

$$N = \frac{3600}{T}$$

Указанная зависимость предполагает двоякое ее использование:

1. для транспортного потока, приведенного к легковому автомобилю, в виде модели следования за лидером в условиях экстренного торможения;
2. для потока ГПТОП в виде модели функционирования остановочного пункта.

Пропускная способность 1 полосы движения проезжей части в соответствии с моделью следования за лидером и определяется по формуле:

$$N_{\text{п}} = \frac{3600 \cdot V}{V \cdot t + \frac{V^2}{2g(\varphi \pm i)}} + l + l_6$$

$N$  – пропускная способность полосы проезжей части, прив.ед/ч;

$V$  – скорость движения, км/ч; изменяется от 0 до 130 км/ч;

$t$  – время реакции водителя, с; изменяется от 0,7 до 1,5 с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>; равно 9,81 м/с<sup>2</sup>;

$\varphi$  – коэффициент сцепления пневмошины с покрытием; в зависимости от условий погоды изменяется от 0,1 до 0,8 ;

$i$  – продольный уклон проезжей части, ‰

$l$  – длина экипажа, изменяется от 5 до 30 м;

$l_6$  – расстояние безопасности при экстренном торможении, изменяется от 2 до 10 м.

Расчеты по модели по средним характеристикам ГПТОП: при скорости 20 км/ч, длине транспортного средства 10 м, коэффициенте приведения 4, показали, что пропускная способность составляет 680 прив.ед/ч или 170 физ.ед/ч.

Исследования показали, что для наземного ГПТОП в существующих условиях его движения возникают различные накладные временные ограничения, которые существенно снижают величину пропускной способности. Среди основных факторов влияния необходимо выделить:

- время задержек на остановочном пункте;
- время задержек в условиях определенного режима работы системы организации дорожного движения (регулируемые и нерегулируемые перекрестки, наземные пешеходные переходы, другие помехи);

- потери времени в зависимости от планировочных характеристик (продольный уклон проезжей части, расстояние между перекрестками),
- потери времени в зависимости от погодных условий (состояние покрытия проезжей части),
- временные помехи от других видов транспорта, находящихся в общем транспортном потоке (легковые и грузовые автомобили, велосипедный и мототранспорт).

Пропускная способность остановочного пункта. Считается [7], что пропускная способность полосы движения ГТОП регулируется возможностями остановочного пункта и определяется в соответствии с моделью работы остановочного пункта по формуле:

$$N = \frac{3600}{T} = \frac{3600}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}$$

$T$  — затраты времени в зоне остановочного пункта, с;

$t_1$  — время подхода к остановочному пункту, с;

$t_2$  — время посадки и высадки пассажиров, с;

$t_3$  — время подачи звукового сигнала и закрытие дверей, с;

$t_4$  — время освобождения остановочного пункта, с.

$$t_1 = \sqrt{\frac{2l}{b}}$$

$l$  — безопасное расстояние между автобусами при подходе к остановке, м

$b$  — замедление при торможении, м/с<sup>2</sup>;

$$t_2 = \frac{\beta \cdot \lambda \cdot t_0}{k}$$

$\beta$  — коэффициент доли входящих и выходящих пассажиров по отношению к нормальной вместимости транспортного средства;

$\lambda$  — вместимость транспортного средства, пасс.;

$t_0$  — время, необходимое на вход/выход одного пассажира, ;

$k$  — количество дверей для входа/выхода пассажиров

$t_3$  — принимается по данным наблюдений,  $t_3=3$  с;

$$t_4 = \sqrt{\frac{2l}{a}}$$

$a$  — ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Исходя из представленных соотношений, пропускная способность зависит, прежде всего, от вместимости транспортных средств и количества

входящих и выходящих пассажиров. Существующие транспортные средства могут вмещать различное количество пассажиров. Учитывая существующий опыт их использования [4], можно определить:

- транспортные средства малой вместимости, до 50 пассажиров;
- транспортные средства средней вместимости, 50-80 пассажиров;
- транспортные средства большой вместимости, 80-100 пассажиров;
- транспортные средства особо большой вместимости, 100-300 пассажиров.

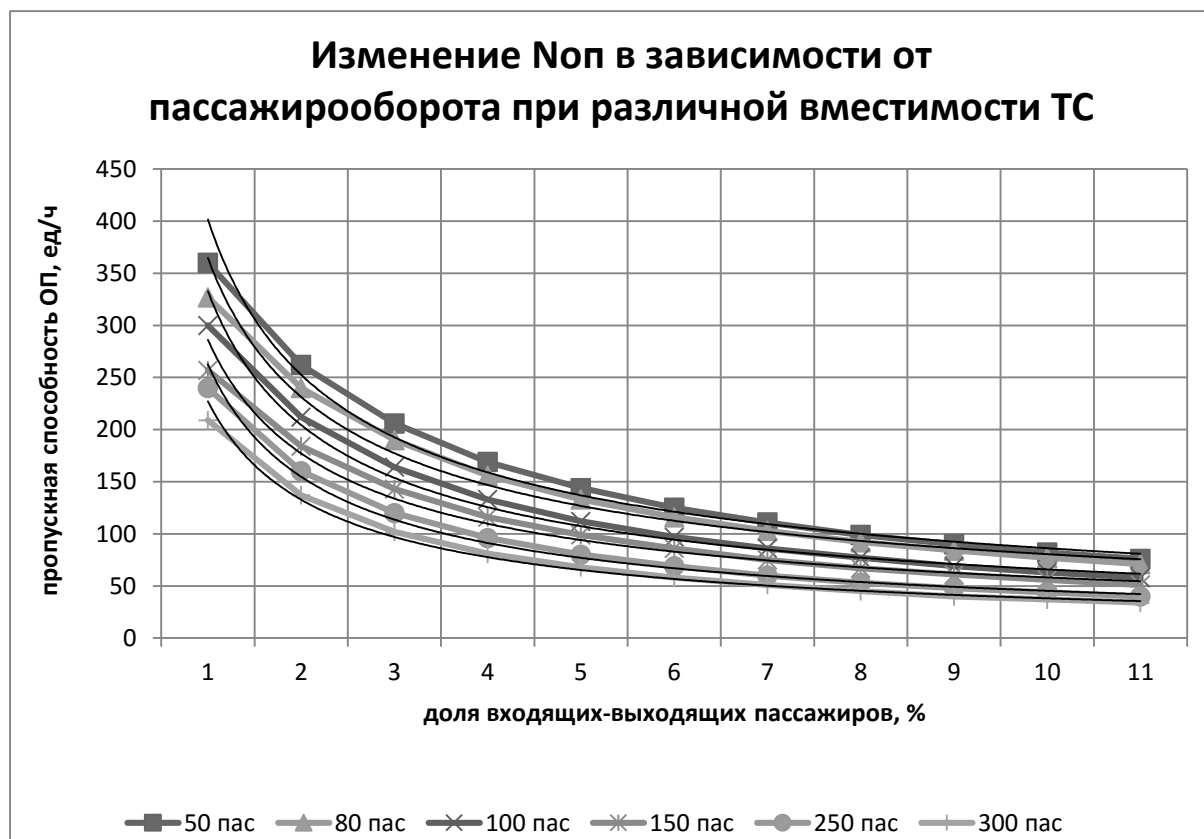


Рис.1.

Зависимость (рис.1) отлично описывается степенной функцией вида  $y = a \cdot x^b$  с высокой степенью достоверности, достигающей величины  $R^2=0,98995$ . Пропускная способность остановочного пункта имеет тенденцию снижения на порядок с 360 ед/ч до 34 ед/ч (в среднем 197 ед/ч) при возрастании пассажирооборота остановочного пункта и увеличении вместимости транспортных средств.

Для оценки адекватности полученных результатов пропускную способность полосы проезжей части ГПТОП можно рассчитать по модели следования за лидером в условиях экстренного торможения, которая является по сути модификацией рассмотренной выше. Модель описывается формулой:

$$N = \frac{3600}{T} = \frac{3600 \cdot V}{V \cdot t + \frac{V^2}{2g(\varphi \pm i)} + l_{тс} + l_{б}}$$

$V$  – расчетная (принятая) скорость движения, м/с;

$t$  – время реакции водителя в условиях экстренного торможения,  $t = 0,7-1,5$ с;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$\varphi$  – коэффициент сцепления пневмоколеса с покрытием,  $\varphi=0,8-0,1$ (в зависимости от состояния покрытия);

$i$  – продольный уклон проезжей части, %

$l_{тс}$  – длина транспортного средства, м;

$l_{б}$  – расстояние безопасности между автомобилями в условиях экстренного торможения, м.

Расчеты показали, что пропускная способность полосы зависит от скорости движения (рис.2) и регулируется размерами транспортных средств.

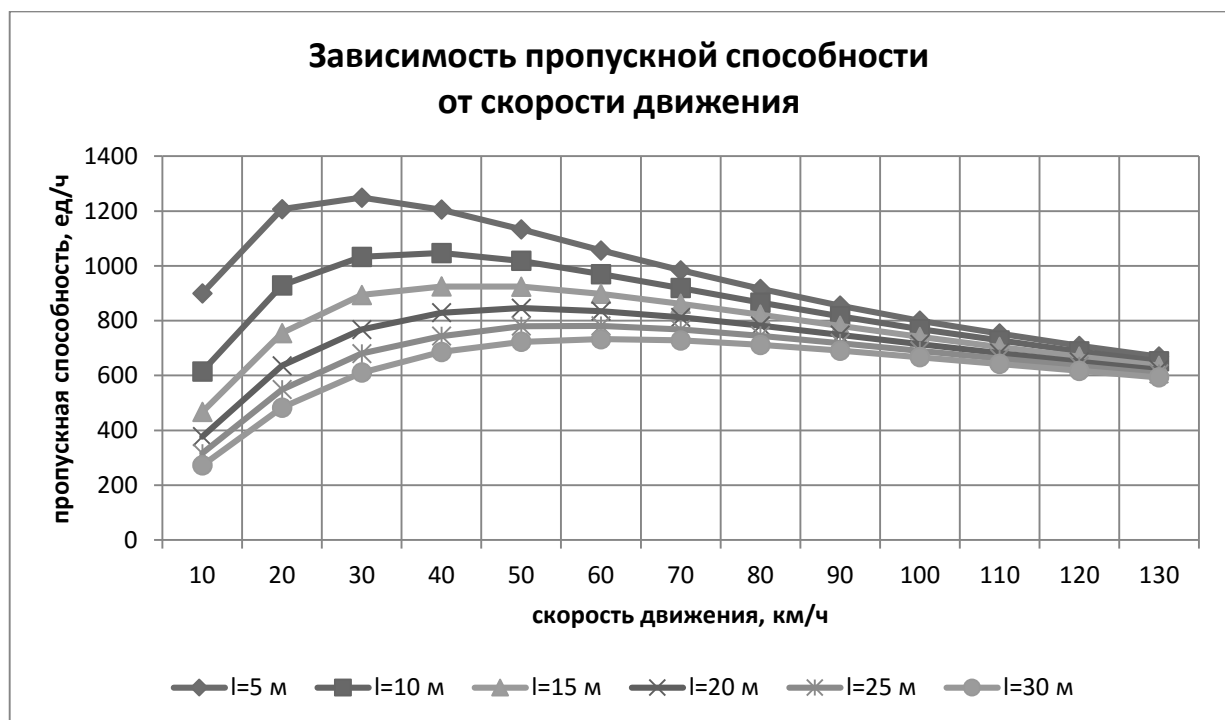


Рис. 2.

Расчеты показали, что модель следования за лидером показывает максимальную пропускную способность для транспортных средств длиной от 10 до 25 м при скоростях движения от 40 до 60 км/ч. Величина составляет 1047 – 781 (в среднем 900 прив.ед/ч) или 209 – 156 (в среднем 180 физ.ед/ч.) при коэффициенте приведения 5 (рис.2). Зависимость описывается полиномиальной зависимостью вида  $y=ax^6+vx^5+cx^4+dx^3+ex^2+fx+g$  с высокой степенью вероятности 0,999.

Расчеты пропускной способности полосы движения проезжей части для наземного ГПТОП показали, что модель функционирования остановочного пункта и модель следования за лидером дают сходные результаты одного порядка 150 – 180 физ.ед/ч. Это означает, что транспортные средства следуют с интервалом 20 – 24 с, что в существующих условиях УДС является невозможным из-за влияния факторов системы организации и регулирования дорожного движения в виде светофорных объектов, дорожных знаков и дорожной разметки, дорожного оборудования, планировочных характеристик УДС (длина перегона, продольный уклон), параллельно следующего общего транспортного потока.

Степень воздействия светофорного регулирования на пропускную способность полосы проезжей части определяется в соответствии с формулой, в основе которой лежит определение коэффициента влияния светофорного регулирования в зависимости от длины перегона между светофорными объектами:

$$K_{co} = \frac{L_n}{L_n + \frac{V^2}{2a} + \frac{V^2}{2b} + \Delta t \cdot V}$$

$K_{co}$  – коэффициент влияния светофорного регулирования;

$L_n$  – длина перегона между светофорными объектами, м;

$V$  – скорость движения, км/ч;

$a$  – ускорение торможения, м/с<sup>2</sup>;

$b$  – ускорение разгона, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – задержка на светофорном объекте, которая определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_{кр} + 2 \cdot t_{ж}}{2}$$

По данным различных авторов [1,2,4,6 ] задержки транспортных средств на светофорных объектах составляют от 23 до 48 с, что в среднем представляет величину 30 с. С учетом этого показателя коэффициент влияния светофорного регулирования в зависимости от длины перегона представляется зависимостью (рис.3) и описывается логарифмической кривой  $y=a \ln(x)+b$  с высокой степенью достоверности  $R^2=0,98435$ . Рост показателя  $K_{co}$  при увеличении длины перегона соответствует увеличению пропускной способности полосы движения. Наилучшие показатели наблюдаются при скорости 20 км/ч, что соответствует средней скорости сообщения при движении ГПТОП по маршруту. Для наиболее распространенного перегона по длине (250 м) в центре г. Киева коэффициент составляет 0,495, что указывает на снижение величины пропускной способности полосы движения в 2 раза при наличии светофорного регулирования.

Факторы влияния других элементов системы организации и регулирования дорожного движения: нерегулируемые перекрестки, наземные пешеходные

переходы, другие, а также фактор наличия параллельно следующего общего транспортного потока были определены опытным путем [2,5], что позволило определить средние понижающие коэффициенты от действия этих факторов.

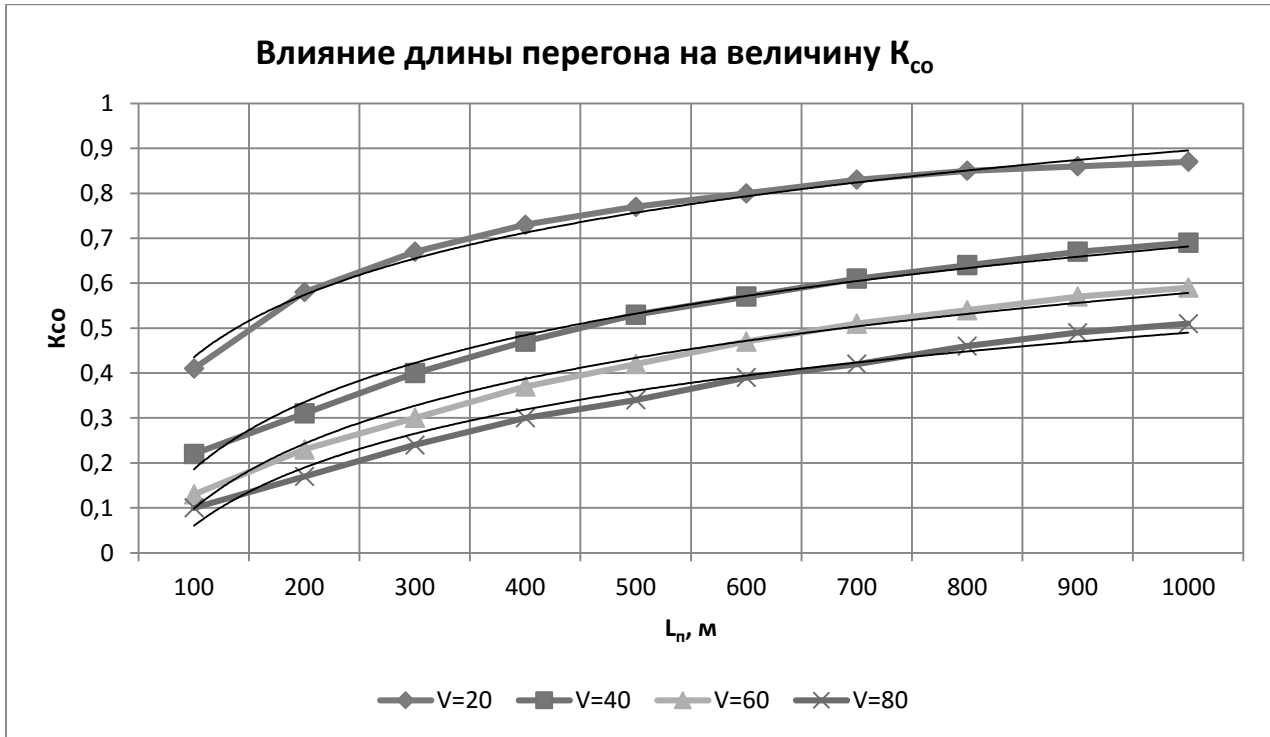


Рис.3.

Расчеты показали, что в средних условиях движения действие факторов системы организации и регулирования дорожного движения и общего транспортного потока можно соответственно оценить понижающими коэффициентами 0,93 и 0,8.

Модель следования за лидером позволяет проследить характер влияния продольного уклона - одной из планировочных характеристик проезжей части и ее состояния в определенных погодных условиях (коэффициент сцепления колеса с проезжей частью), на величину пропускной способности (рис.4). Зависимости описываются полиномиальными кривыми вида  $y=ax^2+bx+c$  с высокой степенью достоверности  $R^2=0,9993$ . Рост величины продольного уклона от  $-100\%$  до  $+100\%$  показывает увеличение пропускной способности для нормативного уклона  $40\%$  в 1,84 раза в плохих погодных условиях ( $\varphi=0,1$ ) и практически неизменную ее величину в хороших погодных условиях ( $\varphi=0,8$ ). Таким образом, коэффициент снижения величины пропускной способности в зависимости от погодных условий для нормативного продольного уклона проезжей части магистральной улично-дорожной сети ( $i=40\%$ ) изменяется от 0,16 при  $\varphi=0,1$  до 0,976 при  $\varphi=0,8$  при среднем величина коэффициенте снижения величины пропускной способности полосы движения - 0,954.

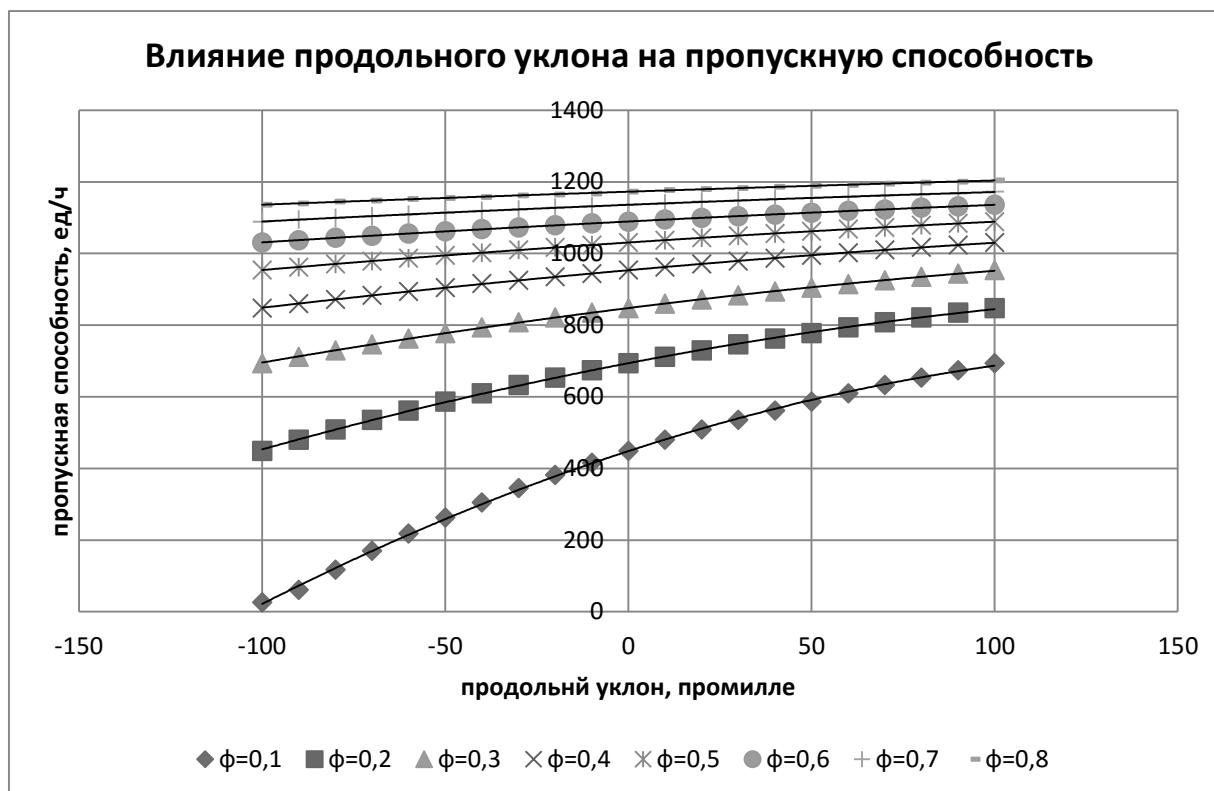


Рис.4.

Результаты проведенных исследований для наглядности можно представить в виде графика, который отражает воздействие различных факторов на пропускную способность полосы движения наземного ГПТОП при его движении “на общих основаниях” в транспортном потоке (рис. 5).

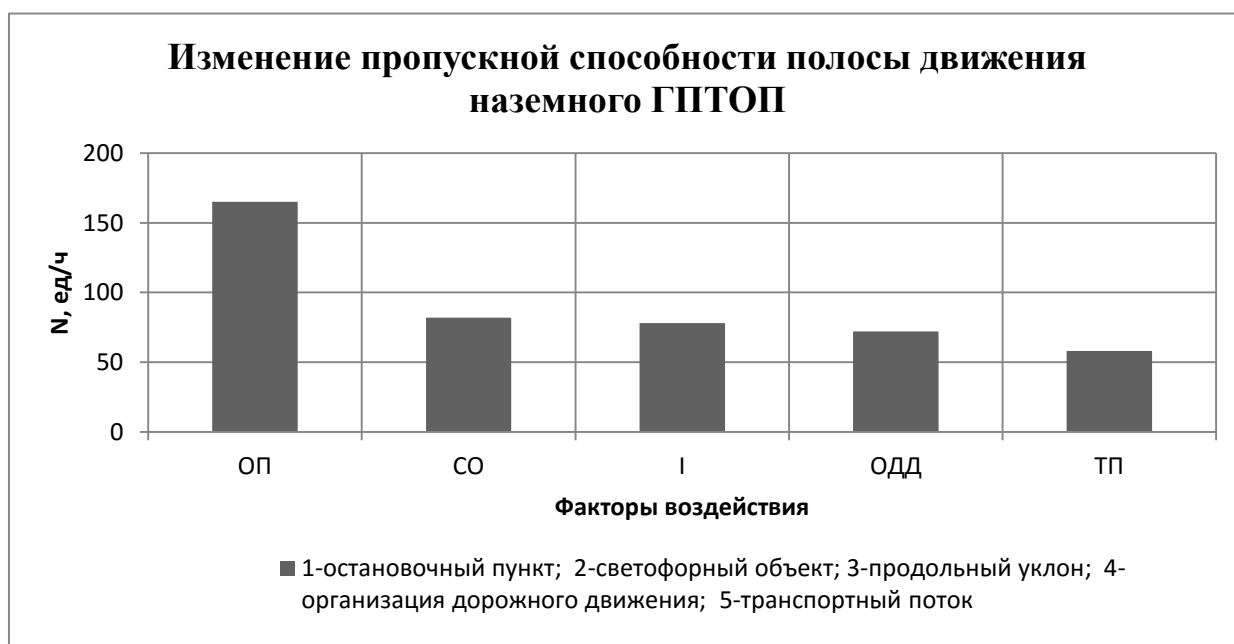


Рис.5.



В результате можно говорить о трехкратном снижении пропускной способности полосы движения для наземного ГПТОП для средних условий движения.

В случае плохих погодных условий величина пропускной способности снижается более чем на порядок. Мировой опыт использования ГПТОП за последние 30 лет показывает, что в городах не существует другой альтернативы, кроме преимущественного использования транспортных средств большой вместимости для перевозки пассажиров. Для эффективного их использования уже недостаточно добиваться высоких результатов простым экстенсивным накоплением их количества на магистральной улично-дорожной сети. В настоящее время уже понятно, что необходимо искать пути интенсивного использования существующей магистральной улично-дорожной сети для средств ГПТОП. Разработанные и практически доказанные методы предоставления различных видов приоритета ГПТОП перед другими видами городских транспортных средств позволяют не только отделить их в пространстве и во времени, но и максимально снизить действующие в плотном общем транспортном потоке помехи на пути движения. Достижение цели передвижений по территории города в рамках нормативных затрат времени в условиях комфорта и безопасности для большинства жителей города позволит в краткие сроки решить основную задачу максимального привлечения населения современного города на ГПТОП.

#### **Литература:**

1. Васильева Г.Ю. Методи оптимізації затримок транспорту на магістральній вулично-дорожній мережі міст України. Дис. канд. техн. наук, Київ, 2007. – 201 с.
2. Дубова С.В. Метод расчета маршрутной сети городского пассажирского транспорта с учетом автоматизированного управления движением. Дисс. канд. техн. наук, Киев, 1989. – 197 с.
3. Дубова С.В. Повышение эффективности функционирования транспортно-планировочной инфраструктуры города. Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К., КНУБА, 2016. – Вип. 59. - С.109-114.
4. Дубова С.В., Зварич І.А. Вивчення часу перебування рухомого складу міського пасажирського транспорту в зоні зупинки. Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К., КНУБА, 2011. – Вип.40. - С. 375-379.

5. Дубова С.В., Зварич І.А. Дослідження впливу особливостей організації дорожнього руху на пропускну здатність ліній міського пасажирського транспорту. Містобудування та територіальне планування: Науково-технічний збірник. Випуск 45. Частина 1. – Київ, КНУБА, 2012. – С. 265 – 268.

6. Дубова С.В., Кадерская Л.В. Исследование пропускной способности участков улично-дорожной сети. Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К., КНУБА, 2010. – Вип.37. - С.160-164.

7. Проектирование дорог и сетей пассажирского транспорта в городах / Е.А. Меркулов, Э.Я. Турчихин, Е.Н.Дубровин и др. – М.: Стройиздат, 1980. – 496 с.

### **Анотація**

Магістральна вулично-дорожня мережа розглянута, як підсистема транспортно-планувальної інфраструктури міста. Представлена математична модель оцінки пропускну здатності смуги руху міського пасажирського транспорту загального користування.

Ключові слова: магістральна вулично-дорожня мережа, пропускну здатність смуги руху, міський пасажирський транспорт загального користування.

### **Annotation**

The arterial street network as a transport network planning infrastructure's subsystem is examined. The mathematic model that determines the capacity of municipal transport's traffic is represented.

Key words: transport network planning infrastructure, passenger traffic, arterial street network, municipal transport.