

Оценка изменений тарифов платной дороги в условиях повышенной транспортной нагрузки

Целью исследования является оценка изменений системы тарификации, применяемой при проезде пользователей через пункт оплаты платной автомобильной дороги. При эксплуатации на платной основе крупных инфраструктурных объектов, реализованных в городской среде, оператор неизбежно сталкивается с необходимостью адаптации интеллектуальной транспортной системы под условия постоянно возрастающего объема и меняющегося состава трафика. Подобные изменения напрямую отражаются на пропускной способности платной дороги, в частности, пунктов взимания платы. Проводимые исследования направлены на анализ метода снижения транспортной нагрузки на ПВП в пиковые часы путем внесения изменений в систему тарификации, направленных на равномерное распределение транспортного потока в течении суток. В качестве примера был выбран пункт взимания платы на основном ходу платной автомобильной дороги Западный Скоростной Диаметр, расположенный в г. Санкт-Петербурге.

Материалы и методы. Для оценки качества функционирования и пропускной способности пункта взимания платы использовалась дискретно-событийная имитационная модель, разработанная в программной среде AnyLogic. Данное программное обеспечение обладает достаточным уровнем детализации для воспроизведения работы системы взимания платы, и позволяющее осуществить управление всеми необходимыми параметрами системы и транспортного потока. Анализа данных, полученных на основании проведенных имитационных экспериментов на модели, осуществлялся с помощью статистического пакета R.

Результаты. В рамках проводимого исследования были определены эксплуатационные характеристики пункта взимания платы, в частности его пороговая пропускная способность, и, в случае её превышения, определена длина возникающей очереди. Учитывая риски оператора, возникающие при образовании транспортного затора, был предложен подход по изменению тарифной политики платной дороги путем использования более гибкой тарификации, основывающейся на разделении дневного тарифа на несколько временных интервалов, и применении повышающих коэффициентов при оплате проезда в часы-пик. На примере пропускного пункта ЗСД были рассмотрены повышающие коэффициенты стоимости проезда в час пик, а также оценены риски снижения получаемого дохода оператора от сбора платы за проезд.

Заключение. На основании полученных результатов может быть проведена оценка эффективности применения мероприятий по изменению существующей тарифной политики, направленных на оптимизацию транспортного потока платной автомобильной дороги. Кроме того, подобный анализ может применяться для оценки инвестиционной привлекательности проекта, разработки тарифной политики, увеличения получаемого дохода и других подобных задачах. Дальнейшее исследование данной области может быть направлено на увеличение экономических показателей инфраструктурных проектов, и выработки дополнительных математических инструментов, применяемых при формировании тарифной политики.

Ключевые слова: Имитационное моделирование, платная дорога, система взимания платы.

Alexander Yu. Talavirya¹, Mikhail B. Laskin²

¹ St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great, St.Petersburg, Russia

² St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St.Petersburg, Russia

Assessment of Changes in Toll Fares in Conditions of Increased Traffic Load

The purpose of the study is to assess changes of toll fares used on toll collection points. When toll road is operating in an urban environment, the operator is inevitably faced with the need to adapt intelligent transport system to the conditions of an ever-increasing volume and changing composition of the traffic. Such changes have a direct impact on the capacity of the toll road, in particular at toll collection points. The conducted research is aimed at analyzing the method of reducing the traffic load at the toll collection points during peak hours by making changes to the toll fares aimed at uniform distribution of traffic flow throughout the day. As an example, a toll collection point on the main road direction of the Western High-Speed Diameter toll road was chosen.

Materials and methods. A discrete-event simulation model developed in the AnyLogic software was used to assess the quality of operation and throughput of the toll collection point. The software has a sufficient level of detail to reproduce the operation of the toll collection system, and allows managing all the necessary parameters of the system and traffic flow. Analysis of the data obtained from the simulated model experiments was carried out using the statistical package R.

Results. As part of the study, the operational characteristics of the toll collection point, in particular its threshold capacity, were

determined, and, if it was exceeded, the length of the emerging queue was determined. Taking into account the operator's risks arising from the formation of a traffic congestion, an approach was proposed to change the toll fare policy of the toll road by using a more flexible fares based on dividing the day time fare into several time intervals and using increasing coefficients for toll fare when paying for travel during peak hours. Using the example of toll booth of the Western High-Speed Diameter, the increasing coefficients of the cost of travel at a rush hour were considered, and the risks of reducing the operator's income from toll collection were assessed.

Conclusion. Based on the results obtained, an assessment of the effectiveness of the application of measures to change the existing toll fare policy, aimed at optimizing the traffic flow of a toll road, can be carried out. In addition, such an analysis can be used to assess the investment attractiveness of a project, develop a toll fare policy, increase income and other similar tasks. Further research can be aimed at increasing the economic indicators of toll road projects, and developing additional mathematical tools used in the formation of toll fare policy.

Keywords: simulation modeling, toll road, toll collection system.

Введение

Платные дороги способствуют росту скорости движения в транспортных сетях, повышению качества, надежности и безопасности перевозок грузов и пассажиров, снижению затрат времени на перемещение, улучшению транспортной доступности регионов России. Решение задач повышения эффективности управления транспортными потоками на платных дорогах неразрывно связано с внедрением современных цифровых систем и моделей, предоставляющих и анализирующих объемы различных транспортных данных. Информационные и имитационные модели могут применяться на всех стадиях реализации строительства дорожного объекта. Его экономическая эффективность оценивается на протяжении всего жизненного цикла — на этапе инвестиционной оценки проекта, на стадиях проектирования, строительства, а также в процессе эксплуатации. Имитационное моделирование, применяемое при реализации проектов платных дорог, может применяться как при проектировании, так и при эксплуатации инфраструктурного объекта. На эксплуатационной стадии, такие цифровые решения позволяют повышать качество принятия решений оператором платной дороги, снижая эксплуатационные и экономические риски за счет моделирования и прогнозирования возможных транспортных ситуаций.

Авторами данной статьи исследуется вопрос применения имитационного моделирования на пунктах взимания платы (далее — ПВП) платных автомобильных дорог. Имитационные модели применялись для оценки транспортной обстановки на пропускном пункте, прогнозировании транспортной обстановки на ПВП, организации мероприятий по

оптимизации работы системы взимания платы (далее — СВП), анализу экономических показателей функционирования ПВП, в частности, был предложен метод к оценке рисков оператора платной автомобильной дороги при возникновении заторов на пропускном пункте [1].

От эффективности эксплуатации и качества управленческих решений, принимаемых при управлении ПВП, в конечном счете, зависит собираемость денежных средств на пропускном пункте, которая определяется не только экономическими, но и сопутствующими транспортными, социальными и экологическими характеристиками транспортного объекта.

Оценка экономических рисков при эксплуатации ПВП

Различные аспекты экономической эффективности при управлении пропускным пунктом нашли отражение в ряде научных работ зарубежных авторов. Таксономия методов формирования стоимости оплаты за проезд по платным дорогам приведена авторами Saharanet al. [2]. Технологический подход к решению данного вопроса рассмотрен в статьях Clementset al. и Milenkovicetal. [3–4]. В работах Holguín-Verasetal., Danko&Gulewicz, Gonzales&Christofa, Golob, Eliasson, Börjesson et al., Tsai & Li и Swami et al. уделяется внимание особенностям формирования тарифов на локальных проектах платных дорог в г. Нью-Йорк [5–6], г. Сан-Франциско [7], г. Сан-Диего [8], США, г. Стокгольма, Швеция [9–10], г. Тайбей, Тайвань [1] и Индии [12]. Исследование Португальского опыта изменения способа оплаты проезда по платным дорогам представлено в работе Amorim et al. [13]. Авторами представлен инструмент оптимизации для распределения

рубежей взимания платы на сегментах существующей автомагистрали, максимизирующий доходы от сбора. Вопросу системы ценообразования, позволяющей уменьшить заторы на дорогах посвящено исследование авторов Murata & Kawakami [14]. Предлагаемый метод использует информацию о спросе для решения задачи комбинаторной оптимизации для максимизации общего дохода оператора дороги, при ограничении пропускной способности ПВП. Решение задачи взимания платы на пропускных пунктах, являющихся «узкими местами» платной дороги с помощью моделей торможения, ADL и Laih, рассмотрена в работе Xu et al. [15]. Достоинства и недостатки проектируемых ПВП, комплексно рассматриваемых с точки зрения безопасности, пропускной способности и стоимости оплаты проезда, представлены в работе Heet al. [16]. Следует отметить, что для анализа использовалась гидродинамическая модель, заменившая дискретные и макроскопические группы транспортных средств непрерывным и микроскопическим «гидродинамическим» потоком.

Отдельно следует обратить внимание на работу Kim [17], рассматривающую комплексный подход к принятию решений для проектирования нового ПВП с последующим поиском оптимальной динамической конфигурации СВП для оценки влияния увеличения транспортного потока на время ожидания с помощью анализа чувствительности и разработки долгосрочной стратегии эксплуатации ПВП. Исследование прикладного характера наглядно демонстрирует эффективность разработанной модели нелинейного целочисленного программирования и стратегии по снижению эксплуатационных расходов и затрат на ожидание пользователей, что в совокупности приводит к

улучшению функционирования СВП на ПВП.

Отметим, что на эксплуатационной стадии платной дороги транспортный поток, проходящий через ПВП, постоянно меняет свои характеристики, на что оператор дороги должен обращать внимание. Так, применение бесконтактных электронных платежей, или электронных средств регистрации проезда (далее – ЭСРП), становится все более распространенным явлением в процессах оплаты за проезд, особенно на проектах, находящихся вблизи или непосредственно внутри крупных городских агломераций.

Одним из наиболее характерных примеров такого инфраструктурного проекта является платная автомобильной дорога «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге (далее – ЗСД).

Оператором платной дороги ЗСД обеспечивается активное и динамичное распространение ЭСРП для оплаты проезда её пользователями. Так, в период с мая 2021 по апрель, количество пользователей, использующих ЭСРП, выросло на 2% и на сегодняшний день достигает доли 93% [18–19].

Отметим, что ЗСД имеет развязки, расположенные как в спальных, так и в центральных районах города. Это обеспечивает наличие как ярко выраженных трудовых корреспонденций, осуществляемых в будние дни локальными пользователями, и создающие повышенные нагрузки на ПВП в часы пик, так и рекреационных корреспонденций, осуществляемых в загородном направлении в период с пятницы по воскресенье. Количество загородных поездок, осуществляемых пользователями ЗСД, активно растет, что подтверждается оператором дороги [20]. Возникающие на ПВП заторы могут служить причиной дорожно-транспортных происшествий, а также приводить к возникновению эконо-

мических рисков для проекта. Таким образом, при отсутствии эффективного управления платной дорогой, на ПВП имеется риск возникновения транспортного затора, негативно сказывающегося на экономических, транспортных, социальных и экологических показателях платной дороги. Для решения эксплуатационной задачи по прогнозированию транспортных заторов на ПВП и оценке экономических рисков, связанных с их появлением, оператором могут быть использованы методы математического и имитационного моделирования.

Материалы и исследовательские вопросы

В целом, ПВП может быть рассмотрен как классическая система массового обслуживания с определенным количеством и конфигурацией полос с двумя различными параметрами интенсивности обслуживания – для ручного и автоматического способов оплаты проезда. Такая модель может быть описана системой дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, однако, при этом не будут учтены такие важные для изучения процесса факторы как: доля пользователей ЭСРП в потоке; распределение транспортных средств (далее – ТС) по классам; ошибки пользовательского поведения. Напротив, учет этих факторов делает крайне затруднительным применение методов классической теории массового обслуживания. В качестве альтернативы, для исследования трафика на ПВП, был выбран метод имитационного моделирования.

Для оценки эффективности работы СВП при эксплуатации ПВП была разработана дискретно-событийная имитационная модель ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД», расположенно-

го на Северном участке ЗСД. Следует отметить, что в отличие от обобщенной методики моделирования ПВП, которая применяется при проектировании платной дороги, применение методов имитационного моделирования на этапе ее эксплуатации позволяет учитывать и отражать ряд дополнительных условий, которые могут быть выявлены после завершения строительства объекта, и оказывать значительное влияние на эффективность работы СВП. Такие условия могут быть вызваны особенностями географического расположения ПВП, изменением состава трафика, регулярности пользовательских корреспонденций, а также воздействиями изменений окружающей транспортно-логистической и социальной инфраструктуры. Отметим, что район, в котором находится рассматриваемый ПВП, находится в активной стадии застройки [21], что означает стабильный рост интенсивности движения на всех близлежащих пропускных пунктах Северного участка ЗСД, в том числе расположенных на пересечении с КАД (Север). Имитационная модель была разработана в программном обеспечении AnyLogic с использованием библиотек дорожного движения и моделирования процессов.

Общий вид разработанной имитационной модели ПВП представлен на рис. 1.

Существующая конфигурация ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» предусматривает 9 полос оплаты проезда, 5 из которых работают в автоматическом режиме и обеспечивают оплату проезда с использованием ЭСРП. Разработанная имитационная модель ПВП позволяет учитывать следующие параметры:

- Интенсивность движения на ПВП;
- Состав трафика;
- Распределение ТС по способам оплаты;



Рис. 1. Имитационная модель ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД». Общий вид.

Fig.1. Simulation model of toll collection point “The main run in front of the Ring Road (North) towards the Ring Road”. General view

- Время обслуживания на автоматической полосе;
- Время обслуживания на полосе наличной оплаты;
- Режимы работы полос;
- Дополнительные параметры (пользовательское поведение – параметр: «tagfailure»).

Вводимый дополнительный параметр пользовательского поведения «tagfailure» учитывает вероятность отказа ЭСРП при проезде через автоматические полосы в случае, если ТС не был считан антенной телеоплаты при въезде на полосу, ЭСРП был некорректно закреплен в ТС, или имеет отрицательный баланс, то есть не принимается к оплате. В таких случаях, автоматическая полоса блокируется пользователем, до устранения причин отказа считывания ЭСРП. Данный параметр никогда не учитывается на этапе проектирования СВП, тем не менее, он играет значительную роль при ее эксплуатации, особенно в пиковые часы нагрузки ПВП.

Для оценки существующей эффективности работы ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» была реализована имитационная модель, учитывающая текущий режим конфигурации СВП (5 автоматических и 4 ручные полосы), а также существующую долю использования пользователями ЭСРП – 93% [19].

В рамках исследования рассмотрены следующие вопросы:

1. При каких интенсивностях входного потока на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» может возникнуть затрудненное движение или образоваться транспортный затор?

2. Какие параметры будет иметь образовавшийся транспортный затор?

3. Какие экономические риски оператора могут возникнуть при образовании транспортного затора на ПВП и можно ли их снизить с помощью изменения тарифа?

Интенсивность движения на ПВП

На рис. 2 показаны графики наблюдаемой интенсивности на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону

КАД» по дням недели (более подробная информация о данных интенсивности приведена в статье [1]). При проведении экспериментов на разработанной имитационной были использованы следующие параметры: конфигурация ПВП включает 9 полос оплаты, из которых 5 полос функционируют в автоматическом режиме, 4 – в ручном режиме; доля пользователей, осуществляющих оплату по ЭСРП – 93%; параметр пользовательского поведения – 7,5%. По результатам экспериментов были проиграны имитационные модели ПВП, функционирующие при интенсивностях в диапазоне от 100 до 4500 ТС в час, в ходе которых было установлено, что затрудненное движение или транспортный затор начинают устойчиво формироваться при интенсивности входного потока – 2150 ТС в час (показана на рис. 2 пунктирной линией).

Среди показанных на рис.2. интенсивностей, наибольшее значение плотности транспортного потока достигается в пятницу. По будним дням, с понедельника по четверг наблюдаются примерно одинаковые интенсивности движения. Линия, соответствующая интенсивности движения в субботу, в период с 13:00 до 14:00 кратковременно приближается к пороговой интенсивности 2150 ТС в час. В воскресенье

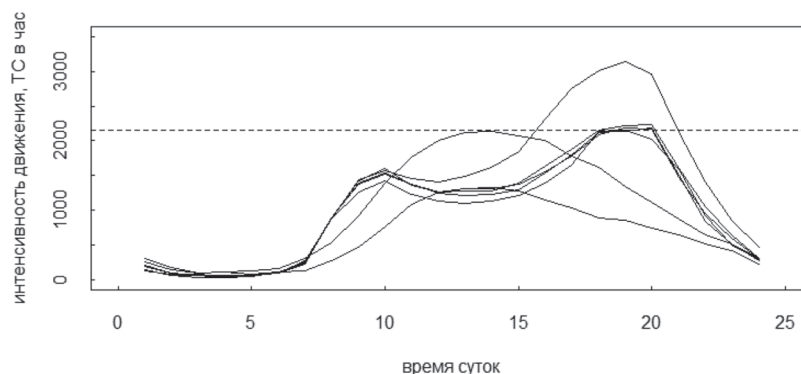


Рис. 2 Наблюдаемые интенсивности по дням недели для ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД».

Fig.2. Observed intensities by days of the week for the toll collection point “The main run in front of the Ring Road (North) towards the Ring Road”.

интенсивность движения не достигает пороговых значений. Таким образом, из рис. 2 видно, что на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД»:

- интенсивность входного потока превышает интенсивность 2150 ТС в час по пятницам с 15:00 до 21:00, что может привести к затруднению движения или образованию транспортного затора с 15:00;

- возможно кратковременное затруднение движения с понедельника по четверг в вечерние часы-пик с 17:00 до 20:00, так как интенсивность входного потока превышает пороговую интенсивность 2150 ТС;

- возможно кратковременное затруднение движения в субботу, в дневное время с 13:00 до 14:00;

- возникновение затрудненного движения или транспортного затора в воскресенье маловероятно.

Далее будет рассматриваться интенсивность движения для пятницы, имеющая значительное превышение пороговой пропускной способности ПВП, которая может привести к затруднению движения или образованию затора перед пропускным пунктом.

На рис. 3 приведен график изменения средней длины очереди на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» для пятницы с момента времени 15:00. Отметим, что существование очереди не ограничивается моментом времени 21:00, так как ПВП продолжает осуществлять обслуживание ТС, уже скопившихся перед ПВП, когда интенсивность входного потока ТС была выше пропускной способности зоны ПВП.

Средняя длина очереди и интервалы $\pm 3\sigma$ для длины очереди (показаны пунктиром) рассчитаны по формулам, приведенным в работе [1]. Максимальная длина очереди достигается на момент време-

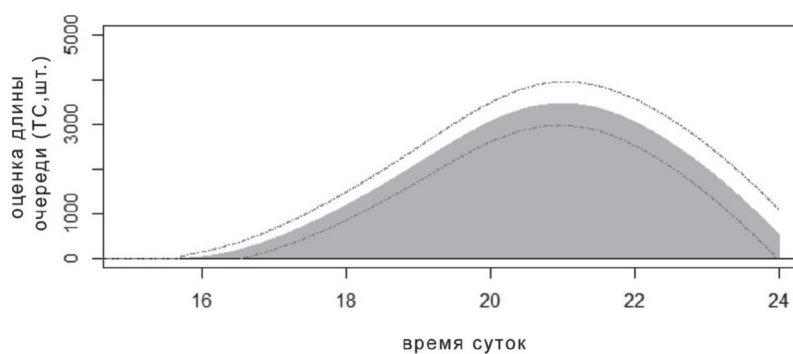


Рис. 3. График изменения длины очереди на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» по пятницам с 15:00 до 24:00.

Fig. 3. The graph of the change in the length of the queue at the toll collection point “The main run in front of the Ring Road (North) towards the Ring Road” on Fridays from 15:00 to 24:00.

ни 21:05 и составляет 3465 ТС, интервал $\pm 3\sigma$ от 2979 ТС в час до 3953 ТС в час. Отметим, что при формировании транспортного затора водителями могут не соблюдаться правила дорожного движения по сохранению безопасной дистанции между ТС, а также сопутствовать частые перестроения при замедленном движении, что не позволяет дать точную оценку длины затора, однако, оценочный расчет, допускающий формирование транспортного затора в 3 или 4 ряда дает оценку от 6 до 9 км (из расчета

8 метров на одно ТС). На рис. 4 показаны данные картографического сервиса «Яндекс.Карты» по состоянию на момент времени 18:45 в пятницу, 23 июля 2021 г. Длина участка с затрудненным движением (скорость движения на участке значительно меньше, чем на свободной дороге) в этот момент составляла 5,95 км. (показана на рис. 5).

В случае возникновения транспортного затора или затруднения движения для оператора платной дороги возникают следующие риски:



Рис. 4. Скриншот картографического сервиса «Яндекс.Карты» по состоянию на момент времени 18:45 в пятницу, 23 июля 2021 г.

Fig. 4. Screenshot of the “Yandex.Maps” map service as of the moment of time 18:45 on Friday, July 23, 2021.



Рис. 5 Скриншот картографического сервиса «Яндекс.Карты» по состоянию на момент времени 18:45 в пятницу, 23 июля 2021 г. Длина участка с затрудненным движением показана в режиме «Линейка».

Fig. 5. Screenshot of the “Yandex.Maps” map service as of the moment of time 18:45 on Friday, July 23, 2021. The length of the section with traffic congestion is shown in the “Ruler” mode.

- невыполнение оператором дороги норматива по обеспечению пропускной способности (данный вопрос был рассмотрен в работе [1]);
- увеличение вероятности возникновения ДТП на участке дороги;
- увеличение негативной социальной оценки проекта со стороны пользователей;
- ухудшение транспортных характеристик дороги;
- ухудшение экологических показателей дороги.

Оценка изменений тарифов оплаты за проезд на ПВП

В связи с возможностью изменений правил взимания платы за проезд по платным дорогам [22], одним из способов борьбы с транспортными заторами на платных дорогах, в частности, образующимися перед ПВП, может быть изменение тарифной политики, применяемой оператором.

Данная политика определяется владельцем, концессионером или оператором дороги в соответствии с требуемыми экономическими показателя-

ми платной дороги. Тарифная политика и интенсивность движения на платной дороге являются двумя основными факторами, влияющие как на получаемый доход, так и на дальнейшую инвестиционную стратегию инфраструктурного проекта. Так, на ЗСД, основными параметрами, формирующими тарифы, являются: категория ТС, способ оплаты проезда, маршрут проезда (для проездов по транспондеру), а также время проезда [23].

Рассмотрим один из возможных вариантов изменения тарифной политики платной дороги, заключающийся в использовании нескольких временных интервалов в течение суток, направленных на снижение интенсивности движения в пиковые часы и перераспределения транспортного потока в течении суток. Данная тарифная политика была реализована на участке км 15 – км 58 автомобильной дороги М-11 «Нева», разделив тарифы последующим временным интервалам: с 1:00 до 6:00, с 6:00 до 14:00, с 14:00 до 18:00, с 18:00 до 22:00, с 22:00 до

1:00[24-25]. Так, для ТС первой тарифной группы, проезд по участку платной дороги с 18:00 до 22:00 характеризуется повышенной стоимостью.

Очевидно, что повышение тарифов, помимо возможного социального напряжения, может привести к изменениям собираемости платы за проезд, так как часть пользователей может отказаться от поездок по платной дороге, выбрав бесплатный альтернативный маршрут, или изменить время проезда через по платной дороге с целью снижения затрат на оплату проезда. При повышении тарифа при проезде в пиковые часы, актуальной является задача определения предельной доли пользователей, сохранивших свои транспортные корреспонденции в часы пик, при которой оператор дороги не снижает расчётный показатель получаемого дохода от сбора оплаты.

С точки зрения теории микроэкономики, данный вопрос является задачей изучения эластичности спроса по цене. В действительности, изучение такой эластичности затруднено тем, что для решения подобной задачи целесообразной была бы эмпирическая оценка суточного трафика при применении различных тарифов. Однако, подобные эмпирические исследования могут привести к негативным социальным резонансам.

Пусть тариф равен T . Предположим, что в часы пик предлагается применить повышающий коэффициент K . Предположим, что часть пользователей $\alpha \in [0,1]$ откажется от поездок по платной дороге, выбрав бесплатный альтернативный маршрут, часть пользователей $\gamma \in [0,1 - \alpha]$ изменит время проезда по платной дороге, оставшаяся часть пользователей $\beta = 1 - \alpha - \gamma$ совершит проезд в час пик, не изменив своего решения. Для того, чтобы выручка оператора не уменьшилась, должно выполняться условие

$$\beta \times T \times K + \gamma \times T - \alpha \times T \geq (\alpha + \beta + \gamma) \times T,$$

которое легко приводится к виду: $\frac{\beta}{\alpha} \geq \frac{2}{K-1}$.

Введем обозначение $P = \frac{\beta}{\alpha}$.

Под переменной P будем понимать параметр, показывающий отношение количества пользователей платной дороги, продолжающих пользоваться ею в час пик после повышения тарифа к количеству пользователей, отказавшихся от поездок по платной дороге. На рис.6 показан график гиперболы вида $P = \frac{2}{K-1}$ (граница заштрихованной области).

В заштрихованной области условие $\frac{\beta}{\alpha} \geq \frac{2}{K-1}$ не выполняется. В не заштрихованной области условие выполняется. Из рис. 6 видно, что при введении повышающего коэффициента $K = 1,25$ количество ТС продолжающих пользоваться платной дорогой в часы пик должно быть более, чем в 8 раз выше количества ТС, отказавшихся от пользования ей, при $K = 1,5$ этот показатель снижается до 4, при $K = 1,75$ до 2,67, при $K = 2$ до 2. Важно отметить, что показатель с ростом K снижается нелинейно.

На примере ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД», для приведенной на рис. 2 интенсивности движения в пятницу, увеличение трафика над величиной 2150 ТС в час наблюдалось в период времени с 15:41 до 21:00. За это время к началу очереди перед ПВП прибыло в сумме 14907 ТС, которые находились в условиях затрудненного движения или транспортного затора. Рассмотрим применение следующих повышающих коэффициентов: $K = 1,25; 1,5; 1,75; 2$ для данного ПВП в пятницу, в период времени с 15:41 до 21:00. Если из 14907 пользователей 1000 пользователей откажутся от поездок че-

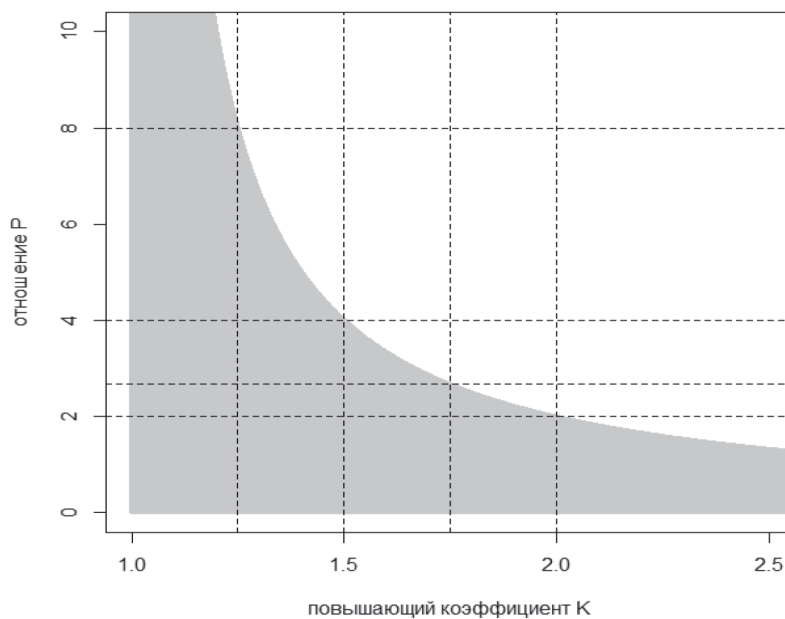


Рис. 6. График гиперболы $P = \frac{2}{K-1}$.

Fig. 6. Graph of hyperbola $P = \frac{2}{K-1}$.

рез данный пропускной пункт, выбрав бесплатный альтернативный маршрут, то при $K = 1,25; 1,5; 1,75; 2$, соответственно, более 8000; 4000; 2670; 2000 пользователей, совершающих проезд через ПВП без изменений времени поездки, обеспечат оператору платной дороги рост получаемого дохода. При этом следует понимать, что отказ от поездок через данный пропускной пункт 1000 пользователей может существенно не повлиять на возникновение ситуаций затрудненного движения, даже если оставшиеся пользователи дороги изменят время проезда. В то же время, значительное повышение тарифа может привести к существенному росту отказов от поездок пользователей. В этом случае может быть решена проблема затрудненного движения перед ПВП, однако получаемый доход оператора может снизиться. Например, при $K = 2$ и отказе от поездок 5000 пользователей, сохранить уровень получаемого дохода оператора может 10000 пользователей, совершающих поезд-

ки в час пик. На данном ПВП в час пик наблюдалось примерно 15000 (14907) пользователей. Таким образом, если часть пользователей продолжат совершать проезды через ПВП, изменив время проезда, то при числе пользователей ниже 10000, проезжающих через ПВП в часы пик, уровень получаемого дохода оператора может снизиться.

Заключение

При эксплуатации крупных инфраструктурных проектов платных дорог, реализованных в городской среде, оператор неизбежно будет сталкиваться с необходимостью оптимизации систем, процессов и мероприятий, направленных на обеспечение комфортного проезда и сбора платы за проезд. Одним из наиболее критичных для оператора случаев является обслуживание пользователей в часы пик, когда интенсивность транспортного потока превышает предельную пропускную способность ПВП. Подобный случай был рассмот-

рен на примере пропускного пункта автомобильной дороги ЗСД. По результатам имитационного моделирования была определена его предельная пропускная способность и оценены риски для рассматриваемых интенсивностей на данном ПВП. Для пиковой интенсивности движения, происходящей на период времени с 15:00 до 21:00 в пятницу, была определена длина возникающей очереди. Полученные результаты были подтверждены данными картографического сервиса «Яндекс.Карты». Учитывая риски оператора, возникающие при образовании транспортного затора перед ПВП, для снижения объема трафика в часы пик и его равномерного распределения в те-

чении суток, был предложен подход (уже апробированный на других отечественных проектах) по изменению тарифной политики платной дороги. При использовании более гибкой тарификации, основывающейся на разделении дневного тарифа на несколько временных интервалов и применении наибольшей стоимости проезда в час-пик, ожидается, что часть пользователей откажутся от поездок или изменят время проезда, тем самым снизят пиковую нагрузку на ПВП. На примере пропускного пункта ЗСД в работе были рассмотрены повышающие коэффициенты стоимости проезда в час пик в диапазоне от 1,25 до 2, и оценены риски снижения по-

лучаемого дохода оператора от сбора платы за проезд.

Результаты исследования могут быть применены на разных стадиях реализации проекта, и использоваться для оценки рентабельности проекта, разработки или изменения тарифов оплаты проезда, разработки мероприятий по снижению транспортной нагрузки на платную дорогу. При этом, дальнейшее изучение данного вопроса позволит произвести более точную оценку мероприятий, связанных с внедрением «гибкой» тарификации пользователей, позволяющей оптимизировать загруженность автомобильной дороги, не снижая (или повышая) получаемый доход оператора платной дороги.

Литература

1. Талавира А.Ю., Ласкин М.Б. Подход к оценке рисков оператора платной автомобильной дороги // Статистика и Экономика. 2021. № 18(3). С. 12–26.
2. Saharan S., Bawa S., Kumar N. Dynamic pricing techniques for Intelligent Transportation System in smart cities: A systematic review // Computer Communications. 2020. T. 150. С. 603–625.
3. Clements L. M., Kockelman K. M., Alexander W. Technologies for congestion pricing // Research in Transportation Economics. 2020. 100863. С. 1–9.
4. Milenkovic M., Glavic D., Mladenovic M. Decision-Support Framework for Selecting the Optimal Road Toll Collection System // Journal of Advanced Transportation. 2018. С. 1–16.
5. Holguín-Veras J., Encarnación T., González-Calderón C. A. User perception of fairness of time-of-day pricing and other typical toll discounts // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2020. T. 137. С. 560–581.
6. Danko J., Gulewicz V. Insight through innovation: a dynamic approach to demand based toll plaza lane staffing // Proceedings of Winter Simulation Conference. 1994. С. 1116–1123.
7. Gonzales E. J., Christofa E. Empirical assessment of bottleneck congestion with a constant and peak toll: San Francisco–Oakland Bay Bridge // EURO Journal on Transportation and Logistics. 2014. T. 3. С. 267–288.
8. Golob T.F. Joint models of attitudes and behavior in evaluation of the San Diego I-15 congestion pricing project // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2001. T. 35. № 6. С. 495–514.
9. Eliasson J. Lessons from the Stockholm congestion charging trial // Transport Policy. 2008. T. 15. № 6. С. 395–404.
10. Börjesson M., Eliasson J., Hugosson M.B. & Brundell-Freij, K. The Stockholm congestion charges—5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt // Transport Policy. 2012. T. 20. С. 1–12.
11. Tsai J.-F., Li S.-C. Cordon tolling for mixed traffic flow // Transportmetrica A: Transport Science. 2019. T. 15. № 2. С. 1662–1687.
12. Swami H., Bari C., Dhamaniya A. Developing Policy Framework of Dynamic Toll Pricing in India // Transportation Research Procedia. 2021. T. 52. С. 605–612.
13. Amorim M., Lobo A., Couto A. Tolling motorways in the time of economic downturn: the case of Portugal // Transport. 2019. T. 34. № 2. С. 146–154.
14. Murata K., Kawakami T. Evaluation of a Road Pricing Method Based on Demand Distribution in Micro Traffic Simulation // 2021 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops). 2021. С. 257–262.
15. Xu D., Guo X., Zhang G. Constrained optimization for bottleneck coarse tolling // Transportation Research Part B: Methodological. 2019. T. 128. С. 1–22.
16. He X., Jiang S., Zhong L., Sun Q. Optimization of Toll Plaza Based on Progressive Analysis // 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). 2018. С. 7961–7968.
17. Kim S. The toll plaza optimization problem: Design, operations, and strategies // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2009. T. 45. № 1. С. 125–137.

18. Водители используют уже 700 тысяч транспондеров ЗСД. Новости [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт оператора ООО «Магистраль северной столицы». Режим доступа: <https://nch-spb.com/media/news/drivers-use-already-700-thousand-transponders-zsd/>. (Дата обращения: 20.07.2021).

19. 10 лет назад в офисе ЗСД был выдан первый в России транспондер, с тех пор на магистрали совершено более полумиллиарда транзакций. Новости [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт оператора ООО «Магистраль северной столицы». Режим доступа: <https://nch-spb.com/media/news/10-let-nazad-v-ofise-zsd-byl-vydan-pervyy-v-rossii-transponder-s-tekh-por-na-magistrali-soversheno-b/>. (Дата обращения: 20.07.2021).

20. Транспортный поток на ЗСД: итоги первого полугодия 2021. Новости [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт оператора ООО «Магистраль северной столицы». Режим доступа: <https://nch-spb.com/media/news/transportnyy-potok-na-zsd-itogi-pervogo-polugodiya-2021/>. (Дата обращения: 20.07.2021).

21. Территории роста: какое будущее строят в Петербурге. Недвижимость [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт деловой «Деловой Петербург». Режим доступа: https://www.dp.ru/a/2021/05/24/Territorii_rosta_kakoe_b. (Дата обращения: 20.07.2021).

22. С места в барьер. Новости [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт газеты «Коммерсантъ». Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4836866>. (Дата обращения: 20.07.2021).

23. Приложение №1 к Приказу №23 от 23.11.2020 г. Об утверждении Базовых тарифов на проезд по автомобильной дороге «Западный скоростной диаметр», Базовых тарифов «Транспондер» на проезд по автомобильной дороге «Западный скоростной диаметр» и стоимости Дополнительных услуг — Тарифных опций к Базовому тарифу «Транспондер» [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт оператора ООО «Магистраль северной столицы». Режим доступа: https://nch-spb.com/upload/iblock/341/Priozheniya-_1_2-k-Prirazhu-_23-ot-23.11.2020.pdf. (Дата обращения: 20.07.2021).

24. Приложение №1 к Приказу №009/2021-Т от «20» апреля 2021 года Тарифы за проезд по участку от МКАД до Солнечногорска автомобильной дороги М-11 «Москва - Санкт-Петербург» [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт компании ООО «Северо-Западная концессионная компания». Режим доступа: <https://m11-neva.ru/viewfile.php?id=6511&ib=9>. (Дата обращения: 20.07.2021).

25. Приложение №2 к Приказу №009/2021-Т от «20» апреля 2021 года Тарифы за проезд по участку от МКАД до Солнечногорска автомобильной дороги М-11 «Москва - Санкт-Петербург» [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт компании ООО «Северо-Западная концессионная компания». Режим доступа: <https://m11-neva.ru/viewfile.php?id=6512&ib=9>. (Дата обращения: 20.07.2021).

References

1. Talavirya A.YU., Laskin M.B. An approach to risk assessment of a toll road operator. *Statistika i Ekonomika = Statistics and Economics*. 2021; 18(3): 12-26. (In Russ.)

2. Saharan S., Bawa S., Kumar N. Dynamic pricing techniques for Intelligent Transportation System in smart cities: A systematic review. *Computer Communications*. 2020; 150: 603-625.

3. Clements L. M., Kockelman K. M., Alexander W. Technologies for congestion pricing. *Research in Transportation Economics*. 2020; 100863: 1-9.

4. Milenkovic M., Glavic D., Mladenovic M. Decision-Support Framework for Selecting the Optimal Road Toll Collection System. *Journal of Advanced Transportation*. 2018: 1-16.

5. Holguín-Veras J., Encarnación T., González-Calderón C. A. User perception of fairness of time-of-day pricing and other typical toll discounts. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020; 137: 560-581.

6. Danko J., Gulewicz V. Insight through innovation: a dynamic approach to demand based toll plaza lane staffing. *Proceedings of Winter Simulation Conference*. 1994: 1116-1123.

7. Gonzales E. J., Christofa E. Empirical assessment of bottleneck congestion with a constant

and peak toll: San Francisco—Oakland Bay Bridge. *EURO Journal on Transportation and Logistics*. 2014; 3: 267-288.

8. Golob T.F. Joint models of attitudes and behavior in evaluation of the San Diego I-15 congestion pricing project. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2001; 35: 6: 495—514.

9. Eliasson J. Lessons from the Stockholm congestion charging trial. *Transport Policy*. 2008; 15; 6: 395-404.

10. Börjesson M., Eliasson J., Hugosson M.B. & Brundell-Freij, K. The Stockholm congestion charges—5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt. *Transport Policy*. 2012; 20: 1—12.

11. Tsai J.-F., Li S.-C. Cordon tolling for mixed traffic flow. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2019; 15; 2: 1662-1687.

12. Swami H., Bari C., Dhamaniya A. Developing Policy Framework of Dynamic Toll Pricing in India. *Transportation Research Procedia*. 2021; 52: 605-612.

13. Amorim M., Lobo A., Couto A. Tolling motorways in the time of economic downturn: the case of Portugal. *Transport*. 2019; 34; 2: 146-154.

14. Murata K., Kawakami T. Evaluation of a Road Pricing Method Based on Demand Distribution in Micro Traffic Simulation. 2021

IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops). 2021: 257-262.

15. Xu D., Guo X., Zhang G. Constrained optimization for bottleneck coarse tolling. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019; 128: 1-22.

16. He X., Jiang S., Zhong L., Sun Q. Optimization of Toll Plaza Based on Progressive Analysis. 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). 2018: 7961-7968.

17. Kim S. The toll plaza optimization problem: Design, operations, and strategies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2009;45; 1: 125-137.

18. Drivers are already using 700 thousand WHSD transponders. News [Internet]. Ofitsial'nyy internet-sayt operatora OOO «Magistral' severnoy stolitsy» = Official website of the operator LLC «Highway of the Northern Capital». Available from: <https://nch-spb.com/media/news/drivers-use-already-700-thousand-transponders-zsd/>. (cited 20.07.2021). (In Russ.)

19. 10 years ago, the first transponder in Russia was issued at the WHSD office; since then, more than half a billion transactions have been made on the highway. News [Internet]. Ofitsial'nyy internet-sayt operatora OOO «Magistral' severnoy stolitsy» = Official website of the operator LLC «Highway of the Northern Capital». Available from: <https://nch-spb.com/media/news/10-let-nazad-v-ofise-zsd-byly-vydan-pervyy-v-rossii-transponder-s-tekh-por-na-magistrali-sovershenno-b/>. (cited 20.07.2021). (In Russ.)

20. Traffic flow on the WHSD: results of the first half of 2021. News [Internet]. Ofitsial'nyy internet-sayt operatora OOO «Magistral' severnoy stolitsy» = Official website of the operator LLC «Highway of the Northern Capital». Available from: <https://nch-spb.com/media/news/transportnyy-potok-na-zsd-itogi-pervogo-polugodiya-2021/>. (cited 20.07.2021). (In Russ.)

21. Territories of growth: what kind of future is being built in St. Petersburg. Real Estate [Internet]. Ofitsial'nyy internet-sayt delovoy «Delovoy Peterburg» = Official website of the business «Business Petersburg». Available from: https://www.dp.ru/a/2021/05/24/Territorii_rosta_kakoe_b. (cited 20.07.2021). (In Russ.)

22. From place to barrier. News [Internet]. Ofitsial'nyy internet-sayt gazety «Kommersant» = Official website of the newspaper «Kommersant». Available from: <https://www.kommersant.ru/doc/4836866>. (cited 20.07.2021). (In Russ.)

23. Appendix No. 1 to Order No. 23 dated November 23, 2020 On approval of the Basic Tariffs for travel on the Western High-Speed Diameter road 1, the Basic Transponder tariffs for travel on the Western High-Speed Diameter road and the cost of Additional Services - Tariff options to the Basic tariff «Transponder» [Internet]. Ofitsial'nyy internet-sayt operatora OOO «Magistral' severnoy stolitsy» = Official website of the operator LLC «Highway of the Northern Capital». Available from: https://nch-spb.com/upload/iblock/341/Priozheniya_1_2-k-Prikazu_23-ot-23.11.2020.pdf. (cited 20.07.2021). (In Russ.)

24. Appendix No. 1 to Order No. 009/2021-T dated April 20, 2021 Tariffs for travel along the section from the Moscow Ring Road to Solnechnogorsk of the M-11 «Moscow - St. Petersburg» highway [Internet]. Ofitsial'nyy internet-sayt kompanii OOO «Severo-Zapadnaya kontsessionnaya kompaniya» = Official website of the North-West Concession Company LLC. Available from: <https://m11-neva.ru/viewfile.php?id=6511&ib=9>. (cited 20.07.2021). (In Russ.)

25. Appendix No. 2 to Order No. 009/2021-T dated April 20, 2021 Tariffs for travel along the section from MKAD to Solnechnogorsk of the M-11 «Moscow - St. Petersburg» highway [Internet]. Ofitsial'nyy internet-sayt kompanii OOO «Severo-Zapadnaya kontsessionnaya kompaniya» = Official website of the North-West Concession Company LLC. Available from: <https://m11-neva.ru/viewfile.php?id=6512&ib=9>. (cited 20.07.2021). (In Russ.)

Сведения об авторах

Александр Юрьевич Талавирия

Аспирант

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург

Эл. почта: a.talavirya@yandex.ru

Михаил Борисович Ласкин

К.ф.-м.н., доцент

Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук, Россия, Санкт-Петербург

Эл. почта: laskinmb@yahoo.com

Information about the authors

Alexander U. Talavirya

Postgraduate

St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great, St. Petersburg, Russia

E-mail: a.talavirya@yandex.ru

Mikhail B. Laskin

Cand. Sci. (Physics and Mathematics),

Associate Professor

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,

St. Petersburg, Russia

E-mail: laskinmb@yahoo.com