

УДК 656.01:338.47

Математическая модель и способ расчета пропускной способности

М. А. Марченко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Марченко М. А.* Математическая модель и способ расчета пропускной способности // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 28–37. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-28-37

Аннотация

Цель: Предложить методику расчета наличной пропускной способности на железнодорожной линии с полным учетом влияния разгонов и торможений поездов в пути их следования на результирующую наличную пропускную способность. **Методы:** Применен метод аналитического обзора, имитационного и динамического моделирования, математическое моделирование. **Результаты исследования:** Произведены аналитические преобразования общеизвестной формулы расчета пропускной способности. Получена аналитическая формула, позволяющая с более высокой точностью производить вычисления наличной пропускной способности. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть использованы в диспетчерских центрах управления перевозками ОАО «РЖД» для более полного анализа работы полигона дороги, железнодорожных линий или отдельных участков с целью развернутого анализа выполненной работы по перевозкам.

Ключевые слова: Железнодорожный полигон, пропускная способность, межпоездной интервал, непараллельный график движения, скорость движения.

Введение

Проблематика данной работы заключается в разработке методики расчета наличной пропускной способности, в основу которой заложены известные формулы расчета наличной пропускной способности, главным нововведением которых является учет времени, затрачиваемого поездами на разгон и замедление в пути следования. В настоящее время в процессе расчета наличной пропускной способности используется формальный подход к определению коэффициентов съема, а также принимается в расчет участковая скорость, рассчитываемая с учетом разгонов и замедлений, но представляющая собой лишь отношение длины определенного участка железнодорожного полигона ко времени следования по нему поезда. В работе предлагается комплексная методика определения участковой скорости с

дифференцированием расстояний проследуемых поездом участков по времени как при разгоне, так и при замедлении. Результаты предложенной методики позволяют с большей точностью определить пропускную способность железнодорожной линии, что, в свою очередь, позволяет оптимизировать эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и текущий ремонт железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

В работе представлена существующая формула расчета наличной пропускной способности, показана ее связь с участковой скоростью и представлен подробный ее расчет по предложенной методике. Результаты расчетов верифицированы имитационным моделированием в программном комплексе AnyLogic.

1. Анализ научной литературы рассматриваемой проблематики

В работе под названием «Особенности определения пропускной способности двухпутных участков» Ж. Я. Абдуллаевым была рассмотрена проблематика повышения точности и эффективности расчета пропускной способности на железнодорожных линиях. В его работе представлена подробная классификация используемых в настоящее время способов определения пропускной способности железнодорожных линий (аналитический, графоаналитический и метод имитационного моделирования). Автором приведены и подробно проанализированы аналитические формулы, используемые для вычисления значений наличной пропускной способности и рассмотрены ограничения (отсутствие пересечения на графике грузового и высокоскоростного поезда во встречном движении). В работе присутствует научная новизна в виде нового способа прокладки ниток графика, что позволяет обеспечить пропуск большего количества поездов и повысить наличную пропускную способность. Серьезным недостатком в работе является отсутствие имитационной модели, что не позволяет наглядно продемонстрировать движение поездов и верифицировать полученные результаты [1].

Кандидат физико-математических наук П. П. Бобрик в своей работе под названием «Интеллектуализация управления движением при транзите на транспорте» [2] рассматривал движение транспортных средств по специализированным ниткам графика и скорость возрастания заторов на основе методики применения систем массового обслуживания. Научной новизной в работе является понятие плотности потока. В отношении железнодорожного транспорта данное исследование применимо в рамках определения задержек поездов при обгонах и скрещенных, а также обеспечении минимального межпоездного интервала и влияния этих факторов

на результирующую пропускную способность по всему железнодорожному полигону. В работе выявлена скорость возрастания заторов, приводящая к снижению пропускной способности железнодорожной линии и полигона в целом. Автором предложена формула расчета увеличения среднего времени простоя, для снижения которого предложена идея проектирования резервных станций, расстояние между ними находится в связке с показателем плотности потока и обратно пропорционально ему. В ходе исследований были получены данные о неизбежном снижении резервных мощностей при исчерпании пропускной способности железнодорожного полигона. Данная статья может быть полезной для настоящей работы наличием формул, описывающих возрастание заторов на железнодорожном пути.

Следует также упомянуть о работе зарубежного автора. В своей статье под названием «Визуальное интерактивное моделирование и имитационное моделирование как поддержка принятия решений в логистических операциях железнодорожного транспорта» специалист в области железнодорожного высокоскоростного движения Влатко Черич [3] рассмотрел проблему определения пропускной способности железнодорожной линии с применением инструментов интерактивного моделирования существующего железнодорожного полигона в Боснии от Венгрии через Хорватию. В ходе выполнения исследований автором была построена имитационная модель, наглядно отражающая работу железнодорожного комплекса, направленную на бесперебойный пропуск поездов и обслуживание пассажиров. Модель позволяет произвести комплексную оценку этой работы и получить данные по количеству пропущенных пар поездов в течение заданного промежутка времени. Модель выполнена в программной среде ServiceModel, позволяющей помимо интерактивного производить построение модели в режиме планирова-

ния, что позволяет в случае реализации данной модели в подобном режиме производить прогнозирование размеров движения и на основе полученных данных осуществлять построение плана формирования поездов.

Работы по расчету пропускной способности железнодорожных магистралей представлены в работах [4–9], а также в иностранных литературных источниках [10–16].

В работах [17–19] изучаются особенности транспортно-логистической инфраструктуры, влияющие на пропускную способность железнодорожного транспорта в целом. В работах [20–23] проводится оценка клиентоориентированности логистических систем, построенных с учетом требований как отдельного клиента, так и рынка. В работах [24, 25] приводится технико-экономический инструментарий нормирования работы сложных систем доставки с проведением логистического аудита/независимой оценки пропускной способности элементов транспортно-логистических систем.

Влияние на пропускную способность железнодорожных линий во многом оказывают геополитические и экономические условия, о чем указывается в работах [26, 27], а также степень цифровизации основных бизнес-процессов на транспорте и в логистике [28, 29]. Кроме того, сама система применяемого ситуационного управления перевозочным процессом определяет загруженность железнодорожных линий и целых направлений [30–32], а также финансовая модель управления перевозками [33–35], что следует принимать во внимание при расчете пропускной способности.

2. Анализ существующих методов расчета пропускной способности

В настоящее время для определения наличной пропускной способности железнодорожных линий используется формула (1) [36], приведенная ниже.

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}})}{I_p} \cdot \alpha_n, \quad (1)$$

где $t_{\text{техн}}$ — бюджет времени на содержание и ремонт инфраструктуры;

I_p — расчетный межпоездной интервал;

α_n — коэффициент надежности работы инфраструктуры и подвижного состава, принимаем равным 0,96 [1].

Межпоездной интервал формулы (1) определяем по формуле (2) [1]:

$$I_p = \frac{0,5 \cdot L_{\text{п2}} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{\text{п1}}}{V_{\text{ср}} \cdot 16,7} + t_{\text{в}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{п1}}$, $L_{\text{п2}}$ — длина соответственно впереди и позади идущего поезда;

$L_{\text{бл1}}$, $L_{\text{бл2}}$ — длина соответственно первого и второго по счету блок-участков относительно впереди идущего поезда;

$V_{\text{ср}}$ — средняя скорость следования поездов по блок-участкам;

$t_{\text{в}}$ — время на восприятие изменения показания светофора, принимаем равным 0,05 мин.

При расчетах значение по формуле (2) получают, опираясь на данные о средней скорости следования поезда по участку, куда не входит время на разгон, замедление и стоянки, но при этом происходит его обобщение, в результате чего расчетный результат может отличаться от фактического. Предлагаемая методика позволяет учесть вышеперечисленные факторы и свести данное расхождение к минимуму, что позволит получить расчетный результат, наиболее приближенный к фактическому.

Следует упомянуть, что не будет верным решением использовать максимально разрешенную скорость в качестве ходовой, поскольку скорость поезда на участке зависит от различных факторов: от плана и профиля пути, устройств

СЦБ, характеристик верхнего строения пути и подвижного состава. По этой причине ходовая скорость представляет собой усредненную величину, а предлагаемая методика позволяет повысить точность ее определения. Расчеты по ней выполняются для категории поездов, время хода которых по рассматриваемой линии минимально, затем выполняем аналогичные расчеты с прочими категориями, через коэффициент съема производим расчет пропускной способности.

Уравнение движения поезда можно представить следующим образом в дифференциальном виде:

$$S_{\text{общ}} = \frac{dv}{dt} t_{\text{разг}} + v_{\text{пост}} \cdot t_{\text{пост}} + \frac{dv}{dt} t_{\text{зам}};$$

при $t_{\text{разг}} + t_{\text{пост}} + t_{\text{зам}} = t_{\text{общ}}$, (3)

где $\frac{dv}{dt}$ — показатель скорости изменения пере-

мещения поезда за промежуток времени;

$t_{\text{разг}}$ — время на увеличение скорости;

$v_{\text{пост}}$ — скорость следования поезда при отсутствии ее изменения;

$t_{\text{пост}}$ — время на перемещение поезда с постоянной скоростью;

$t_{\text{зам}}$ — время на снижение скорости.

Определим время на следование поезда без изменения скорости. Исходными данными служат общее расстояние пути следования и время на преодоление заданного расстояния и времени на разгон и замедление. Выполним расчет средней скорости поезда в пути следования (4):

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{общ}}}{t_{\text{общ}}}. \quad (4)$$

$$t_{\text{уск. ср}} = \frac{v_{\text{ср}}}{a}, \quad (5)$$

где a — ускорения поезда, $\text{м}/\text{с}^2$.

$$t_{\text{зам. ср}} = \frac{v_{\text{ср}}}{b}, \quad (6)$$

где b — замедление поезда, $\text{м}/\text{с}^2$.

Приравниваем значение средней скорости к максимальной при неизменных значениях времени разгона и замедления поезда:

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{общ}} - t_{\text{уск. ср}} - t_{\text{зам. ср}}. \quad (7)$$

Находим преодоленный путь в течение каждого отрезка времени по формулам (8) и (9):

$$S_{\text{уск. ср}} = \frac{a \cdot t_{\text{уск. ср}}^2}{2}. \quad (8)$$

$$S_{\text{зам. ср}} = \frac{b \cdot t_{\text{зам. ср}}^2}{2}. \quad (9)$$

Вычисляем расстояние, которое могло бы быть пройдено поездом в случае его движения со средней скоростью в качестве максимальной:

$$S_{\text{ср}} = v_{\text{ср}} \cdot t_{\text{ср}}. \quad (10)$$

Общая протяженность пути в таком случае может быть рассчитана по формуле (11):

$$S_{\text{расч}} = S_{\text{уск. ср}} + S_{\text{ср}} + S_{\text{зам. ср}}. \quad (11)$$

Находим коэффициент погрешности, представляющий собой отношение фактической максимальной скорости к средней. Определим его через коэффициент погрешности, приведенный в формуле (12):

$$K_{\text{погр}} = \left(1 - \frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{общ}}} \right). \quad (12)$$

Далее определяем долю, найденной по формуле (12), коэффициента погрешности во временах разгона и замедления поездов по формулам (13, 14):

$$K_{\text{разг}} = \frac{K_{\text{погр}} \cdot b}{(a + b)}. \quad (13)$$

$$K_{\text{зам}} = \frac{K_{\text{погр}} \cdot a}{2(a+b)}. \quad (14)$$

Производим вычисление доли погрешности в расстоянии следования при разгоне, неизменной скорости и замедлении по формулам (15–17):

$$K_{\text{расст. разг}} = \frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{общ}}} + K_{\text{разг}}. \quad (15)$$

$$K_{\text{расст. пост}} = \frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{общ}}} - K_{\text{погр}}. \quad (16)$$

$$K_{\text{расст. зам}} = \frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{общ}}} + K_{\text{зам}}. \quad (17)$$

где $K_{\text{расст. разг}}$, $K_{\text{расст. пост}}$, $K_{\text{расст. зам}}$ — коэффициент погрешности расстояния следования соответственно разгона, постоянной скорости и замедления.

После того как рассчитаны все коэффициенты погрешности, по формулам (18–20) рассчитываем пройденные расстояния во время разгона, с постоянной скоростью и торможения. Суммарное значение полученных результатов должно быть идентичным расстоянию маршрута следования поезда.

$$S_{\text{разг}} = S_{\text{общ}} \cdot K_{\text{расст. разг}}. \quad (18)$$

$$S_{\text{сп}} = S_{\text{общ}} \cdot K_{\text{расст. пост}}. \quad (19)$$

$$S_{\text{зам}} = S_{\text{общ}} \cdot K_{\text{расст. зам}}. \quad (20)$$

По формуле (21) производим расчет ходовой скорости поезда в пути следования:

$$V_x = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{\text{разг}}}{a}}. \quad (21)$$

Производим замену в формуле расчета межпоездного интервала средней скорости полученным значением V_x :

$$I_{\text{p max}} = \frac{0,5 \cdot L_{\text{п2}} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{\text{п1}}}{V_x \cdot 16,7} + t_{\text{в}}. \quad (22)$$

С помощью данной формулы возможно рассчитывать значение наличной пропускной способности на железнодорожном полигоне, на котором применяется непараллельный график движения поездов. Вычисление наличной пропускной способности на участках, на которых поезд движется с ускорением или замедлением, выполняется отдельно.

Для определения межпоездного интервала между поездами в момент разгона производим интегрирование расчетной формулы по переменной в качестве скорости с ее изменением от значения, приближенного к нулю до максимальной скорости, которую достигает поезд в пути следования.

$$\begin{aligned} I_{\text{p разг(зам)}} &= \\ &= \int_0^{v_{\text{max}}} \left(\frac{0,5 \cdot L_{\text{п2}} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{\text{п1}}}{V_x \cdot 16,7} + t_{\text{в}} \right) dv = \\ &= 69,9 \cdot t_{\text{в}} + 0,20 \cdot L_{\text{п2}} + 0,39 \cdot L_{\text{бл1}} + \\ &+ 0,39 \cdot L_{\text{бл1}} + 0,20 \cdot L_{\text{п2}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Расчет выполняется отдельно для разгона и замедления в соответствии с формулой (23).

Обобщенная формула имеет вид (24):

$$I_{\text{п}} = \frac{I_{\text{п разг}}}{t_{\text{разг}}} + \frac{I_{\text{п max}}}{t_{\text{пост}}} + \frac{I_{\text{п зам}}}{t_{\text{зам}}}. \quad (24)$$

Заключение

Представленная в работе методика расчета наличной пропускной способности, основанная на преобразовании существующих формул, повышает точность производимых вычислений. Она может найти наиболее широкое применение при расчете пропускной способности на железнодорожных линиях с непараллельным графиком движения поездов по причине наличия возмож-

ности в полном объеме учитывать при расчете времени на разгон и замедление следующих по железнодорожной линии поездов.

Библиографический список

1. Абдуллаев Ж. Я. Особенности определения пропускной способности двухпутных участков / Ж. Я. Абдуллаев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Вып. 3.
2. Бобрик П. П. Интеллектуализация управления движением при транзите на транспорте / П. П. Бобрик // Технологии построения когнитивных транспортных систем: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — СПб., 2021.
3. Čerić V. Visual interactive modeling and simulation as a decision support in railway transport logistic operations / V. Čerić // *Mathematics and Computers in Simulation*. — 1997. — Vol. 44. — Iss. 3. — Pp. 251–261.
4. Покровская О. Д. Логистические накопительно-распределительные центры как основа терминальной сети региона: монография / О. Д. Покровская. — Новосибирск, 2012. — 184 с.
5. Покровская О. Д. Логистическая классность железнодорожных станций / О. Д. Покровская // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. — 2018. — № 2(38). — С. 68–76.
6. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // *Бюллетень результатов научных исследований*. — 2022. — № 1. — С. 80–94.
7. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // *Мир транспорта*. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.
8. Бессолицын А. С. Пригородные и местные поезда / А. С. Бессолицын // *Актуальные проблемы управления перевозочным процессом: сборник научных трудов*. — 2013. — С. 3–22.
9. Котенко А. Г. Организация поездной работы на участках железной дороги учебного центра управления перевозками / А. Г. Котенко, А. П. Бадецкий, А. Б. Васильев. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — 41 с.
10. Altazin E. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems / E. Altazin, S. Dauzère-Pérès, F. Ramond et al. // *European Journal of Operational Research*. — 2020. — Vol. 286. — Iss. 2. — Pp. 662–672.
11. Kianinejadshah A. Comparative Application of Analytical and Simulation Methods for the Combined Railway Nodes-Lines Capacity Assessment / A. Kianinejadshah, S. Ricci // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Vol. 55. — Pp. 103–109.
12. Ljubaj I. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool / I. Ljubaj, M. Mikulčić, T. J. Mlinarić // *Transportation Research Procedia*. — 2020. — Vol. 44. — Pp. 137–144.
13. Zhang X. Integrating capacity analysis with high-speed railway timetabling: A minimum cycle time calculation model with flexible overtaking constraints and intelligent enumeration / X. Zhang, L. Nie // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2016. — Vol. 68. — Pp. 509–531.
14. Cheng C. H. A simulation study of tenability for passengers in a railway tunnel with arson fire / C. H. Cheng, C. L. Chow, W. K. Chow // *Tunnelling and Underground Space Technology*. — 2021. — Vol. 108.
15. Bulíčka J. Operational Reliability of a Periodic Railway Line / J. Bulíčka, P. Drdla, J. Matuška // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Vol. 53. — Pp. 106–113.
16. Högdahl J. A combined simulation-optimization approach for minimizing travel time and delays in railway timetables / J. Högdahl, M. Bohlin, O. Fröidh // *Transportation Research. Part B: Methodological*. — 2019. — Vol. 126. — Pp. 192–212.
17. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // *Инновационный транспорт*. — 2015. — № 1(15). — С. 13–23.
18. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // *Мир транспорта*. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.

19. Pokrovskaya O. Assessment of Transport and Storage Systems / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2020. — Vol. 1115. — Pp. 570–577.
20. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // *РЖД-Партнер*. — 2016.
21. Pokrovskaya O. Formation of logistics facilities in transport corridors / O. Pokrovskaya, S. Orekhov, N. Kapustina et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Ser. “VIII International Scientific Conference Transport of Siberia — 2020”. — 2020. — Vol. 8. — P. 012032.
22. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // *Бюллетень результатов научных исследований*. — 2022. — № 1. — С. 80–94.
23. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем / О. Д. Покровская // *Железнодорожный транспорт*. — 2019. — № 7. — С. 26–32.
24. Pokrovskaya O. Procedure and algorithmization of calculation of terminal network parameters / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko, E. Khramtsova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. — INTERAGROMASH 2019. — 2019. — P. 012198.
25. Покровская О. Д. Инструментарий логистического нормирования для проведения аудита транспортно-складских систем / О. Д. Покровская, Т. С. Титова // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 175–190.
26. Дроздова М. А. Международные санкции как средства регулирования мировой экономики / М. А. Дроздова // *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке: сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. — Федеральное агентство железнодорожного транспорта, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. — С. 113–116.
27. Дроздова М. А. Антиглобализм в контексте современного международного экономико-правового дискурса / М. А. Дроздова, Л. А. Кравченко // *Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева*. — 2020. — Т. 1. — № 3(96). — С. 247–253.
28. Дроздова М. А. Цифровая экономика и инфляция в период пандемии / М. А. Дроздова, Л. А. Кравченко, Д. А. Панков // *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке: сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. — ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. — С. 11–14.
29. Дроздова М. А. Цифровизация отрасли железнодорожных перевозок: проблемы и успехи / М. А. Дроздова, Е. А. Фурсова // *III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов*. — 2021. — С. 119–121.
30. Баритко А. Л. Организация и технология внешне-торговых перевозок / А. Л. Баритко, П. В. Куренков // *Железнодорожный транспорт*. — 1998. — № 8.
31. Быкадоров С. А. Анализ методов определения себестоимости грузовых перевозок / С. А. Быкадоров, П. В. Куренков, А. В. Серкова и др. // *Вестник транспорта*. — 2014. — № 3. — С. 30–41.
32. Сафронова А. А. Формирование системы финансового менеджмента: теория, опыт, проблемы, перспективы: коллективная монография / А. А. Сафронова, Е. Н. Рудакова, П. В. Куренков и др. — М., 2018. — 228 с.
33. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // *Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник*. — 2004. — № 11. — С. 14.
34. Мохонько В. П. Проблемы создания ситуационно-аналитической системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // *Бюллетень транспортной информации*. — 2004. — № 9. — С. 22.
35. Куренков П. В. Финансово-экономическое решение проблемы пригородных перевозок / П. В. Куренков, С. П. Вакуленко // *Экономика железных дорог*. — 2012. — № 12. — С. 96.
36. Инструкция по расчету наличной пропускной способности. — Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 16 ноября 2010 г. № 128. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — 305 с.

Дата поступления: 20.12.2022

Решение о публикации: 20.01.2023

Контактная информация:

МАРЧЕНКО Максим Александрович — аспирант кафедры;
maks.marchenko1998@mail.ru

Mathematical Model and Approach to Calculate Throughput

M. A. Marchenko

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Marchenko M. A. Mathematical Model and Approach to Calculate Throughput // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 28–37. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-28-37

Summary

Purpose: To propose methodology for calculating actual throughput on railway line with full consideration of racing and drag effect of trains along their way on resulting actual throughput. **Methods:** Methods of analytical review, simulation and dynamic modeling, mathematical modeling were applied. **Results:** Analytical transformations of well-known formula for calculating throughput were performed. Analytical formula has been obtained that allows calculating actual throughput with higher accuracy. **Practical significance:** The results of the study can be used in the dispatch centers of JSC “Russian Railways” transportation management for more complete analysis of the operation of the polygon of a road, railway lines or individual sections in order of more detailed analysis of work, performed on transportation.

Keywords: Railway polygon, throughput, inter-train interval, traffic non-parallel schedule, motion speed.

References

1. Abdullaev Zh. Ya. Osobennosti opredeleniya propusknoy sposobnosti dvukhputnykh uchastkov [Features of determining the capacity of double-track sections]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv. Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, vol. 3. (In Russian)

2. Bobrik P. P. *Intellektualizatsiya upravleniya dvizheniem pri tranzite na transporte. Tekhnologii postroeniya kognitivnykh transportnykh sistem: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Intelligentization of traffic control in transit on transport. Technologies for building cognitive transport systems: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. St. Petersburg, 2021. (In Russian)

3. Čerić V. Visual interactive modeling and simulation as a decision support in railway transport logistic operations. *Mathematics and Computers in Simulation*. 1997, vol. 44, Iss. 3, pp. 251–261.

4. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskie nakopitel'no-raspredelitel'nye tsentry kak osnova terminal'noy seti*

regiona: monografiya [Logistics storage and distribution centers as the basis of the terminal network of the region: monograph]. Novosibirsk, 2012, 184 p. (In Russian)

5. Pokrovskaya O. D. Logisticheskaya klassnost' zheleznodorozhnykh stantsiy [Logistic class of railway stations]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2018, Iss. 2(38), pp. 68–76. (In Russian)

6. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistic transport systems in Russia under new sanctions]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 80–94. (In Russian)

7. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob'ektov terminal'no-skladskoy infrastruktury [On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, Iss. 1(74), pp. 152–163. (In Russian)

8. Bessolitsyn A. S. *Prigorodnye i mestnye poezda. Aktual'nye problemy upravleniya perevozhnym protsessom: sbornik nauchnykh trudov* [Suburban and local trains. Actual

problems of transportation process management: a collection of scientific papers]. 2013, pp. 3–22. (In Russian)

9. Kotenko A. G., Badetskiy A. P., Vasil'ev A. B. *Organizatsiya poezdnoy raboty na uchastkakh zheleznoy dorogi uchebnogo tsentra upravleniya perevozkami* [Organization of train work on sections of the railway of the transportation management training center]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, 41 p. (In Russian)

10. Altazin E., Dauzère-Pérès S., Ramond F. et al. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems. *European Journal of Operational Research*. 2020, vol. 286, Iss. 2, pp. 662–672.

11. Kianinejadoshah A., Ricci S. Comparative Application of Analytical and Simulation Methods for the Combined Railway Nodes-Lines Capacity Assessment. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 55, pp. 103–109.

12. Ljubaj I., Mikulčić M., Mlinarić T. J. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool. *Transportation Research Procedia*. 2020, vol. 44, pp. 137–144.

13. Zhang X., Nie L. Integrating capacity analysis with high-speed railway timetabling: A minimum cycle time calculation model with flexible overtaking constraints and intelligent enumeration. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016, vol. 68, pp. 509–531.

14. Cheng C. H., Chow C. L., Chow W. K. A simulation study of tenability for passengers in a railway tunnel with arson fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 108.

15. Bulíček J., Drdla P., Matuška J. Operational Reliability of a Periodic Railway Line. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 53, pp. 106–113.

16. Högdahl J., Bohlin M., Fröidh O. A combined simulation-optimization approach for minimizing travel time and delays in railway timetables. *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2019, vol. 126, pp. 192–212.

17. Pokrovskaya O. D. Sostoyanie transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugol'nykh perevozk v Rossii [The state of transport and logistics infrastructure for coal transportation in Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2015, Iss. 1(15), pp. 13–23. (In Russian)

18. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob'ektov terminal'no-skladskoy infrastruktury [On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, Iss. 1(74), pp. 152–163. (In Russian)

19. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of Transport and Storage Systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 1115, pp. 570–577.

20. Pokrovskaya O. D. "Sbityy pritsel" klientoorientirovannosti ["Shot down sight" of customer orientation]. *RZhD-Partner* [RZD-Partner]. 2016. (In Russian)

21. Pokrovskaya O., Orekhov S., Kapustina N. et al. Formation of logistics facilities in transport corridors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. "VIII International Scientific Conference Transport of Siberia 2020"*. 2020, vol. 8, p. 012032.

22. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistic transport systems in Russia under new sanctions]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 80–94. (In Russian)

23. Pokrovskaya O. D. Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem [Comprehensive assessment of transport and storage systems]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2019, Iss. 7, pp. 26–32. (In Russian)

24. Pokrovskaya O., Fedorenko R., Khramtsova E. Procedure and algorithmization of calculation of terminal network parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. INTERAGROMASH 2019*. 2019, p. 012198.

25. Pokrovskaya O. D., Titova T. S. Instrumentariy logisticheskogo normirovaniya dlya provedeniya audita transportno-skladskikh sistem [Logistics rationing tools for auditing transport and storage systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 175–190. (In Russian)

26. Drozdova M. A. *Mezhdunarodnye sanktsii kak sredstva regulirovaniya mirovoy ekonomiki. Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke: sbornik trudov*

III Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii [International sanctions as a means of regulating the world economy. Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century: Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference]. Federal'noe agentstvo zheleznodorozhnogo transporta, FGBOU VO PGUPS [Federal Agency for Railway Transport, FGBOU VO PGUPS]. 2020, pp. 113–116. (In Russian)

27. Drozdova M. A., Kravchenko L. A. Antiglobalizm v kontekste sovremennogo mezhdunarodnogo ekonomiko-pravovogo diskursa [Antiglobalism in the context of modern international economic and legal discourse]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva* [Bulletin of the Volga University. V. N. Tatishcheva]. 2020, vol. 1, Iss. 3(96), pp. 247–253. (In Russian)

28. Drozdova M. A., Kravchenko L. A., Pankov D. A. *Tsifrovaya ekonomika i inflyatsiya v period pandemii. Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke: sbornik trudov III Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Digital economy and inflation during a pandemic. Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century: a collection of proceedings of the III National Scientific and practical conference]. FGBOU VO PGUPS Publ., 2020, pp. 11–14. (In Russian)

29. Drozdova M. A., Fursova E. A. *Tsifrovizatsiya otrasli zheleznodorozhnykh perezovok: problemy i uspekhi. III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [Digitalization of the railway transportation industry: problems and successes. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings]. 2021, pp. 119–121. (In Russian)

30. Baritko A. L., Kurenkov P. V. Organizatsiya i tekhnologiya vneshnetorgovykh perezovok [Organization and technology of foreign trade transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1998, Iss. 8. (In Russian)

31. Bykadorov S. A., Kurenkov P. V., Serkova A. V. et al. Analiz metodov opredeleniya sebestoimosti gruzovykh perezovok [Analysis of methods for determining the cost of freight transportation]. *Vestnik transporta* [Transport Bulletin]. 2014, Iss. 3, pp. 30–41. (In Russian)

32. Safronova A. A., Rudakova E. N., Kurenkov P. V. et al. *Formirovanie sistemy finansovogo menedzhmenta: teoriya, opyt, problemy, perspektivy: kollektivnaya monografiya* [Formation of the financial management system: theory, experience, problems, prospects: collective monograph]. Moscow, 2018, 228 p. (In Russian)

33. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Situatsionnoe upravlenie perevozochnym protsessom [Situational management of the transportation process]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management: scientific information collection]. 2004, Iss. 11, pp. 14. (In Russian)

34. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Problemy sozdaniya situatsionno-analiticheskoy sistemy upravleniya perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte [Problems of creating a situational-analytical system for managing the transportation process in railway transport]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information]. 2004, Iss. 9, p. 22. (In Russian)

35. Kurenkov P. V., Vakulenko S. P. Finansovoe ekonomicheskoe reshenie problemy prigorodnykh perezovok [Financial and economic solution to the problem of suburban transportation]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of Railways]. 2012, Iss. 12, p. 96. (In Russian)

36. *Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti. Utv. Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 16 noyabrya 2010 g. № 128* [Instructions for calculating the available throughput. Approved. Order of Russian Railways OJSC dated November 16, 2010 № 128]. Moscow: OAO "RZhD" Publ., 2011, 305 p. (In Russian)

Received: December 20, 2022

Accepted: January 20, 2023

Author's information:

Maxim A. MARCHENKO —
Postgraduate Student of the Department;
maks.marchenko1998@mail.ru