

УДК 625.723

Имитационная математическая модель функционирования участка дороги для промышленного транспорта

С. В. Кириллов

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

Для цитирования: Кириллов С. В. Имитационная математическая модель функционирования участка дороги для промышленного транспорта // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 93–102. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-93-102

Аннотация

Цель: прогнозирование режимов движения транспортных потоков по построенным участкам дорог для промышленного транспорта, чтобы осуществлять анализ процессов их функционирования, получать оценки выходных параметров различных предлагаемых вариантов технических решений и сравнивать их между собой. Но конечной целью проектирования является получение наилучшего технического решения из числа возможных альтернатив, которое обеспечило бы высокие показатели эффективности и качества создаваемого объекта. **Методы:** сравнение между собой предлагаемых вариантов технических решений и выбор наилучшего. **Результаты:** в статье представлена экспериментальная факторная модель. В ее основу положены зависимости оценки скорости движения машин в колонне от приоритетных факторов: ограничивающей ширины проезжей части, радиуса горизонтальной кривой малого радиуса и продольного уклона. **Практическая значимость:** результаты расчетов позволят разработать специальные номограммы для прогнозирования скорости движения потока по построенному участку.

Ключевые слова: рациональная ширина дорожного покрытия, дороги для промышленного транспорта, имитационная математическая модель, расчетные транспортные потоки, ограничивающая ширина проезжей части, радиус горизонтальной кривой малого радиуса, продольный уклон

Введение

Для дорог промышленного транспорта современные зарубежные исследования делают акцент на комплексном подходе: не просто моделировать поток машин, а встраивать его в экосистему промышленного предприятия, учитывая технологические процессы, приоритеты и риски, что дает более точные результаты. Это детализация потоков на уровне отдельных автомобилей или групп (PTV Vissim), интеграция с логистикой (AnyLogic), сценарии и оптимизация (внедрение динамического распределения потоков), а также учет неопределенности (TRANSIMS — система для транспортного анализа, разработанная Лос-Аламосской национальной лабораторией в США). Получение результатов исследования с применением таких моделей требует больших затрат на сбор данных для калибровки модели, проведения статистического анализа и сравнения выборок, мощных компьютеров и долгого времени расчета, адаптации под конкретную индустрию этой универсальной модели.

В современной системной литературе [1–3 и др.] отмечается также, что при проектировании элементов сложных технических систем наряду с обычными имитационными моделями исключительно эффективно применение экспериментальных факторных математических моделей.

Целями функционирования такой модели являются формирование множества возможных вариантов проектируемого объекта, оптимальный выбор на данном множестве рационального варианта и определение технических параметров его элементов, которые будут оптимальными. Выбор структуры и оптимизационного алгоритма требует выполнения множества итераций, количество которых может достигать, как и у современных зарубежных исследователей, чисел второго и третьего порядков при отработке только одного варианта исходных данных проектирования элементов сложной системы. Поэтому каждая проектная задача характеризуется большими затратами машинного времени и, как следствие, медленным внедрением методов функционального проектирования в практику дорожного дела. Вместе с тем без выполнения работ по функциональному проектированию невозможно обеспечить достаточный технико-эксплуатационный уровень дорог для промышленного транспорта и конкурентоспособность используемых конструкций строящихся участков этих дорог.

Построение экспериментальной факторной модели

При построении экспериментальной факторной модели объект моделирования (строящийся участок дороги для промышленного транспорта) представляется в виде черного ящика, на вход которого подаются совокупности переменных $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$, характеризующие технические параметры строящегося участка, $U(u_1, u_2, \dots, u_m)$, описывающие транспортный поток по нему, и $E(e_1, e_2, \dots, e_k)$ — факторы окружающей среды, а на выходе можно наблюдать и регистрировать переменные $Y(y_1, y_2, \dots, y_r)$. В процессе проведения эксперимента изменение переменных X , U и E приводит к изменению выходных переменных Y . В целях целенаправленной реализации модели необходимо регистрировать изменения всех ее параметров и осуществить их статистическую обработку для обоснования оптимальных значений параметров системы «строящийся участок — транспортный поток».

При проведении физического эксперимента переменными X можно управлять, изменяя их величину по заданному закону. Так, например, ширина покрытия на прямолинейных горизонтальных участках задается множеством $\{6,0; 6,25; 6,5; 6,75; 7,0; 7,25; 7,5; 7,75; 8,0; 8,25\}$. Точно так же по определенному закону в модели изменяются радиусы горизонтальных кривых, величины и протяженности продольных уклонов. Сложнее обстоит дело с моделированием неуправляемых переменных $U(u_1, u_2, \dots, u_m)$, которые в процессе функционирования дороги, как правило, принимают случайные значения. При этом значения переменных X и U

в процессе моделирования можно контролировать и регистрировать. Вместе с тем в процессе функционирования СУ-ТП на нее воздействуют неопределенные факторы окружающей среды E , которые нельзя заранее предсказывать и сложно контролировать.

Переменные X и U принято называть факторами [2]. Факторы X являются управляемыми и изменяются как детерминированные переменные, а факторы U — неуправляемые и изменяются во времени случайным образом.

Выходная переменная Y представляет собой вектор зависимых переменных моделируемого строящегося участка дороги для промышленного транспорта. Ее принято называть откликом, а зависимость Y от факторов X и U — функцией отклика [2].

Переменная E действует в процессе эксперимента бесконтрольно. Если предположить, что факторы X и U стабилизированы во времени и сохраняют постоянные значения, то под влиянием переменных E (дождь, снег, туман, гололед и др.) функция отклика Y может меняться как систематическим, так и случайным образом.

Объектами исследования в экспериментальной факторной модели функционирования строящегося участка дороги для промышленного транспорта являются разработанные теоретические модели прогнозирования движения транспортных потоков по построенным участкам дорог для промышленного транспорта (прямолинейным, горизонтальным, с горизонтальными кривыми малых радиусов, с продольными уклонами) [4].

Данные модели позволяют с достаточной степенью точности оценивать скорости движения транспортных потоков по элементам строящихся участков, пропускную способность этих участков и расход горючего расчетными автомобилями (КамАЗ-45143-50, КамАЗ-65115, КамАЗ-6520-43, КамАЗ-65201-6012-53) при движении по построенному участку.

Реализация данных теоретических моделей прогнозирования

Сложность реализации данных моделей заключается в том, что они в обязательном порядке предусматривают дифференцированный учет интенсивности движения транспортных потоков по направлениям движения. С этой целью представляется целесообразным для различных зон автомобильных дорог для промышленного транспорта установить расчетную интенсивность движения транспортных потоков в диапазоне $N = \{1000 \text{ авт./ч} — 10\,000 \text{ авт./ч}\}$ и для каждого значения расчетной интенсивности задать соотношения часовой интенсивности движения к промышленному объекту и обратно от $\{(1,0:0,0)$ до $2(0,5:0,5)\}$ 0. Результаты значений расчетной интенсивности движения по автомобильной дороге с их дифференцированием по направлениям движения представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Расчетные транспортные потоки по дорогам для промышленного транспорта

Средняя часовая интенсивность, авт./ч	Часовые интенсивности при соотношении движения к промышленному объекту и обратно, доли единиц											
	1,0:0,0		0,9:0,1		0,8:0,2		0,7:0,3		0,6:0,4		0,5:0,5	
	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно	к пром. объекту	обратно
100	100	0	90	10	80	20	70	30	60	40	50	50
200	200	0	180	20	160	40	140	60	120	80	100	100
300	300	0	270	30	240	60	210	90	180	120	150	150
400	400	0	360	40	320	80	280	120	240	160	200	200
500	500	0	450	50	400	100	350	150	300	200	250	250
600	600	0	540	60	480	120	420	180	360	240	300	300
700	700	0	630	70	560	140	490	210	420	280	350	350
800	800	0	720	80	640	160	560	240	480	320	400	400
900	900	0	810	90	720	180	630	270	540	360	450	450
1000	1000	0	900	100	800	200	700	300	600	400	500	500

Значительную сложность в ходе исследования составила оценка распределения передвигающихся по автомобильным дорогам для промышленного транспорта колонн по численному и марочному составу. Такая задача была решена моделированием процесса формирования транспортных потоков для промышленного транспорта на примере подъездов к песчаным карьерам в районе СНТ «Пульман» Ломоносовского района Ленинградской области. Обработывая результаты данной работы и принимая усредненные значения интенсивностей движения по этим подъездам, получаем распределение по численности в них машин промышленного транспорта и остальных.

Использование при моделировании данных табл. 1 позволяет охватить весь допустимый спектр параметров транспортных потоков по дорогам для промышленного транспорта и получить оптимальные значения технических характеристик строящихся участков дорог для промышленного транспорта с учетом вероятностных характеристик транспортных потоков на них.

В качестве расчетной машины для оценки расхода горючего при движении транспортного потока по строящимся участкам дорог для промышленного транспорта в данной модели принят автомобиль КамАЗ-65115. Он наиболее ярко и полно отражает сущность современного движения и является одним из самых распространенных автомобилей в парке строительного транспорта. Оценка расхода горючего была выполнена по эмпирической зависимости вида:

$$Q_i = 97,82 + 1,42G_n + 615,27\xi + 139,35\xi G_n - 3627v_a + 0,036v_a^2 \quad (1)$$

где G_n — загруженность автомобиля, т;
 ξ — полное дорожное сопротивление;
 v_a — скорость движения автомобиля, км/ч.

Чтобы решить проблему размерности, в целевую функцию включаем не абсолютные значения Q_i , а их нормированные значения, рассчитываемые по формуле:

$$Q_i^n = \frac{Q_i}{Q_i^{\text{пр}}}, \quad (2)$$

где $Q_i^{\text{пр}}$ — предельное (директивное) или нормативное значение критерия.

Анализ показал, что в качестве нормативного значения критерия представляется целесообразным принять расход горючего автомобилем при скорости 30 км/ч, полной загрузке автомобиля и сопротивлении качению $\xi = 0,02$.

Рассматриваемый в качестве одного из важнейших критериев срок восстановления в рамках эксплуатационного содержания участка дороги для промышленного транспорта зависит от множества различных по характеру факторов (объемов работ, сил и средств дорожных подразделений, метода организации работ и способа их развертывания, погодно-климатических условий и др.) Учесть все факторы при оценке сроков восстановления в ходе реализации имитационной модели функционирования восстановленного участка — задача достаточно объемная и труднорешаемая. В связи с этим было принято решение вводить в модель только значения объемов работ по устройству дорожного покрытия, которые достаточно объективно в относительных показателях отражают сроки выполнения работ по строительству участка. В качестве нормировочного показателя приняты объемы строительства покрытия на участке с шириной проезжей части, равной 7,0 м.

Результаты объемов работ по устройству дорожного покрытия из каменных материалов (щебень, гравий, песчано-гравийная смесь и др.) на участке протяженностью 1,0 км приведены в табл. 2.

Расчет пропускной способности строящегося участка выполнялся по методике, сформулированной на основе ранее выполненных исследований [5]. В качестве нормировочного показателя принята пропускная способность полосы движения дороги, равная 300 авт./ч. Срок службы дорожных конструкций на участках дорог для промышленного транспорта рассчитывается по известной методике, приведенной в работе [6]. Нормирование показателей срока службы выполнено относительно срока, равного 30 суткам.

Укрупненная блок-схема алгоритма имитационной модели функционирования построенного участка представлена на рисунке.

ТАБЛИЦА 2. Объемы работ по устройству дорожного покрытия из каменных материалов

Ширина покрытия, м	6,0	6,25	6,5	6,75	7,0	7,25	7,5	7,75	8,0	8,25
Толщина покрытия, м	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21
Объем каменного материала, м ³	936	1056	1183	1316	1456	1602	1755	1914	2080	2252
Отношение $Q_i/Q_{7,00}$	0,643	0,725	0,812	0,904	1,0	1,1	1,205	1,314	1,428	1,547



Рисунок. Оптимизационная комплексная модель обоснования рациональных параметров строящихся участков

Наибольшую сложность при разработке модели вызвал расчет скоростей движения транспортных потоков по участкам с различной шириной проезжей части. Данные, характеризующие скорости движения потока по покрытиям различной ширины, приведены в табл. 3. Они получены с использованием компьютера для прямолинейного горизонтального участка с гравийным покрытием.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчетов скоростей движения потоков по дорогам для промышленного транспорта

Ширина проезжей части и скорость потока	v_a , км/ч	Интенсивность встречного движения, авт./ч							
		50	100	150	200	250	300	350	400
$b = 6,0$ м $v_{пт} = 6,32$ км/ч	10	17,4	14,8	12,2	10,4	7,0	4,4	1,8	
	20	25,5	20,1	16,5	12,0	7,5	3,0		
	40	33,3	26,6	19,9	13,2	6,5			
	50	41,0	32,1	23,2	14,3	5,3			
$b = 6,25$ м $v_{пт} = 10,56$ км/ч	10	18,5	16,9	15,4	13,8	12,3	10,7	9,2	7,6
	20	26,7	23,4	20,1	16,7	13,4	10,1	6,8	3,5
	40	34,6	29,3	23,9	18,5	13,2	7,8	2,4	
	50	42,5	35,1	27,6	20,2	12,7	5,2		
$b = 6,5$ м $v_{пт} = 15,65$ км/ч	10	19,4	18,8	18,2	17,6	16,9	16,3	15,7	15,1
	20	27,8	25,7	23,5	21,3	19,1	17,0	14,8	12,6
	40	36,0	31,9	27,9	23,9	20,2	15,8	11,8	7,7
	50	44,0	37,9	31,9	25,9	19,9	13,8	7,8	1,8
$b = 6,75$ м $v_{пт} = 21,53$ км/ч	10								
	20	29,0	27,7	26,6	25,4	24,3	23,2	22,0	20,9
	40	37,2	34,5	31,7	28,9	26,2	23,4	20,6	17,9
	50	45,4	40,8	36,2	31,7	27,0	22,5	17,9	13,3
$b = 7,0$ м $v_{пт} = 28,17$ км/ч	10								
	20	29,8	29,6	29,3	29,1	28,9	28,7	28,5	28,3
	40	38,4	36,8	35,2	33,6	32,0	30,4	28,8	27,2
	50	46,8	43,6	40,3	37,1	33,9	30,7	27,5	24,2
$b = 7,25$ м $v_{пт} = 35,52$ км/ч	10								
	20								
	40	39,5	38,9	38,4	37,8	37,3	36,7	36,2	35,6
	50	48,0	46,1	44,1	42,2	40,2	38,3	36,3	34,4
$b = 7,5$ м $v_{пт} = 43,56$ км/ч	10								
	20								
	40								
	50	49,2	48,4	47,6	46,8	46,0	45,2	44,4	43,6

Заключение

Для прогнозирования режимов движения транспортных потоков по строящимся участкам дорог для промышленного транспорта разработаны модели движения транспортных потоков по горизонтальным прямолинейным строящимся участкам, а также участкам с горизонтальными кривыми и продольными уклонами. В основу моделей положены зависимости оценки скорости движения машин в колонне от приоритетных факторов: ограничивающей ширины проезжей части, горизонтальной кривой малого радиуса и продольного уклона. Результаты расчетов позволят разработать специальные номограммы для прогнозирования скорости движения потока по восстанавливаемому участку.

Список источников

1. Абчук В. А. Экономико-математические методы: Элементарная математика и логика. Методы исследования операций. СПб.: Союз, 1999. 320 с.
2. Экономико-математические методы и прикладные модели / под ред. В. В. Федосеева. М.: ЮНИТИ, 1999.
3. Мицель А. А. Математическое и имитационное моделирование экономических процессов. Томск: Изд-во ТУСУР, 2019. 193 с.
4. Экономико-математические методы и модели / под ред. А. В. Кузнецова. Минск: БГЭУ, 2000.
5. Кириллов С. В., Романов Н. Н. Совершенствование методологии обоснования геометрических характеристик восстанавливаемых участков автомобильных дорог // Техно-технологические проблемы сервиса. 2019. № 4 (50). С. 16–19.
6. Кириллов С. В., Романов Н. Н. Сущность и содержание понятия пропускной способности автомобильных и военно-автомобильных дорог // ВАТТ: межвузовский сборник научных трудов, труды кафедры. Вып. 1. СПб., 2000.
7. СП 37.13330.2012. Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91*. М.: Минрегион России, 2013.
8. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85. М.: Минрегион России, 2013.
9. Технология и организация строительства дорог промышленного транспорта: методические указания к выполнению практических заданий и курсового проекта / сост. А. А. Логвиненко. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 45 с.
10. Строительство автомобильных дорог промышленного транспорта: методические указания к выполнению лабораторных работ / сост. А. А. Логвиненко. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 48 с.

Дата поступления: 25.06.2026

Решение о публикации: 08.08.2026

Контактная информация:

КИРИЛЛОВ Сергей Васильевич — кандидат техн. наук, доцент; Kirillov@pgups.ru

A Simulation Mathematical Model of the Operation of a Road Section for Industrial Transport

S. V. Kirillov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kirillov S. V. A Simulation Mathematical Model of the Operation of a Road Section for Industrial Transport // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 93–102. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-93-102 (In Russian)

Abstract

Objective: to forecast traffic flow patterns along constructed road sections for industrial transport in order to analyze their operation processes, obtain estimates of the output parameters of various proposed technical solutions, and compare them. The ultimate goal of designing roads for industrial transport is to select the best technical solution from among possible alternatives, ensuring high efficiency and quality of the constructed facility. **Methods:** the study utilizes a comparative analysis framework and parametric modeling to evaluate and select the optimal engineering solution from a set of alternatives. **Results:** the article presents an experimental factor model. It is based on the dependence of vehicle convoy speed estimates on priority factors: the limiting width of the roadway, the radius of the small-radius horizontal curve, and the longitudinal slope. **Practical significance:** the calculation results allowed the development of specialized nomograms for predicting the flow speed along the constructed section.

Keywords: rational pavement width, roads for industrial transport, simulation mathematical model, calculated traffic flows, limiting width of the roadway, the radius of the small-radius horizontal curve, longitudinal slope

References

1. Abchuk V. A. Ekonomiko-matematicheskie metody: Elementarnaya matematika i logika. Metody issledovaniya operatsiy [Economic and Mathematical Methods: Elementary Mathematics and Logic. Operations Research Methods], St. Petersburg, Soyuz, 1999, 320 p. (In Russian)
2. Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli [Economic and Mathematical Methods and Applied Models], ed. by V. V. Fedoseev, Moscow, YUNITI, 1999. (In Russian)
3. Mitsel' A. A. Matematicheskoe i imitatsionnoe modelirovanie ekonomicheskikh protsessov [Mathematical and Simulation Modeling of Economic Processes], Tomsk, TUSUR, 2019, 193 p. (In Russian)
4. Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli [Economic and Mathematical Methods and Models], ed. by A. V. Kuznetsov, Minsk, BSEU [Belarusian State University of Economics], 2000. (In Russian)
5. Kirillov S. V., Romanov N. N. Sovershenstvovanie metodologii obosnovaniya geometricheskikh kharakteristik vosstanavlivaemykh uchastkov avtomobilnykh dorog [Improving the Methodology for Justifying the Geometric Characteristics of Restored Sections of Highways], *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa [Technical and Technological Problems of Service]*, 2019, no. 4 (50), pp. 16–19. (In Russian)

6. Kirillov S. V., Romanov N. N. Sushchnost' i sodержanie ponyatiya propusknoj sposobnosti avtomobil'nyh i voenno-avtomobil'nyh dorog [The Essence and Content of the Concept of Traffic Capacity of Highways and Military Roads], *VATT: mezhvuzovskij sbornik nauchnykh trudov, trudy kafedry* [VATT: Interuniversity Collection of Scientific Papers, Department Proceedings], iss. 1, St. Petersburg, 2000. (In Russian)
7. SP 37.13330.2012. Promyshlennyj transport. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.07-91* [Construction Regulations 37.13330.2012. Industrial transport. Updated version of SNiP 2.05.07-91*], Moscow, Minregion Rossii [Ministry of Regional Development of the Russian Federation], 2013. (In Russian)
8. SP 78.13330.2012. Avtomobil'nye dorogi. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 3.06.03-85 [SP 78.13330.2012. Highways. Updated version of SNiP 3.06.03-85]. Moscow, Minregion Rossii [Ministry of Regional Development of the Russian Federation], 2013. (In Russian)
9. Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva dorog promyshlennogo transporta: metod. ukaz. k vypolneniyu prakticheskikh zadaniy i kursovogo proekta / sost. A. A. Logvinenko [Technology and Organization of Industrial Transport Road Construction: Guidelines for Practical Assignments and Course Projects, compiled by A.A. Logvinenko], Belgorod, BSTU [Bryansk State Technical University], 2014, 45 p. (In Russian)
10. Stroitel'stvo avtomobil'nykh dorog promyshlennogo transporta: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot, sost. A. A. Logvinenko [Construction of Industrial Transport Highways: Guidelines for Laboratory Work, compiled by A.A. Logvinenko], Belgorod, BSTU [Bryansk State Technical University], 2014, 48 p. (In Russian)

Received: June 25, 2026

Accepted: August 08, 2026

Author's information:

Sergey V. KIRILLOV — PhD in Engineering, Associate Professor; Kirillov@pgups.ru