

УДК/UDC 625.032.6

DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-5-15>

EDN: VRYHQN

Научная статья/Original article

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА НА ЗАЩИТНЫЙ ТОННЕЛЬ ОБОЛОЧЕЧНОГО ТИПА

А. А. Воробьев¹, А. В. Терентьев², О. Д. Покровская²✉,
А. А. Степанов², А. В. Курбатова²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 9

²Государственный университет управления,
Россия, 109542, г. Москва, пр. Рязанский, 99

✉ insight1986@inbox.ru

Исследован режим нагружения мембранной оболочки наземного тоннеля под аэродинамическим воздействием высокоскоростного поезда. Численно решена сопряжённая задача аэродинамики и механики деформируемого твёрдого тела на основе осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса и метода конечных элементов.

Установлено, что определяющими параметрами нагружения является длина тоннеля и относительный воздушный зазор, контролирующий интенсивность поршневого эффекта. Максимальное воздействие создаёт знакопеременный импульс в области головного обтекателя; хвостовая зона характеризуется развитой турбулентностью и струйно-отрывными течениями. Сравнительный анализ гладкой и гофрированной оболочек, а также усиленного каркаса выявил конструктивное решение, сочетающее аэродинамическую эффективность и устойчивость к боковым нагрузкам. Ресурс при циклическом нагружении оценён по модели накопления повреждений Палмгрена—Майнера и кривым усталости.

Научная новизна заключается в единой вычислительной методологии, объединяющей аэродинамическое моделирование, прочностной анализ и усталостные оценки применительно к наземным тоннелям оболочечного типа. Результаты предназначены для оптимизации геометрических параметров и повышения долговечности защитных сооружений.

Ключевые слова: конструкция тоннеля, деформация, взаимодействие поезд—тоннель, аэродинамические нагрузки, поршневой эффект, метод Frozen Rotor

Для цитирования: Воробьев А. А., Терентьев А. В., Покровская О. Д., Степанов А. А., Курбатова А. В. Моделирование аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда на защитный тоннель оболочечного типа. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 5—15. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-5-15>. EDN: VRYHQN.



© Воробьев А. А., Терентьев А. В., Покровская О. Д.,
Степанов А. А., Курбатова А. В., 2026.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

SIMULATION OF AERODYNAMIC IMPACT OF A HIGH-SPEED TRAIN ON A SHELL-TYPE PROTECTIVE TUNNEL

A. A. Vorobyov¹, A. V. Terentyev², O. D. Pokrovskaya²✉,
A. A. Stepanov², A. V. Kurbatova²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Moskovsky Ave., 9, Saint Petersburg, 190031, Russia

²State University of Management,
Ryazansky Ave., 99, Moscow, 109542, Russia

✉ insight1986@inbox.ru

The article presents the research of the loading regime of a membrane shell of an above-ground tunnel under the aerodynamic impact of a high-speed train. The authors solve the coupled problem of aerodynamics and deformable solid mechanics numerically by the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the finite element method.

Moreover, it is established that the governing loading parameters are the tunnel length and the relative air gap, which controls the intensity of the piston effect. The maximum impact is produced by an alternating-sign pressure pulse in the region of the head nose cone; the tail zone is characterised by the developed turbulence and jet-separation flows. By the comparative analysis of smooth and corrugated shells, as well as a reinforced frame, the authors identify a structural solution combining aerodynamic efficiency and resistance to lateral loads. The service life under cyclic loading is assessed using the Palmgren-Miner damage accumulation rule and fatigue curves.

The scientific novelty consists in a unified computational methodology integrating aerodynamic modeling, stress-strain analysis and fatigue assessment as applied to above-ground shell-type tunnels. The results are intended for optimizing geometric parameters and improving the durability of protective structures.

Keywords: tunnel construction, deformation, train and tunnel interaction, aerodynamic loads, piston effect, Frozen Rotor method

For citation: Vorobyov A. A., Terentyev A. V., Pokrovskaya O. D., Stepanov A. A., Kurbatova A. V. Simulation of aerodynamic impact of a high-speed train on a shell-type protective tunnel. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):5–15. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-5-15>. EDN: VRYHQN. (In Russ.).



© Vorobyov A. A., Terentyev A. V., Pokrovskaya O. D.,
Stepanov A. A., Kurbatova A. V., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Развитие железнодорожного транспорта требует создания высокоширотных транспортных коммуникаций значительной протяжённости с оптимизированным энергопотреблением. Такой подход обеспечивает экономическую эффективность и экологическую безопасность эксплуатации в сложных климатических условиях Арктической зоны и регионов Крайнего Севера.

Эффективным средством преодоления сложного рельефа местности, является устройство тоннельных сооружений, позволяющих значительно сокращать протяженность трасс, обеспечивать безопасность и бесперебойность движения транспорта в любых климатических условиях с обеспечением необходимого скоростного режима.

Сооружение тоннельных конструкций может оказаться столь же эффективным и для путей, расположенных на открытой местности. Особенно это актуально для высокоширотных железнодорожных магистралей, где проблема снегоборьбы является крайне энергозатратной. Легкая защитная конструкция оболочечного типа позволяет обеспечить условия микроклимата во внутреннем пространстве сооружения, устранив воздействие ускорен-

но движущихся приземных воздушных масс, образования снежных отложений на поверхностях верхнего строения пути и элементов ходовой части подвижного состава, а также связанных с этим последствий.

Эксплуатация подобных сооружений имеет определенную специфику, связанную с особенностями аэродинамического взаимодействия движущегося состава и мембраной оболочки тоннеля. В зазоре, образованном корпусом поезда и мембраной, происходит ускоренное вытеснение объемов воздушных масс поступательно движущимся корпусом поезда, что вызывает формирование волн сжатия и разряжения текучей среды, вызывающее колебание давления воздушной среды и, соответственно, динамики нагружения мембраны.

Характер распределения волн зависит от сочетания ряда факторов: скорости движения подвижного состава, длины тоннеля и значения коэффициента блокирования (отношение площадей поперечного сечения тоннеля и поезда). Оптимальное сочетание этих факторов напрямую определяет энергоэффективность эксплуатации подвижного состава. Задача осложняется дополнительными ограничениями по критерию несущей способности материала мем-

браны: наличие движущегося знакопеременного импульса давления воздушной среды, приложенного к внутренней поверхности мембраны, может спровоцировать образование усталостных разрушений конструкции.

Безусловно применение надземных тоннелей оболочечного типа на начальном этапе предполагает значительные капитальные затраты на возведение конструкций, вместе с тем перспективы снижения затрат на эксплуатацию инфраструктуры и подвижного состава, а также возможности для интеграции дополнительных технологий (солнечной генерации для энергообеспечения, защиты прилегающих экосистем) делают эту технологию перспективной.

Целью исследования является комплексный анализ влияния аэродинамических возмущений, возникающих при движении подвижного состава в зазоре между его корпусом и мембраной лёгкого тоннельного сооружения, на напряжённо-деформированное состояние защитной оболочки наземного тоннеля.

Научная новизна заключается в:

- установлении количественных зависимостей между параметрами движения поезда, характеристиками воздушного потока и уровнями напряжений в мембране;

- разработке расчётной модели взаимодействия системы «подвижной состав — воздушный зазор — мембрана»;

- формировании критериев проектирования лёгких тоннельных конструкций с учётом аэродинамических нагрузок.

Теоретическая значимость разработки определяется ее вкладом в развитие междисциплинарных исследований на стыке аэродинамики, механики деформируемого тела и транспортного строительства. Новизна подхода состоит в:

- комплексном анализе нестационарного взаимодействия подвижного состава и защитной оболочки тоннеля через возмущённый воздушный поток;

- создании расчётной модели, учитывающей взаимное влияние скорости движения, геометрии зазора и жёсткости мембраны;

- выявлении критических параметров системы, приводящих к опасным напряжениям и деформациям;

- формировании теоретической базы для проектирования энергоэффективных и устойчивых лёгких тоннельных конструкций.

Основные допущения, принимаемые при численных исследованиях аэроупругого взаимодействия движущегося подвижного состава и искусственных сооружений

Для получения полей скоростей и давлений уравнения Навье—Стокса и неразрывности решаются численно. С целью снижения вычислительных затрат приняты следующие допущения.

1. Воздух считается несжимаемой средой, поскольку скорость движения состава ниже порога 0,3 скорости звука (около 367 км/ч).

2. Деформации обтекаемых поверхностей не учитываются — принята гипотеза абсолютной жёсткости стенок тоннеля и корпуса поезда.

3. Твёрдые стенки полагаются гладкими, непроницаемыми и с условием прилипания; на открытых границах задаётся свободное течение (отсутствие тангенциальных напряжений).

4. Воздух рассматривается как ньютоновская жидкость с постоянной температурой 20 °С и динамической вязкостью $18,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Конвективный теплообмен и гравитационные эффекты не учитываются.

Совокупность этих допущений формирует основу численной модели аэродинамического нагружения.

Научной основой для совершенствования норм проектирования и эксплуатации лёгких наземных тоннелей сооружений может стать комплексный подход к изучению процесса взаимодействия подвижного состава и конструкции сооружения.

Теоретическую базу исследования влияния возмущённого состояния воздушных масс в зазоре «корпус подвижного состава — мембрана лёгкого тоннельного сооружения» на напряжённо-деформированное состояние мембраны составляет аэродинамика нестационарных течений вязкого газа в ограниченных пространствах, а именно закономерности формирования аэродинамических нагрузок при движении тела; модели турбулентных пульсаций и вихреобразования в стеснённых условиях (в ограниченном канале); методы расчёта пограничного слоя вблизи твёрдых поверхностей.

В системе «подвижной состав — воздушный зазор — мембрана» рассматриваются следующие физические процессы и их взаимосвязи:

- инициирующий аэродинамический процесс: движение поезда создаёт возмущение воздушного потока в зазоре, где возникают вихревые структуры и турбулентные пульсации. В результате чего формируются области повышенного и пониженного давления;

- механический отклик конструкции тоннеля заключается в совершении конструкцией вынужденных колебаний под действием давления воздушной среды, воздействующей на поверхность мембраны, которые могут приводить к усталостным повреждениям мембраны.

1. Механика жидкости и газа.

Уравнение Навье—Стокса для вязкого сжимаемого газа:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = \mu \Delta \vec{V} - \nabla P + \vec{f},$$

где ρ — плотность воздуха; $\vec{V}$ — вектор скорости; P — давление; μ — динамическая вязкость; $\vec{f}$ — вектор массовых сил.

Уравнение Рейнольдса для турбулентных течений:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v_i' v_j'} \right),$$

где $\bar{V}_i$ — осредненная компонента скорости; $\bar{P}$ — осредненное давление; v_i' , v_j' — пульсационные составляющие скорости.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0.$$

Для несжимаемой жидкости при $\rho = \text{const}$ уравнение сводится к условию:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0.$$

2. Механика деформируемого твердого тела.

К механике деформируемого твердого тела относятся: теория упругости и пластичности, расчет тонкостенных конструкций и оболочек, а также модели накопления повреждений и усталостного разрушения.

Линейная упругость для изотропного тела описывается законом Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij},$$

где λ и G — упругие постоянные Ламе; ε_{ij} — тензор малых деформаций; δ_{ij} — символ Кронекера.

Пластичность может быть описана условием текучести Мизеса:

$$f(\sigma_{ij}) = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} - \sigma_Y \leq 0, \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}.$$

Ассоциированный закон течения записывается в виде:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}.$$

Полная деформация раскладывается на упругую и пластическую части:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p.$$

Основы расчета тонкостенных конструкций и оболочек включают уравнения равновесия безмоментной мембранной оболочки вращения при осесимметричном нагружении:

$$\frac{N_\varphi}{R_1} + \frac{N_\theta}{R_2} = p_n, \quad \frac{d(N_\varphi r)}{ds} - N_\theta \cos \varphi = 0,$$

где N_φ , N_θ — погонные меридиональное и окружное усилия; R_1 , R_2 — главные радиусы кривизны; p_n — нормальное давление; r — радиус параллельного круга. Для протяженных цилиндрических оболочек учитываются также изгибные моменты и перерезывающие силы. Это приводит к моментной теории, включающей оператор $\nabla^4 w$ для прогиба w .

Критерии прочности и устойчивости мембран при динамическом нагружении

Условие прочности задает требованием, чтобы максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу не превышало допускаемого значения:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma].$$

Условие устойчивости цилиндрической оболочки при внешнем давлении может быть записано через критическое напряжение и критическое давление:

$$\sigma_{cr} = \frac{Eh}{R\sqrt{3(1-\nu^2)}}, \quad p_{cr} = \frac{\sigma_{cr} h}{R},$$

где E — модуль упругости; h — толщина; R — радиус; ν — коэффициент Пуассона. При динамическом воздействии дополнительно учитывается коэффициент динамичности.

Кривая усталости Велера имеет вид:

$$N = N_0 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_0} \right)^{-m} \quad \text{или} \quad \sigma_a^m N = \text{const},$$

где σ_a — амплитуда напряжений; N — число циклов до разрушения; m и N_0 — константы материала.

Линейное правило накопления повреждений Палмгрена — Майнера:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1,$$

где n_i — число циклов с амплитудой $\sigma_{a,i}$; N_i — соответствующее разрушающее число циклов. При $D = 1$ прогнозируется усталостное разрушение.

Для малоциклового усталости применяется соотношение Коффина — Мэнсона:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c.$$

Для решения задачи применяется метод конечных элементов для расчёта напряжённо-деформированного состояния конструкций, вариационные принципы механики деформируемого тела и теория предельного состояния (критерий Мизеса и др.).

Процесс взаимодействия газа и конструкции Fluid-Structure Interaction (FSI) представлен моделями сопряжённого расчёта аэродинамических и механических процессов. Модели реализуют алгоритмы передачи нагрузок между расчётными доменами с учётом обратной связи: деформация мембраны изменяет геометрию зазора, — это влияет на характеристики воздушного потока, — формируется замкнутая система взаимодействий.

Оценка возможности резонансных явлений при вынужденных колебаниях мембраны под действием периодических аэродинамических сил осуществляется после расчёта собственных частот и форм колебаний конструкции с помощью механической модели. Для описания процессов используется следующий математический аппарат: в аэродинамическом домене — методы моделирования крупных вихрей (LES); в механическом домене — уравнения равновесия теории упругости с учётом динамических членов; на границе раздела — условия непрерывности скоростей и равенства сил.

Адекватное описание нестационарного аэродинамического воздействия на мембрану и соответствующий расчёт ее динамического напряжённо-деформированного состояния с учетом нелинейных эффектов (геометрическая и физическая нелинейность) осуществляются моделированием нестационарных процессов в программных комплексах (SolidWorks, COMSOL) с передачей данных между аэродинамическим и структурным решателями.

Актуальным остаётся изучение динамики воздушной среды в тоннелях оболочечного типа, влияющей на нагрузки и деформации. Эти особенности должны учитываться в конструктивных решениях [1–11]. Анализ литературы [1, 2, 6–11] и [3, 5] выявил дефицит исследований влияния нагрузок на такие конструкции [9–11].

В работе [1] численно смоделированы аэродинамические процессы в тоннелях метрополитена с учётом «поршневого» эффекта. Выявлен сложный режим течения воздуха с локальными фронтами сжатия и разрежения, особенно в конфузторных зо-

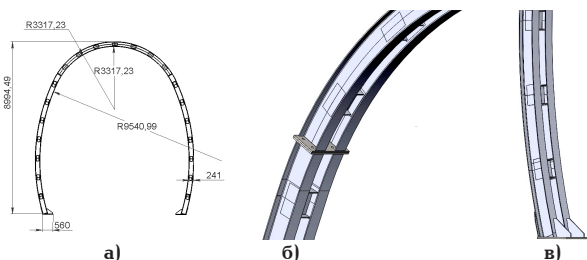


Рис. 1. Устройство опорных элементов оболочки тоннеля:
а — общий вид; б — средняя часть опоры;
в — нижняя часть опоры

Fig. 1. Arrangement of supporting elements of the tunnel shell:
а — general view; б — middle part of the support;
в — lower part of the support

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

нах порталов. Гибридная CFD-модель (SolidWorks Flow Simulation) с натурными данными показала, что поршневой эффект значительно меняет структуру воздухообмена.

В работе [10] численно исследованы поля скоростей у порталной зоны. Установлена турбулентная структура воздушных масс в зазоре между поездом и обделкой при входе и выходе состава, вызывающая повышенное сопротивление, и определены закономерности колебаний давления у головного обтекателя.

Для тоннельного сооружения оболочечного типа важны особенности эксплуатации при импульсных нагрузках от вытесняемого воздуха. Увлекаемая поездом масса, встречая изменения проходного сечения, вызывает знакопеременный импульс: повышенное давление перед обтекателем и разрежение за ним [1–4].

Таким образом, расчетная схема типовой секции тоннеля представляет собой несущий каркас опоры и фрагмент мембраны. Конструкция испытывает комбинированное нагружение:

- с внешней стороны на оболочку действует статическая составляющая (ветровое давление, снеговая нагрузка, перепады температуры);
- изнутри — динамическая нагрузка, порождаемая движущимся знакопеременным импульсом давления, формирующимся при прохождении поезда (область повышенного давления перед головной частью и зона разрежения за пределами головной части).

Конструктивное устройство защитного тоннеля представлено на рис. 1. Тонкостенная оболочка, выполненная из изолирующих материалов (сталь, полимерный композит), поддерживается периодически установленными опорными сварными металлоконструкциями из элементов фасонного профиля. Форма опор, задающая поперечное сечение тоннеля, принята параболической, что способствует рациональному распределению аэродинамических нагрузок и снижению концентрации напряжений (рис. 1а, б, в).

В рамках исследования рассматриваются ключевые критерии, охватывающие комплексный анализ аэродинамического взаимодействия поезда с тоннелем-оболочкой. Прежде всего оценивается прямое аэродинамическое воздействие, включающее порш-

невой эффект со сжатием воздуха перед составом и разрежением позади него. Оптимизация воздушного зазора между поездом и обделкой предполагает выбор между тоннелем полного сечения (1:1) с большим зазором, снижающим сопротивление, но удорожающим строительство, и уменьшенными вариантами (80 и 60 % от исходного), где меньший зазор повышает аэродинамическое сопротивление и нагрузку на корпус. Усталостные расчеты оболочки учитывают циклические нагрузки, возникающие при движении по магистрали, въезде и выезде, которые определяют прочностные характеристики конструкции, а также применение коррозионно-стойких и прочных материалов для обеспечения долговечности.

Анализируются формы оболочки: гладкая поверхность создает более стабильный поток и снижает сопротивление, тогда как гофрированная поверхность повышает жесткость ценой роста сопротивления. Для обеспечения комфорта и безопасности пассажиров исследуются шумы и вибрации с целью их минимизации, а также системы вентиляции и безопасности, предотвращающие накопление вредных веществ и оснащенные средствами быстрого реагирования и эвакуации. Наконец, учитываются экономические и экологические аспекты: энергоэффективные аэродинамические решения сокращают затраты на перевозки и улучшают экологическую устойчивость, а строительство должно минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, включая шумовое загрязнение и влияние на местные экосистемы.

Габаритные размеры проходного сечения выбраны на основе многокритериального анализа, удовлетворяющего следующим требованиям:

- обеспечение оптимального воздушного зазора между поездом и стенкой тоннеля, критически влияющего на аэродинамические нагрузки и капитальные затраты;
- минимизация аэродинамического сопротивления движению поезда за счет исключения турбулентности путем создания достаточно минимального зазора, предотвращающего интенсивное формирование волн сжатия и разрежения и, соответственно, снижения силового воздействия воздушного потока на несущие конструкции тоннеля;
- компенсационный запас по габариту, учитывающий динамические колебания подвижного состава (крены, виляния), температурные расширения и возможные деформации обделки в эксплуатации;
- резерв для технического обслуживания и ремонта, включая доступ к инженерным коммуникациям и элементам инфраструктуры.

В зонах повышенных нагрузок [1–4], вызванных циклическим сжатием и растяжением несущих элементов от колебаний давления воздушных масс, необходима оценка усталостных явлений, возникающих в элементах.

Исходные данные моделирования

Тоннель-оболочка, предлагаемая для защиты железных дорог и подвижного состава, подвержена воздействию аэродинамических сил от движения поездов с внутренней стороны и внешним со стороны бокового ветра¹. Оболочка тоннеля выполнена

¹ Белорусские инженеры разработали проект дублера Северного морского пути. URL: <https://naked-science.ru/article/column/proekt-dublera-severnogo> (дата обращения: 10.01.2026).

Таблица 1. Данные для SolidWorks [18]
Table 1. Data in SolidWorks [18]

Наименование параметра модели	Значение
Скорость движения состава	200 км/ч
Отношение площади тоннеля $S_{\text{тун}}$ / поезда $S_{\text{п}}$	5,6 (64 / 11,4)
Отношение длины тоннеля $L_{\text{тун}}$ на длину поезда $L_{\text{п}}$	1,5 (382 / 250)
Дистанция удаления хвостового вагона относительно портала	50 м
Число Рейнольдса	$0,49e + 5$
Кинематическая вязкость ν	$1,5 \cdot 10^{-5}$ (м ² / с)
Динамическая вязкость η	18,1 (мПа·с)
Плотность воздушной среды ρ	1,204 (кг/м ³)
Шероховатость поверхности тоннеля μ	realwall (6,0 мкм)
Шероховатость поверхности поезда μ	realwall (5,0 мкм)
Подвижной состав	Velaro RUS Sapsan
Тип пути	Безбалластный
Технология решателя	frozen rotor
Коэффициенты моделей турбулентности k, ϵ	$k = 1, \epsilon = 1$
Коэффициент блокировки β [10]	0,18 – 0,30

из коррозионностойкой рулонной стали. Данные, вводимые в SolidWorks, указаны в табл. 1.

Численные исследования проведены в программном комплексе SolidWorks поэтапно:

1) с помощью метода «Frozen Rotor» получена стационарная картина распределения давления от воздушного потока в секции тоннеля;

2) при использовании граничных условий предыдущего этапа в модуле SolidWorks Simulation получены поля напряжения и деформации несущих конструкций.

Результаты моделирования

Результаты моделирования показали, что при «входе» головной части поезда в тоннель наблюдается резкое увеличение давления (так называемый «поршневой эффект») [6–9], а затем давление резко падает. При соотношении площади поперечного сечения поезда к площади поперечного сечения тоннеля $\frac{11,4 \text{ м}^2}{64 \text{ м}^2} = 0,178 \approx 17,8\%$ (максимальный зазор) наблюдается наименьшее сопротивление воздуха. При размере тоннеля в масштабе 60 % от изначального наблюдается большее сопротивление и повышенное взаимодействие воздуха с корпусом поезда (табл. 2).

Полученные результаты (рис. 2) сопоставляются с данными в литературе [11] в контексте перепада давления при движении поезда в тоннеле².

Изменения давления, воспринимаемые поездом при движении в тоннеле, вызваны его взаимодействием с собственными волнами давления, сформированными носовой и хвостовой частями состава. На рис. 3 эти изменения представлены как моменты пересечения траектории движения поезда с линиями волн [10–12]. Помимо волновой структуры данный рисунок позволяет детально рассмотреть распределение скоростей и характер линий потока в области соприкосновения внешнего течения

с поверхностью поезда. Визуально выделены основные режимы течения: основной поток, характеризующийся наибольшей скоростью и относительно однородной структурой; пограничный слой, образующийся вдоль поверхности поезда вследствие трения и сопровождающийся снижением скорости; ламинарное течение, наблюдаемое на начальных этапах течения, когда течение упорядочено и слоисто; турбулентное течение, возникающее вследствие увеличения неустойчивости в потоке и проявляющееся интенсивным перемешиванием слоёв. Наличие развитой области турбулентности указывает на значительное аэродинамическое сопротивление и способствует образованию дополнительных нагрузок на конструктивные элементы.

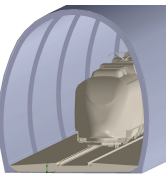
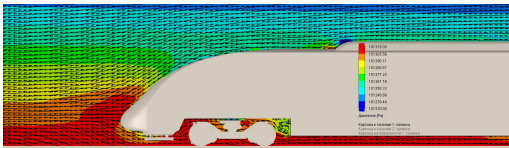
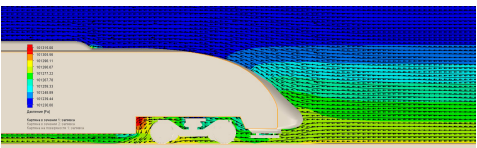
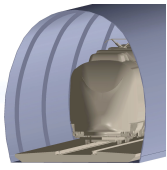
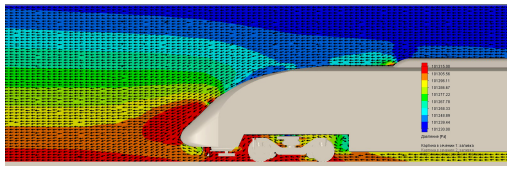
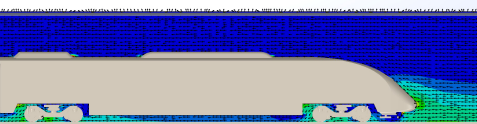
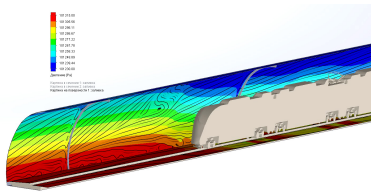
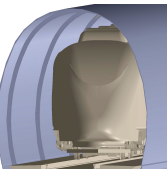
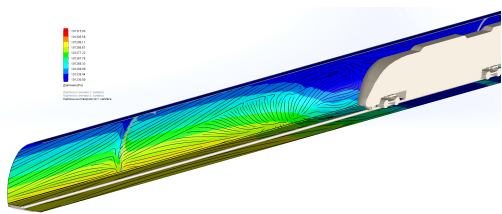
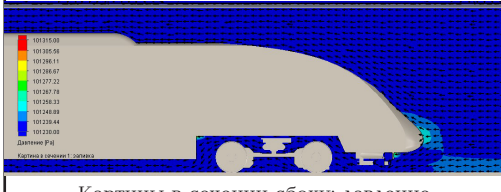
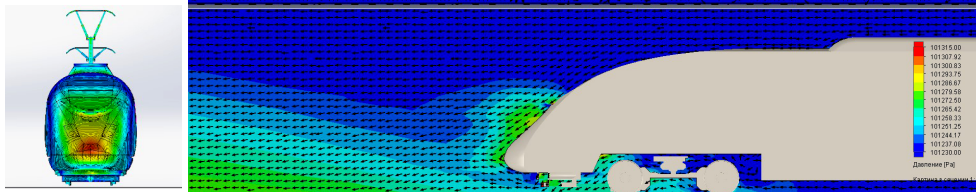
Специалисты А. Martinez, Е. Vega, J. Gaite и J. Meseguer (Испания) также определили колебания давления в тоннеле Сагидес [5] (рис. 3), показывая принципиальное отличие аэродинамического сопротивления при движении в туннеле и на открытом воздухе.

Эти результаты представляют интерес прежде всего с точки зрения определения зависимости параметров поезда и тоннеля, а именно: в результате исследования установлено, что конфигурация фронта давления носит постоянный характер, а время между изменениями зависит от длины тоннеля и скорости движения подвижного состава. Обнаружены вариации избыточного давления на головном обтекатель при въезде в тоннель.

В ходе настоящего исследования было установлено, что максимальная амплитуда давления имеет знакопеременный импульс, образующийся в районе головного обтекателя поезда. Область разрежения, формирующаяся на хвостовом обтекатель состава, по амплитуде значительно меньше головного импульса, характеризуется высокой турбулентностью, с образованием струйно-отрывных течений воздушной среды. Для высокоскоростного поез-

² Аэродинамика скоростных поездов: почему ветер не мешает TGV. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/10632-protiv-vetra-aerodinamika/> (дата обращения: 10.01.2026).

Таблица 2. Результаты моделирования
Table 2. Simulation results

Исследуемая модель	Результаты	
Тоннель I (64 м²) 	 Картинки в сечении, вид сбоку: давление и распределение потоков в передней части поезда	 Картинки в сечении, вид сбоку: давление и распределение потоков в задней части поезда
Тоннель II (0,8 от тоннеля I) 	 Картинки в сечении, вид сбоку: давление и распределение потоков в передней части поезда	 Картинки в сечении, вид сбоку: давление и распределение потоков в задней части поезда
	 Картинки на поверхности тоннеля: распределение давления вблизи корпуса поезда	
Тоннель III (0,6 от тоннеля I) 	 Картинки на поверхности тоннеля: распределение давления вокруг поезда	 Картинки в сечении сбоку: давление и распределение потоков в задней части поезда
	 Картинки в сечении сбоку: давление и распределение потоков в передней части поезда	

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

да длиной до 250 м основную часть энергозатрат на преодоление сопротивления движению составляет боковое сопротивление (сопротивление обшивки) [10]. К аналогичным выводам приходят авторы исследований [12–18].

На рис. 4 показано распределение скоростей и характер линий потока в области соприкосновения внешнего потока с поверхностью поезда. Визуально выделены основные режимы течения: основной поток, характеризующийся наибольшей скоростью и относительно однородной структурой; пограничный слой, образующийся вдоль поверхности поезда вследствие трения и сопровождающийся снижением скорости; ламинарное течение, наблюдаемое на начальных этапах течения, когда течение

упорядочено и слоисто; турбулентное течение, возникающее вследствие увеличения неустойчивости в потоке и проявляющееся интенсивным перемешиванием слоев. Наличие развитой области турбулентности указывает на значительное аэродинамическое сопротивление и способствует образованию дополнительных нагрузок на конструктивные элементы.

Выводы

На основе выполненных численных исследований сформулированы следующие выводы.

Аэродинамическая обстановка и напряжённо-деформированное состояние тоннеля оболочечного типа определяются поршневым эффектом, ключе-

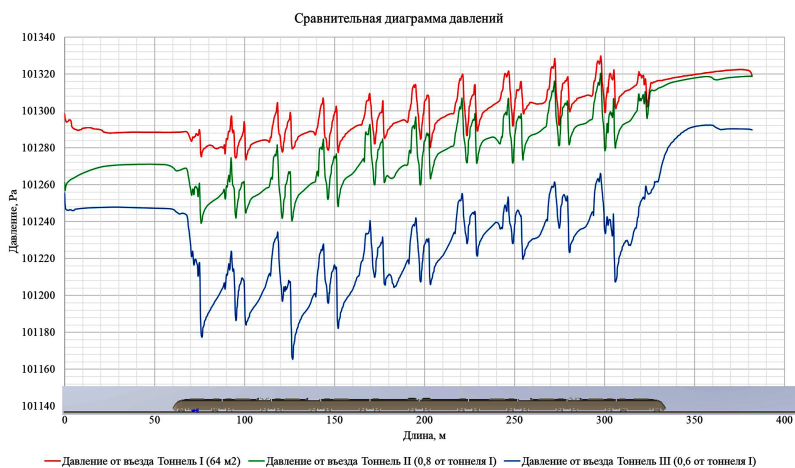


Рис. 2. Сравнительная характеристика перепадов давления в зависимости от сечения тоннеля (направление движения поезда вправо)
Fig. 2. Comparative characteristics of pressure drops depending on the tunnel cross-section (the direction of movement of the train is to the right)
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

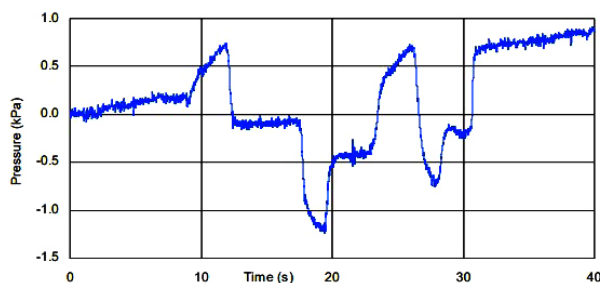


Рис. 3. Колебания давления в туннелях Сагидес (длина — 1786 м, площадь — 100 м²) [18]
Fig. 3. Pressure fluctuations in the Sagides tunnels (length — 1786 m, area — 100 m²) [18]

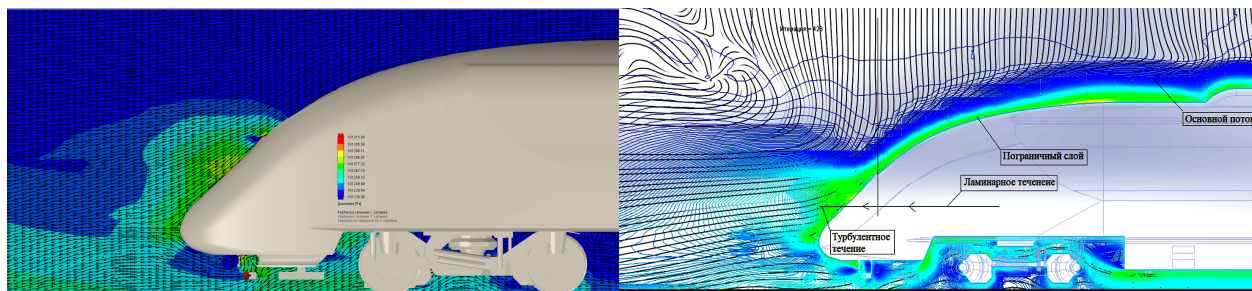


Рис. 4. Фрагмент турбулентных срывов [18]
Fig. 4. Fragment of turbulent disruptions [18]

выми параметрами которого являются длина сооружения и относительный воздушный зазор. Короткие тоннели реализуют режим «открытой» системы, не успевая сформировать устойчивую зону сжатия; длинные тоннели действуют как «сжимаемая пружина» с резким нагнетанием давления на входе и квазистационарным течением в средней части. Малый зазор усиливает поршневой эффект и градиенты давления, большой — ослабляет, приближая обтекание к условиям открытого пространства при сохранении специфики замкнутого объёма.

Максимальное воздействие создаёт знакопеременный импульс в области головного обтекателя. Хвостовая область при меньшей амплитуде характеризуется развитой турбулентностью и струйно-отрывными течениями, вносящими заметный вклад

в сопротивление. Для поездов длиной до 250 м основную долю сопротивления составляет боковое сопротивление обшивки, что делает критичным учёт пограничного слоя и турбулентности при проектировании оболочек.

Циклический характер нагружения инициирует накопление усталостных повреждений в несущих элементах и обшивке, что требует проведения специализированных усталостных расчётов и локального усиления в зонах с максимальной амплитудой напряжений.

Результаты исследования создают научно-техническую основу для разработки конструктивных мероприятий, обеспечивающих снижение аэродинамического сопротивления, повышение несущей способности и гарантированный ресурс оболочки

тоннеля в условиях эксплуатации высокоскоростных поездов.

Финансирование / Funding

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования — Минобрнауки РФ) по теме: «Научные, методологические и практические основы разработки и применения интеллектуальных технологий и систем поддержки принятия решений с учетом факторов неопределенности для обеспечения устойчивого развития транспортной отрасли Российской Федерации» (шифр научной темы FZNW-2025-0023).

The article was prepared within the research project funded by the Federal budget (funding source: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation) on the theme: "Scientific, methodological, and practical foundations for the development and application of intelligent technologies and decision support systems considering uncertainty factors to ensure the sustainable development of the transport sector of the Russian Federation" (research theme code FZNW-2025-0023).

Список источников / References

1. Воробьев А. А., Каримов Д. Д., Сотников К. А., Богданов Н. В. Управление аэродинамическим взаимодействием высокоскоростного поезда с элементами искусственных сооружений тоннельного типа // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2024. № 1 (110). С. 62–68. EDN: ZYNJHE.

Vorobyev A. A., Karimov D. D., Sotnikov K. A., Bogdanov N. V. Management of aerodynamic interaction of high-speed train with elements of tunnel-type artificial structures. *Transport of the Russian Federation*. 2024;1(110):62–68. EDN: ZYNJHE. (In Russ.).

2. Ким К. К., Крон И. Р., Ватулин Я. С., Ватулина Е. Я. Разработка метода по уменьшению лобового аэродинамического сопротивления капсулы трубопроводного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, № 2. С. 263–267. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-2-263-267>. EDN: OYZZHC.

Kim K. K., Kron I. R., Vatulin Ya. S., Vatulina E. Ya. The development of the method on the reduction of aerodynamic drag of the pipeline transport capsule. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2019;16(2):263–267. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-2-263-267>. EDN: OYZZHC. (In Russ.).

3. Novák J. Single train passing through a tunnel. *European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECCOMAS CFD 2006)*. Netherlands, 2006. 12 p.

4. Sterling M., Baker C. J., Jordon S. C., Johnson T. A study of the slipstreams of high-speed passenger trains and freight trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2008;222(2):177–193. <https://doi.org/10.1243/0954409-7jrrt133>.

5. Martinez A., Vega E., Gaite J., Meseguer J. Pressure measurements on real high-speed trains travelling through tunnels. *BBA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*. Milano, 2008. 11 p.

6. Ледяев А. П., Кавказский В. Н., Креер Р. О. Особенности проектирования тоннелей на высокоскоростных магистралях // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 3–9. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2015-4-3-9>. EDN: TBIORT.

Ledyaev A. P., Kavkazskiy V. N., Kreer R. O. Specifics of tunnel design on high-speed lines. *Transport of the Urals*.

2015;4(47):3–9. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2015-4-3-9>. EDN: TBIORT. (In Russ.).

7. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. Москва: ДМК Пресс, 2015. 564 с. ISBN 978-5-97060-140-2.

Alyamovskiy A. A. SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii. Moscow, 2015. 564 p. ISBN 978-5-97060-140-2. (In Russ.).

8. Ледяев А. П., Кавказский В. Н., Шелгунов О. О. Математическое моделирование аэродинамических процессов в железнодорожных тоннелях на высокоскоростных магистралях // Метро и тоннели. 2021. № 3. С. 40–43. EDN: GCQUMA.

Lediaev A. P., Kavkazskiy V. N., Shelgunov O. O. Mathematical modeling of aerodynamic processes in railway tunnels on high-speed highways. *Metro i Tunneli*. 2021;3:40–43. EDN: GCQUMA. (In Russ.).

9. Алферова Е. Л., Лугин И. В., Кияница Л. А. Моделирование возмущений воздушного потока при движении поездов в двухпутном тоннеле метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 6. С. 5–14. EDN: WDZUHH.

Alferova E. L., Lugin I. V., Kiyantsa L. A. Simulation of airflow disturbances to movement of trains in double-track tunnel underground. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'*. 2016;6:5–14. EDN: WDZUHH. (In Russ.).

10. Каримов Д. Д. У. Управление аэроупругим взаимодействием подвижного состава с элементами искусственных сооружений тоннельного типа: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2023. 134 с. EDN: HJBFBN.

Karimov D. D. U. Upravleniye aerouprugim vzaimodeystviyem podvizhnogo sostava s elementami iskusstvennykh sooruzheniy tonnel'nogo tipa. Saint Petersburg, 2023. 134 p. EDN: HJBFBN. (In Russ.).

11. Воробьев А. А., Ватаев А. С., Ватулин Я. С. [и др.]. Оценка динамики движения высокоскоростного подвижного состава // Техник транспорта: образование и практика. 2024. Т. 5, № 4. С. 437–444. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2024.4.437-444>. EDN: SLVLDK.

Vorobyov A. A., Vataev A. S., Vatulin J. S. [et al.]. Evaluation of the dynamics of high-speed rolling stock. *Transport Technician: Education and Practice*. 2024;5(4):437–444. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2024.4.437-444>. EDN: SLVLDK. (In Russ.).

12. Khayrullina A., Blocken B., Janssen W., Straathof J. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015;139:100–110. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.019>.

13. Полякова Е. Я. Особенности аэродинамики подвагонного пространства высокоскоростного подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2021. 150 с.

Polyakova E. Ya. Osobennosti aerodinamiki podvagonnogo prostranstva vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava. Saint Petersburg, 2021. 150 p. (In Russ.).

14. Сладкова Л. А., Неклюдов А. Н. Динамика подвижного состава и выбор параметров гасителей колебаний // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 4 (95). С. 13–20. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-2>. EDN: JYOTRB.

Sladkova L. A., Neklyudov A. N. Dynamics of the Rolling Stock and the Choice of Parameters of Vibration Dampers. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(4):13–20. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-2>. EDN: JYOTRB. (In Russ.).

15. Mengge Yu., Rongchao J., Qian Z. [et al.]. Crosswind Stability Evaluation of High-Speed Train Using Different Wind Models. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2019;32:40. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0353-7>.

16. Baker C. J. Keynote lecture — The flow around high speed trains. *Proceedings of the BBA VI Conference*. Milano, 2008. P. 34.

17. Baker C. The flow around high speed trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2010;98(6):277–298. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.11.002>.

18. Воробьев А. А., Ватулин Я. С., Ватаев А. С. [и др.]. Управление аэроупругим взаимодействием подвижного состава с элементами транспортной инфраструктуры: монография. Казань: ООО «Бук», 2025. 138 с. ISBN 978-5-00254-143-0. EDN: JNVEHB.

Vorob'yev A. A., Vatulyn Ya. S., Vataev A. S. [et al.]. *Upravleniye aerouprugim vzaimodeystviyem podvizhnogo sostava s elementami transportnoy infrastruktury*. Kazan, 2025. 138 p. ISBN 978-5-00254-143-0. EDN: JNVEHB. (In Russ.).

Вклад авторов:

А. А. Воробьев. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, разработка и адаптация расчетных формул.

А. В. Терентьев. Развернутый обзор отечественных и зарубежных источников, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами.

О. Д. Покровская. Развернутый обзор отечественных и зарубежных источников, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами.

А. А. Степанов. Обобщение и анализ результатов моделирования, формулирование выводов по проведенному исследованию.

А. В. Курбатова. Обобщение и анализ результатов моделирования, формулирование выводов по проведенному исследованию.

Authors' contribution:

Alexander A. Vorobyov. Setting research goal and objectives, development and adaptation of calculation formulae.

Alexey V. Terentyev. Detailed reviewing of domestic and foreign sources, identification of shortcomings of existing methods, comparison with alternative approaches.

Oksana D. Pokrovskaya. Detailed reviewing of domestic and foreign sources, identification of shortcomings of existing methods, comparison with alternative approaches.

Alexey A. Stepanov. Generalization and analysis of modeling results, formulation of conclusions on the conducted research.

Anna V. Kurbatova. Generalization and analysis of modeling results, formulation of conclusions on the conducted research.

Информация об авторах:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 2244-1699

AuthorID (РИНЦ): 290846

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6319-4701>

AuthorID (SCOPUS): 55786353400

e-mail: 79219751198@yandex.ru

ТЕРЕНТЬЕВ Алексей Вячеславович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Логистика и транспортно-технологические системы» Государственного университета управления, г. Москва.

SPIN-код: 6676-4524

AuthorID (РИНЦ): 895055

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3500-2201>

AuthorID (SCOPUS): 57190408096

e-mail: aleksej.terentev.67@bk.ru

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Логистика и транспортно-технологические системы» Государственного университета управления, г. Москва.

SPIN-код: 8252-2587

AuthorID (РИНЦ): 592347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9793-0666>

AuthorID (SCOPUS): 57204690735

ResearcherID: D-9930-2018

e-mail: insight1986@inbox.ru

СТЕПАНОВ Алексей Алексеевич, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Логистика и транспортно-технологические системы» Государственного университета управления, г. Москва.

SPIN-код: 4525-2056

AuthorID (РИНЦ): 442970

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4385-2612>

AuthorID (SCOPUS): 57215420888

e-mail: salex128@yandex.ru

КУРБАТОВА Анна Владимировна, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Логистика и транспортно-технологические системы» Государственного университета управления, г. Москва.

SPIN-код: 6077-1613

AuthorID (РИНЦ): 532679

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0176-4817>

e-mail: kurbatova-guu@yandex.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026; одобрена после рецензирования 15.06.2026; принята к публикации 03.07.2026.

Information about the authors:

VOROBYOV Alexander Alfeyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Land Transport and Technological Complexes Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg.

SPIN-code: 2244-1699

AuthorID (RSCI): 290846

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6319-4701>

AuthorID (SCOPUS): 55786353400

e-mail: 79219751198@yandex.ru

TERENTYEV Alexey Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Logistics and Transport Technology Systems Department, State University of Management, Moscow.

SPIN-code: 6676-4524

AuthorID (RSCI): 895055

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3500-2201>

AuthorID (SCOPUS): 57190408096

e-mail: aleksej.terentev.67@bk.ru

POKROVSKAYA Oksana Dmitrievna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor

of the Logistics and Transport Technology Systems Department, State University of Management, Moscow.
SPIN-code: 8252-2587

AuthorID (RSCI): 592347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9793-0666>

AuthorID (SCOPUS): 57204690735

ResearcherID: D-9930-2018

e-mail: insight1986@inbox.ru

STEPANOV Alexey Alekseevich, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Logistics and Transport Technology Systems Department, State University of Management, Moscow.

SPIN-code: 4525-2056

AuthorID (RSCI): 442970

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4385-2612>

AuthorID (SCOPUS): 57215420888

e-mail: salex128@yandex.ru

KURBATOVA Anna Vladimirovna, Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Logistics and

Transport Technology Systems Department, State University of Management, Moscow.

SPIN-code: 6077-1613

AuthorID (RSCI): 532679

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0176-4817>

e-mail: kurbatova-guu@yandex.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 12.01.2026; approved after reviewing 15.06.2026; accepted for publication 03.07.2026.