

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ТОННЕЛЕЙ НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ С УЧЕТОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

PROSPECTS OF TUNNELS ON HIGH-SPEED RAILWAYS DESIGN AND CONSTRUCTION IN CONSIDERATION OF AERODYNAMIC PROCESSES

О. О. Шелгунов, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

O. O. Shelgunov, OJSC «Research, design and survey institute «Lenmetrogiprotrans»

Рассмотрены особенности проектирования и сооружения тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях, а также представлены некоторые результаты моделирования аэродинамического взаимодействия подвижного состава с конструкциями однопутного железнодорожного тоннеля. Приведены некоторые результаты исследования методами математического моделирования аэродинамики поезда при различной скорости движения (250–400 км/ч) в однопутных тоннелях на ВСМ с изменяемыми геометрическими параметрами (длина, площадь поперечного сечения). Рассмотрен вопрос влияния геометрических характеристик системы «тоннель – воздушная среда – поезд» на аэродинамическое давление.

The features of the design and construction of tunnels on high-speed railways are considered, and some results of modeling the aerodynamic interaction of rolling stock with the structures of a single-track railway tunnel are presented. Some results of the study by methods of mathematical modeling of the aerodynamics of a train at different speeds (250–400 km/h) in single-track tunnels on the high-speed rail with variable geometric parameters (length, cross-sectional area) are presented. The issue of the influence of the geometric characteristics of the «tunnel – air medium – train» system on aerodynamic pressure is considered.

Согласно федеральному проекту «Развитие высокоскоростных железнодорожных магистралей», приступили к проектированию высокоскоростной специализированной железнодорожной магистрали (ВСМ) Санкт-Петербург – Москва. Руководствуясь зарубежным опытом проектирования и эксплуатации ВСМ, отмечено, что тоннели являются не только средством преодоления препятствий, но и сооружениями, предназначенными улучшить эксплуатационные качества магистралей, сохранить ландшафты, природные заповедные и охранные зоны, селитебные территории: в условиях спокойного равнинного рельефа часть линий может быть проложена в тоннелях [1, 2]. Проекты, осуществленные в последние годы в зарубежных странах, показывают, что при пересечении водных преград на ВСМ по совокупности факторов в сравнении с мостовыми переходами зачастую предпочтительными являются тоннельные варианты [2, 3].

Отмечено, что зарубежный опыт эксплуатации тоннелей на ВСМ определяет однопутные тоннели предпочтительным вариантом с точки зрения безопасности движения поездов, чрезвычайных ситуаций, так как предоставляет возможность эвакуации в параллельный тоннель, а также отсутствие остановки движения на магистрали.

В соответствии с документом «Технический регламент Таможенного Союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС002/2011):

«... – геометрические размеры поперечного сечения и конструктивные решения тоннелей должны устанавливаться с учетом минимизации величины избыточного аэродинамического давления, возникающего при входе в тоннель и движении в нем высокоскоростного железнодорожного подвижного состава;

при проектировании объектов инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта ... должны быть проведены специальные исследования для принятия решений по снижению колебаний аэродинамического давления в тоннелях ... и подземных станциях при проходе высокоскоростного железнодорожного подвижного состава с максимальными скоростями».

Площадь поперечного сечения тоннеля должна быть определена таким образом, чтобы это не приводило к критическому перепаду давлений при движении поездов [4], не вызывало дискомфорта у пассажиров [5] и не приводило к избыточной свободной площади сечения (существенное увеличение стоимости сооружения) – все это определяет одну из основных инженерных задач при проектировании тоннелей на ВСМ.

Зарубежный опыт демонстрирует, что определение геометрических параметров тоннелей на ВСМ с учетом негативных аэродинамических процессов следует осуществлять при помощи математического моделирования. Среди обилия исследований встречаются различные недостатки, такие

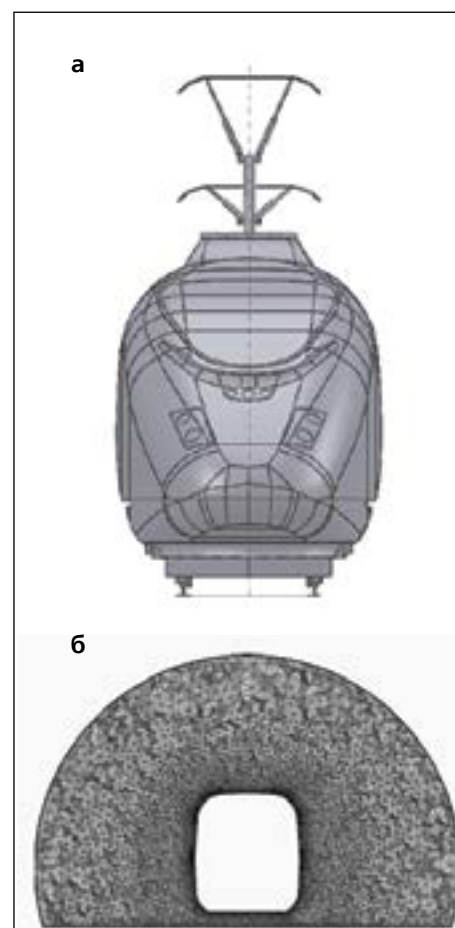


Рис. 1. Примеры моделей: а – подвижного состава; б – тоннеля на ВСМ с элементами расчетных сеток воздушной среды

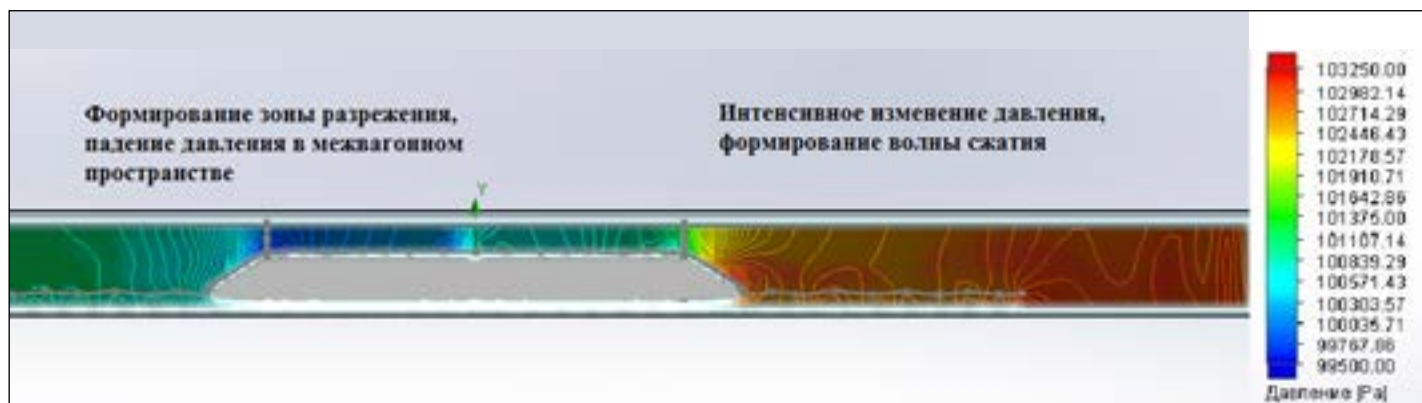


Рис. 2. Эпюра аэродинамического давления по длине тоннеля при движении поезда со скоростью 300 км/ч (при параметрах системы $\beta = 0,156$, $\lambda = 5$)

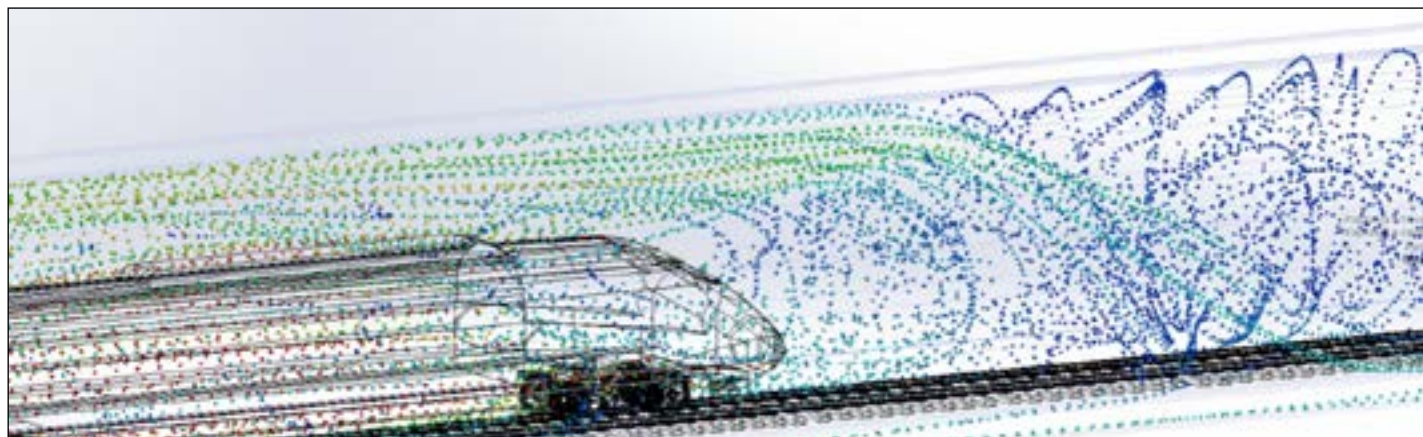


Рис. 3. Траектории воздушных потоков при движении поезда со скоростью 300 км/ч (при параметрах системы $\beta = 0,225$, $\lambda = 3$)

как: пренебрежение отдельными физико-механическими характеристиками воздушной среды, искаженное воспроизведение составляющей давления, на которую влияет трение, чрезмерное упрощение модели поезда, моделирование тоннеля имитационной схематичной конструкцией [3, 6, 7]. Существуют методы, позволяющие всесторонне и достоверно оценивать развитие аэродинамического давления в тоннеле при движении поезда со скоростями более 200 км/ч.

Методика исследований

Метод погруженного тела представляет собой размещение в расчетном объеме жидкости или воздуха твердой модели (поезда) с заданными свойствами движения. Формирование расчетной сетки для воздушного объема и тела осуществляется с наложением, при этом на каждом временном интервале определяются перекрывающиеся элементы, для которых устанавливается скорость воздуха, равная скорости движения тела. Данный подход не дает возможности моделировать пограничный слой у стенок расчетной модели, следовательно – определять аэродинамическое давление на поверхностях достоверно. При определении аэродинамического воздействия на поверхности инфраструктуры данный фактор не является принципиальным. Метод погруженного тела предъявляет сравнительно невысокие требования к вычислительным и временным затратам, и представляется применимым к расчету аэродинамического давления на поверхности конструкций.

Метод скользящих сеток представляет собой модель из стационарной и нестационарной областей: стационарная часть является фрагментом среды, внутри которой расположены неподвижные объекты и сооружения. Внутри данной области располагается нестационарная часть, представляющая собой фрагмент среды, внутри которой расположена модель поезда. Взаимодействие производится с помощью вращательного относительного движения (при значительном радиусе окружности более 1000 км) расчетных областей, таким образом возможно задавать условия линейного движения модели. Данный подход предъявляет высокие требования к точности геометрии расчетных областей и моделей, к индивидуальным динамическим системам координат движущихся объектов. В каждый интервал времени осуществляется изменение расчетной сетки, поэтому данный метод считается высокотратным с точки зрения вычислительных ресурсов и времени [8].

Выбор адекватной модели турбулентности крайне важен при постановке задачи, так как позволяет достоверно оценить аэродинамическое давление на поверхности подвижного состава и тоннельной обделки. Существует множество различных моделей турбулентности, каждая из которых обладает определенной допустимой областью применения. В 1993 г. Ф. Менгер разработал гибридную модель турбулентности SST (shear stress transport – перенос сдвиговых напряжений), комбинирующую модели «k-ε»

и «k-ω». Благодаря тому, что модель «k-ε» с высокой точностью описывает сдвиговые течения при удалении от поверхности, а модель «k-ω» – при моделировании пограничного слоя, в модели SST эффективно моделируются как пристеночные области, так и зоны, удаленные от стенки с переходом между ними посредством набора функций. Универсальность модели дает возможность ее применения для комплексных градиентных потоков, присущих движению поездов с высокими скоростями. Модель SST принята в данном исследовании.

Исследование и его результаты

Исследование включает в себя моделирование в CFD (computational fluid dynamics modeling – вычислительная гидродинамика) комплексах прохождения поездом тоннеля в виртуальной герметичной среде при различных начальных условиях: механических и геометрических параметрах системы.

Исходными данными являются геометрические параметры тоннеля и поезда – коэффициент блокирования (отношение площади поперечного сечения поезда к площади поперечного сечения тоннеля), коэффициент длины (отношение длины тоннеля к длине поезда), скорость движения поезда, аэродинамические характеристики среды (температура (T) 293 К, давление (p) 101325 Па, плотность (ρ) 1,204 кг/м³, кинематическая вязкость (ν) $1,5 \times 10^{-5}$ м²/с, динамическая вязкость (η) 18,1 МПа·с). Элементы внеш-

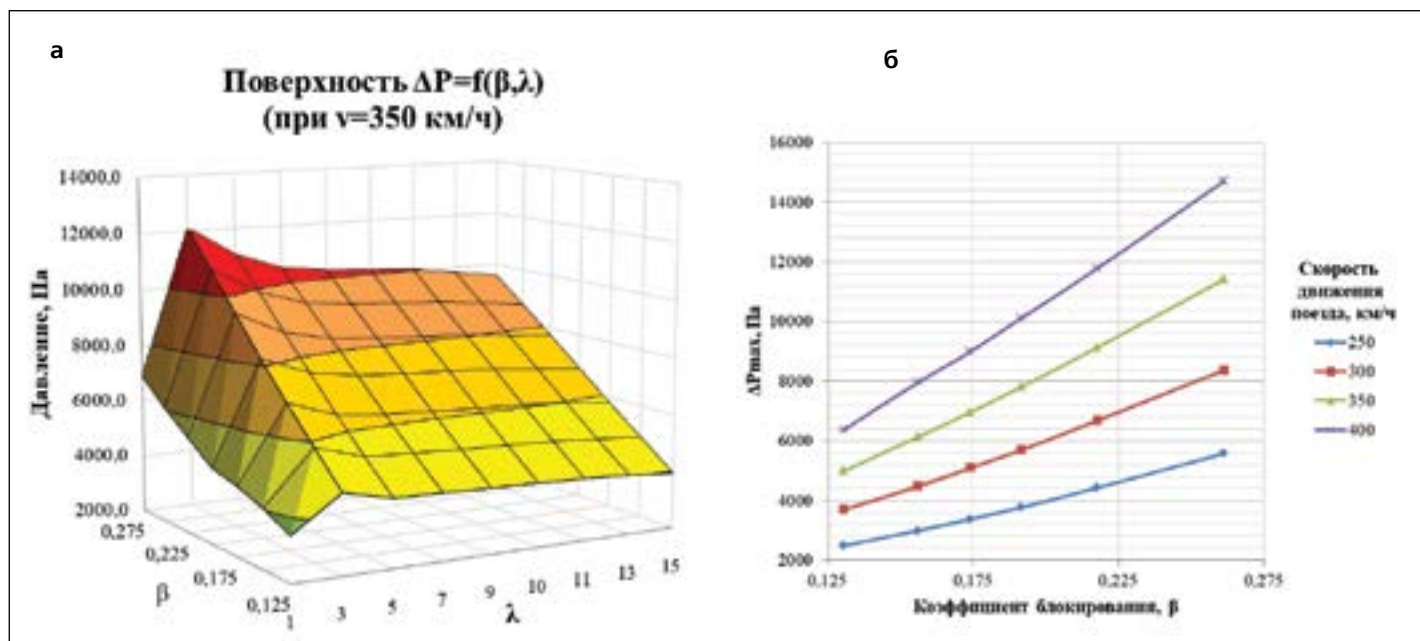


Рис. 4. Зависимость аэродинамического давления от коэффициента блокирования β : а – и коэффициента длины λ при скорости движения поезда 350 км/ч; б – при различных скоростях движения поезда и коэффициенте длины $\lambda = 3$

ней поверхности поезда – wall, элементы поверхности тоннеля – wall.

При моделировании подвижного состава за основу был взят эксплуатируемый в РФ ЭВС «Сапсан» (эксплуатируется на скоростных и высокоскоростных магистралях Китая (CRH-3), Германии (ICE-3), Испании (AVE S-103), Великобритании (BRC-374)), (рис. 1) При этом моделирование предусматривало ряд упрощений конструкции поезда: пантограф и его конструкции, двери, подробности геометрической формы для сокращения расчетных элементов и времени расчета [9]. Исследуемый диапазон скорости движения поезда – 250–400 км/ч. Детальное определение шероховатости заданного объекта 5–10 мкм.

Однопутный железнодорожный тоннель представлен в виде конструкции кругового очертания, сооружаемой щитовым способом при внутреннем диаметре тоннеля от 9,0 до 12,5 м. Шероховатость обделки учитывается коэффициентом при расчете ($\mu = 10\text{--}100$ мкм). Основание жесткое, безбалластное, внутреннее оборудование и обустройство минимизировано – имитируется утопленность в тело обделки толщиной 450 мм (цель исследования – проанализировать аэродинамические процессы и давление на обделку). Обоснованность модели тоннеля на ВСМ подтверждается аналогичными допущениями в работах [6, 10], с учётом последующей успешной верификации результатов, полученных при моделировании аэродинамического воздействия [7, 12], с результатами экспериментальных и натурных исследований зарубежных специалистов [6, 10, 11], что подтверждает адекватность применяемых моделей и расчетных методик.

Моделирование осуществлялось поэтапно, интервально; сетка разбита на подвижные и неподвижные элементы. Число Рейнольдса варьируется: например, $1,84 \times 10^7$ при ско-

рости 250 км/ч, $2,69 \times 10^7$ при скорости 350 км/ч. Размер сеточных элементов воздушной среды переменный – от 0,01 до 0,5 м с плавным сгущением в подвижной области. Задачи рассмотрены в нестационарной постановке, шаг по времени – 0,001–0,005 с.

Автоматизированное развитие пограничного слоя у поверхностей за счёт детальной дискретизации сетки и проработки пограничного слоя дает возможность предоставить детальную и точную картину распределения давлений, что оказывает влияние на величины аэродинамических воздействий. Определение пристеночных слоёв позволяет получить корректный градиент давлений, соответственно, достоверные величины аэродинамического давления.

Графические результаты представлены в виде эпюр аэродинамического давления, характеризующего формирование отдельных областей повышенного и пониженного давления (рис. 2). В исследовании были определены характерные зоны сжатия и разрежения, а также участки наиболее неравномерного проявления давления по длине движущегося поезда и тоннеля.

Определение траекторий воздушных потоков в различные моменты времени особенно эффективно для прогноза пульсационных явлений, а также установления смены направлений потоков и траекторий их увлечения силами вязкого трения при высоких скоростях движения поездов. Такие проявления, как спиралевидные завихрения, создающие динамические пульсации, сопровождают движение поезда внутри тоннеля: при этом они начинают генерироваться ещё до момента интерференции тоннельных волн с волнами, отраженными от порталов (рис. 3).

Характерная спиралевидная форма движения воздушных масс – следствие сохранения импульса (напряжения пропорциональны

скорости деформации в рассматриваемом объеме). Спиралевидное формирование воздушных потоков устойчиво, способно поддерживать баланс внутренней энергии, может взаимодействовать с другими объемами. Взаимодействие двух противоположно направленных масс является вязким, таким образом возникает условие для образования вращательных движений воздуха.

Одним из недостатков существующих исследований является отсутствие при аэродинамических расчетах полноценного учета геометрических характеристик системы «тоннель – воздушная среда – поезд»: тоннельные волны давления многократно интерферируют по длине сооружения. В описываемой методике при расчете аэродинамического взаимодействия системы учитывается влияние как площади поперечного сечения тоннеля, так и его длины; по результатам были сформированы поверхности влияния, отражающие зависимость аэродинамического давления от геометрических характеристик системы при различных скоростях движения поезда (в качестве примера на рис. 4 приведена поверхность для скорости движения поезда 350 км/ч). Отмечено, например, что значение критерия безопасности, ограничивающее превышение давления 10 кПа, может быть превышено при движении поезда в однопутном тоннеле на ВСМ со скоростью 350 км/ч и более в диапазоне величин $\lambda = 2\text{--}7$ и $\beta = 0,234\text{--}0,265$. Таким образом, возможно определение области оптимальных технических характеристик системы «тоннель – воздушная среда – поезд», при которой для требуемых скоростей движения до 400 км/ч существуют допустимые величины геометрических параметров тоннеля, не приводящие к превышению аэродинамического давления 10 кПа. С достаточной точностью можно применять описанную методику для технических и ин-

женерных расчетов с целью определения оптимальных значений площади поперечного сечения тоннеля на ВСМ.

Поверхности давления позволяют полноценно оценить процесс изменения давления в зависимости от группы факторов, учесть одновременное влияние геометрических параметров системы на перепады давления. Рост коэффициента блокирования провоцирует увеличение давления, тогда как рост коэффициента длины приводит перепад давления к экстремуму, после чего происходит уменьшение давления, его стабилизация. В качестве характерной зависимости также приведен график влияния коэффициента блокирования на аэродинамическое давление при различной скорости движения поезда, тем самым показана степень взаимосвязи параметров системы (см. рис. 4).

Результаты исследований аэродинамических процессов в однопутных тоннелях на ВСМ подтверждают возможность прогноза аэродинамического состояния тоннелей при их проектировании и эксплуатации посредством применения методики моделирования аэродинамического взаимодействия.

Ключевые слова

Железнодорожные тоннели, высокоскоростные магистрали, высокоскоростной подвижной состав, аэродинамические расчеты, аэродинамическое давление, численное моделирование.

Railway tunnels, high-speed railways, high-

speed rolling stock, aerodynamic calculations, aerodynamic pressure, numerical simulation.

Список литературы

1. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие: в 2 т. И. П. Киселев и др.; под ред. И. П. Киселева. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020.
2. Фролов Ю. С. Тоннели на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Фролов Ю. С. // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2010. – № 1 (26). – С. 28–31.
3. Меркин В. Е. Аэродинамика движения высокоскоростных поездов в тоннеле: некоторые результаты проведенных в мире исследований / Меркин В. Е., Космин В. В. // Метро и тоннели. – 2021. – № 1. – С. 29–33.
4. СП 453.1325800.2019 «Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства»
5. UIC code 779–9/R. Safety in Railway Tunnels. 1st edition, UIC, 2002. – 63 p.
6. Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research / J. Niu, Y. Sui, Q. Yu, X. Cao, Y. Yuan // Energy and Built Environment. – 2020. – № 1 (4). – P. 351–375.
7. Mathematical modeling of aerodynamic processes in railway tunnels on high-speed railways / A Ledyayev, V. Kavkazskiy, Ya. Vatulin, V. Svitin, O. Shelgunov // E3S Web of Conferences.

- 157 (47). КТП-2019 – 2020. – P. 06017. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706017>
8. Лабути́н, Н. А. Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры / Н. А. Лабу́тин // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. № 4 (101). – С. 6–16.
9. Aerodynamic Effects Produced by a High-Speed Train Traveling through a Tunnel Considering Different Car Numbers / J.-M. Du, Q. Fang, G. Wang, J. Wang, J.-Y. Li // Symmetry. – 2022. – № 14 (3). – 479.
10. Three-dimensional characteristics of pressure waves induced by high-speed trains passing through tunnels / T. Wang, J. Chen, J. Wang, F. Shi, L. Zhang [et al.] // Acta Mechanica Sinica. – 2023. – № 39 (5). – <https://doi.org/10.1007/s10409-023-23261-x>
11. Full-Scale Experimental Investigation of the Interaction between Trains and Tunnels / C. Somaschini, T. Argenti, E. Brambilla, D. Rocchi, P. Schito, G. Tomasini. // Applied Sciences – 2020. – № 10(20). – 7189.
12. Кавказский, В. Н. Исследование аэродинамики движения поезда в однопутных тоннелях на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Кавказский, О. О. Шелгунов // Транспортное строительство. – 2022. – № 4. – С. 37–40.

Для связи с автором

Шелгунов Олег Олегович
OShelgunov@lmgt.ru



КНИЖНАЯ ПОЛКА

СЛОВАРЬ РУССКИХ И АНГЛИЙСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ АББРЕВИАТУР



В издательстве «Инфра-Инженерия» (<https://infra-e.ru/>) выпущен специальный словарь-справочник «Транспортные аббревиатуры. Русские и английские значения» (2024, 264 с., авторы-составители В. В. Космин, А. А. Космина и О. А. Космина). Словарь содержит около 4,9 тыс. русских и более 5,0 тыс. английских терминов и охватывает все виды транспорта (автомобильный, воздушный, водный (включая морской и речной), железнодорожный, трубопроводный) во всех аспектах создания и функционирования соответствующих транспортных объектов: изыскания, проектирование, эксплуатация, развитие, а также смежные вопросы: экономика, информационное обеспечение, взаимодействие видов транспорта и т. д. Материал словаря может быть полезен широкому кругу специалистов магистральных видов транспорта, студентам соответствующих высших и средних специальных учебных заведений, аспирантам, переводчикам в качестве справочника и как методическое пособие при формировании новых аббревиатур в текстах соответствующей тематики.