

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2022, №3, Том 9 / 2022, N 3, Vol. 9 <https://t-s.today/issue-3-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS322.pdf>

DOI: 10.15862/02SATS322 (<https://doi.org/10.15862/02SATS322>)

Разработка и исследование конструктивного решения однопутного тоннеля для высокоскоростных железнодорожных магистралей с учетом аэродинамических процессов

Шелгунов О.О., Кавказский В.Н.

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Шелгунов Олег Олегович, e-mail: ooshelgunov@gmail.com

Аннотация. Материалы, представленные в статье, будут использованы в диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. В статье приведены сведения о строительстве и эксплуатации тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях, отмечается, что на новых строящихся линиях сооружаются, как правило, однопутные тоннели. Приведен обзор развития существующих методов снижения и компенсации аэродинамического давления и способов его регуляции, проанализированы их достоинства и недостатки.

Представлено описание нового конструктивного решения, способствующего снижению интенсивности аэродинамических воздействий, описаны принципы его работы и основная гипотеза, показаны преимущества перед существующими решениями. Изложены материалы исследования аэродинамического состояния системы «тоннель-поезд», полученные по результатам численного моделирования методами вычислительной гидрогазодинамики. Выполнен анализ изменения аэродинамического давления при различных параметрах прохождения поезда в тоннеле и дана оценка состояния системы «тоннель-поезд». Основное внимание уделено степени влияния скорости движения поезда, отношений площадей поперечного сечения и длин тоннеля и поезда.

Результаты численного моделирования оценивались по величинам перепадов аэродинамического давления, по характеру аэродинамического состояния системы «тоннель-поезд», по характеру траекторий воздушных потоков и их скоростях. В табличной и графической формах представлены полученные результаты, проведен их анализ. Показана эффективность нового конструктивного решения тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали в решении задачи смягчения аэродинамического давления, обоснована рациональность инженерного решения.

Конструктивное решение тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали обладает потенциалом к снижению материалоемкости и улучшению технико-экономических характеристик сооружения и может быть применено при проектировании и строительстве для дальнейшей эффективной эксплуатации перспективных скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий в современных условиях с учетом аэродинамических явлений.

Ключевые слова: железнодорожные тоннели; высокоскоростные железнодорожные магистрали; численное моделирование; система «тоннель-поезд»; аэродинамическое давление; аэродинамика высокоскоростных поездов; тоннель для высокоскоростного подвижного состава

Development and study of a constructive solution for a single-track railroad tunnel for a high-speed railway line, with the account of aerodynamic processes

Oleg O. Shelgunov, Vladimir N. Kavkazskiy

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia

Corresponding author: Oleg O. Shelgunov, e-mail: ooshelgunov@gmail.com

Abstract. The materials presented in the article will be used in the dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Ph.D. in Engineering Science. The article provides information on the construction and operation of a railroad tunnel for a high-speed railway line, it is noted that generally single-track railroad tunnels are constructed on new railway lines. A development review of existing methods for reducing and compensating aerodynamic pressure and ways of its regulation is given, and its advantages and disadvantages are analyzed.

A new design solution description that helps to reduce the intensity of the aerodynamic effect is presented, the principles of its operation and the main hypothesis are described, and advantages over existing solutions are shown. The study materials of the aerodynamic state of the "tunnel-train" system, obtained from the numerical simulation results by the methods of computational fluid dynamics, are presented. An analysis of the change in aerodynamic pressure for various parameters of the passage of a train in a tunnel has been carried out, and the "tunnel-train" system state assessment has been given. The main

attention is paid to the influence degree of the train speed, the cross-sectional areas ratio, and tunnel and train lengths. The numerical modeling results were evaluated by the aerodynamic pressure drop values, by the nature of the aerodynamic state of the "tunnel-train" system, by the nature of the air flows, and by its speed trajectories. The obtained results are presented in tabular and graphic forms, and results analysis is carried out. The effectiveness of a new design solution for a tunnel for a high-speed railway line in solving the problem of mitigating aerodynamic pressure is shown, and the rationality of the engineering solution is substantiated.

The constructive solution of the tunnel for a high-speed railway line has the potential to reduce material consumption and improve the technical and economic characteristics of the structure and can be used in the design and construction for further efficient operation of perspective high-speed railway lines in modern conditions, with the account aerodynamic phenomena.

Keywords: railroad tunnel; high-speed rail lines; numerical simulation; tunnel-train system; aerodynamic pressure; aerodynamics of high-speed trains; tunnel for high-speed rolling stock

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons "Attribution" («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons "Attribution" 4.0 Global License



1. Общие положения

1. General terms and conditions

Отличительной особенностью высокоскоростных железнодорожных магистралей является более высокий процент искусственных сооружений в сравнении с регулярными железными дорогами (до 200 км/ч). Тоннельные пересечения в основном представляют собой протяженные (более 10 км) сооружения, конструктивно — однопутные и двухпутные варианты. Современные требования безопасности и эксплуатации, мировая практика тоннелестроения определяют сооружение преимущественно однопутных тоннелей: с 1990-х годов их количество увеличивается на 20 %, относительная протяженность — на 35 % в сравнении с двухпутными (рис. 1).

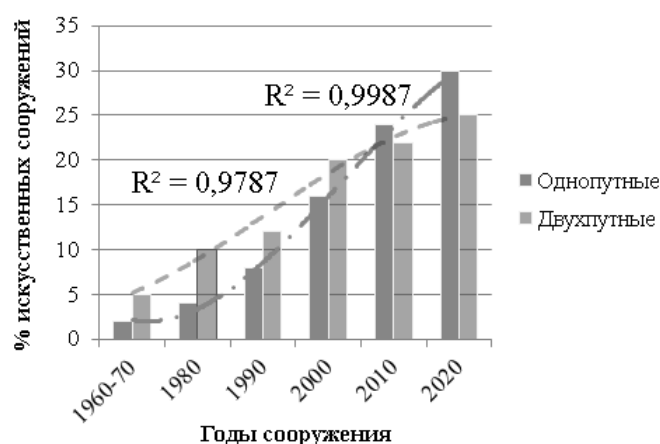


Рисунок 1. Рост количество однопутных и двухпутных тоннелей, в том числе на высокоскоростных железнодорожных магистралях (разработано автором)

Figure 1. Growth in the number of single-track and double-track tunnels, including on high-speed railways (developed by the author)

Повышенные требования к конструктивным решениям тоннельных сооружений связаны с безопасностью эксплуатации по причине избыточного аэродинамического давления, возрастающего с увеличением скоростей движения поездов. В соответствии с документом Технический регламент Таможенного Союза 002/2011¹:

- «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;

¹ Технический регламент Таможенного Союза ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта».

- при проектировании объектов инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта, включающих составные части железнодорожного пути, а также при проектировании продукции, включающей элементы составных частей железнодорожного пути, должны быть проведены специальные исследования для принятия решений по снижению колебаний аэродинамического давления в тоннелях, закрытых выемках и подземных станциях при проходе высокоскоростного железнодорожного подвижного состава с максимальными скоростями.»

В соответствии с СП 453.1325800.2019² «Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства»:

- «Обделка тоннелей должна иметь улучшенные аэродинамические свойства, не иметь выступающих углов, в связи с чем: ниши и камеры в тоннеле не устраиваются, трубы с подводимым кабелем питания освещения и слаботочных устройств утапливаются в тело обделки, внутренних конструкций тоннеля или путевого бетонного основания при условии соблюдения мероприятий по их герметизации, шкафы, проемы и ниши во внутренних конструкциях должны быть закрытыми, например, дверцами жалюзийного типа;
- тоннели, как правило, проектируют однопутными, отдельными под каждый путь;
- при проектировании двухпутных тоннелей (допускается при соответствующем технико-экономическом обосновании и длиной до только 1000 м) следует предусматривать: конструктивные решения, обеспечивающие разделение путей в тоннеле, или организационно-технические решения, исключающие одновременное нахождение в одном сечении тоннеля двух поездов».

Наиболее распространенные в мировой практике, отвечающие современным требованиям безопасности варианты конструктивно-технологических и объемно-планировочных решений тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях представлены на рисунке 2. При этом очевидными преимуществами с точки зрения безопасности в случае чрезвычайных ситуаций (пожар, сход поезда с рельсов) обладают именно однопутные варианты.

² СП 453.1325800.2019 «Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства».

Принципиальные варианты поперечных сечений однопутных тоннелей

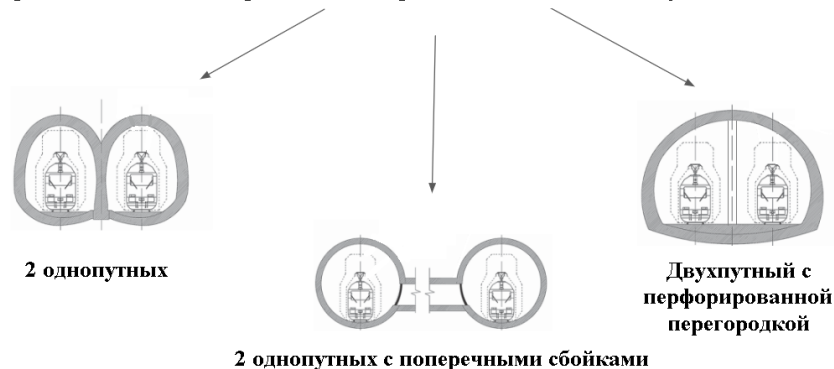


Рисунок 2. Принципиальные варианты поперечных сечений однопутных тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях (разработано автором)

Figure 2. General cross-sections variants of single-track tunnels on high-speed railway lines (developed by the author)

Процесс повышения аэродинамического давления при движении объектов в замкнутом пространстве изучается с конца XIX начала XX веков [1]. Совершенствование методов исследований в экспериментальных аэродинамических трубах позволило воспроизводить аэродинамические процессы и явления с целью их подробного описания и изучения. С развитием железнодорожного транспорта и тоннелестроения актуальность приобретал вопрос безопасности движения поездов в тоннелях с точки зрения аэродинамического взаимодействия. Опытным путем было определено, что при высоких скоростях движения поезда физическое подобие аэродинамики при экспериментах в трубах нарушалось, не отвечало требованиям масштабирования, вызывало противоречивые результаты. С ростом скоростей эксплуатации поездов было выявлено, что при скоростях около 100 км/ч и более избыточное давление начинает существенно влиять на внутреннее обустройство тоннелей, а также на комфорт пассажиров и экипажа поезда.

Поршневой эффект, привычный для метрополитенов, был достаточно подробно изучен в XX веке, однако с ростом скоростей выяснилось, что проявления аэродинамики этим не ограничиваются: возникает сложное волновое поле давления, а волны микродавления распространяются и на притоннельные порталы, частично вырываясь наружу. Длительное время основной зависимостью было принято считать возрастание давления квадратично скорости движения, однако при тщательных изучениях, а также с развитием моделирования и натурных экспериментов, были выявлены эффекты трения, влияние свободной площади поперечного сечения внутри тоннеля, а также влияние длины состава и длины тоннеля и других многих параметров (число Рейнольдса — отношение сил инерции к силам вязкости, коэффициент сопротивления поезда и пр.). С ростом негативного влияния

аэродинамического давления стали появляться предложения о мерах его смягчения, которые развивались и модернизировались со временем из-за разнообразных недостатков, невозможности применить тот или иной способ на возрастающих скоростях движения поезда.

Первые предложения о мерах уменьшения величины избыточного аэродинамического давления с помощью изменений конструктивных и объемно-планировочных решений тоннельных сооружений появлялись при обнаружении данной проблемы в процессе эксплуатации и носили интуитивный, эмпирический характер. Пионерным, исторически сложившимся способом является увеличение площади поперечного сечения тоннеля — избыток площади влияет на уменьшение сопротивления движению, снижает интенсивность перепадов давления и скоростей движения воздушных потоков. Однако за этим явным решением стоит очевидная нерациональность — невысокая эффективность (значительное увеличение поперечного сечения — до 75 % непропорциональное уменьшению аэродинамического давления — до 10–15 %) при значительных затратах: увеличение объемов разработки грунта, продолжительности сроков строительства (рис. 3).

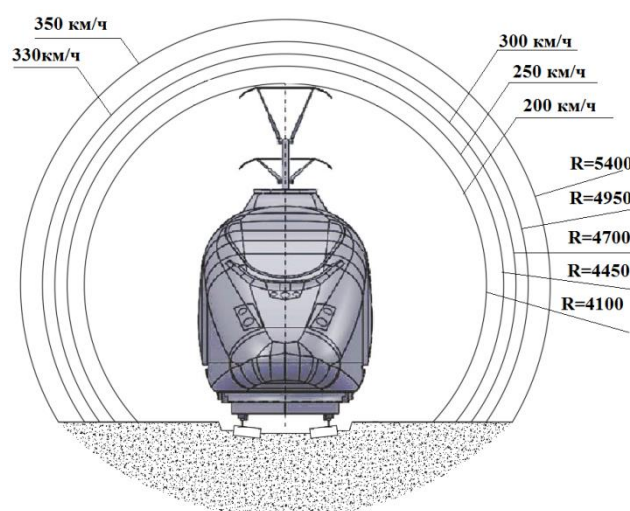


Рисунок 3. Схема увеличения радиуса внутреннего очертания тоннеля в зависимости от скорости движения поезда (разработано автором)

Figure 3. Scheme of increasing the tunnel inner outline radius depending on the speed of the train (developed by the author)

Последующие решения развивались в сторону эффективного применения инфраструктуры, входящей в состав тоннельных пересечений, но свободной от движения поездов: вентиляционные шахты, поперечные сбойки, вспомогательные (сервисные тоннели), штольни и дополнительные камеры и т. п. Вентиляционные шахты, как способ смягчения аэродинамических воздействий в железнодорожных тоннелях, показали эффект уменьшения колебаний до 15–20 % как с принудительной вентиляцией, так и без неё. Основным достоинством является базовая

необходимость применения стволов в циклах строительства и эксплуатации большинства тоннельных пересечений, а при помощи модернизируемых систем вентиляции нетрудно организовать принудительное удаление воздушных масс. Недостатки заключаются в дорогостоящих эксплуатационных системах, а также горизонтальных, зачастую протяженных штольных между транспортным тоннелем и шахтой, значительно повышающих сопротивление. Это влечет снижение эффективности в борьбе с избыточным давлением, которое, как было установлено экспериментально, может оказываться в значительной степени неравномерным по длине тоннельного сооружения, и таким образом условия эксплуатации только ухудшаются, аэродинамическое давление, наоборот, возрастает (рис. 4).

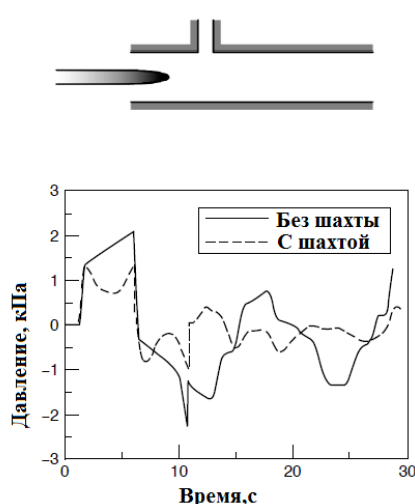


Рисунок 4. Влияние вентиляционной шахты на перепады давления в тоннеле [2]

Figure 4. Influence of a ventilation shaft on pressure drops in a tunnel [2]

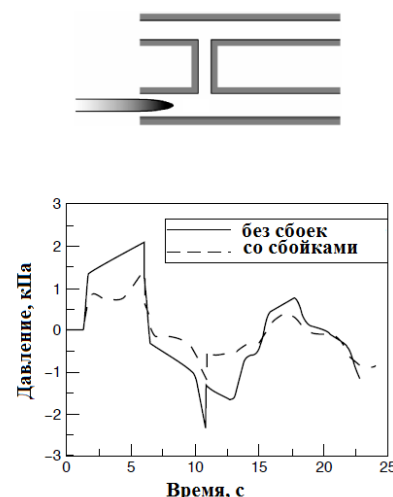


Рисунок 5. Влияние поперечной сбойки на перепады давления в тоннеле [2]

Figure 5. Influence of interconnections on pressure drops in the tunnel [2]

Сервисные тоннели оказались неэффективны в решении вопроса смягчения аэродинамического давления из-за меньшего поперечного сечения сбоев и возрастания сопротивления, так как воздушные массы могут удаляться из транспортного тоннеля только через сбойки. Тогда как сами поперечные сбойки между двумя параллельными однопутными тоннелями при отсутствии герметичных закрывающих элементов эффективнее до 10–15 %, так как позволяют выводить избыточные воздушные массы в соседний тоннель (рис. 5). Однако это бесполезно при встречном параллельном движении поездов, трудоемко в сооружении, и также снижает функциональность самих сбоев, а отсутствие дверей и переборок противоречит принципам пожарной безопасности.

С целью улучшения технико-экономических показателей и уменьшения сроков строительства в 80–90-ые годы были актуальны предложения варианта двухпутного тоннеля с перфорированной стеной-

перегородкой. Данный способ позволяет снижать давление за счет уменьшения его интенсивности (площадь больше однопутного), переброса давления в свободную площадь тоннеля, но при встречном движении поездов площадь поперечного сечения полностью занята и сокращена частью перфорированной стены, что приводит к моментальному ухудшению аэродинамических условий (рис. 6). Эффективность такого решения невысока, тогда как соблюдение безопасности эксплуатации является крайне сложным вопросом, требующим наличия значительно большего количества инженерных систем, а эксплуатационные риски возрастают.

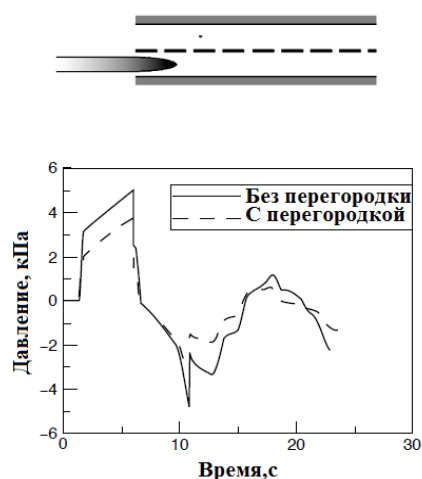


Рисунок 6. Влияние перфорированной перегородки на перепады давления в тоннеле [2]
Figure 6. Influence of a perforated baffle plate on pressure drops in a tunnel [2]

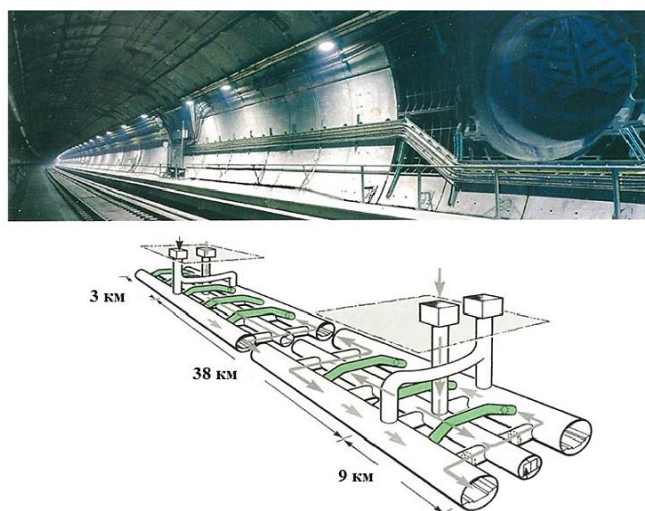


Рисунок 7. Схема противодутьевых поперечных сбоек в Евротоннеле [3]
Figure 7. Scheme of anti-blow interconnections in the Eurotunnel [3]

При более подробном изучении проблемы избыточного давления способы развивались и модернизировались: количество значительных недостатков (ограниченность или невозможность успешного применения конструктивных решений, сложность эксплуатации при возрастающих скоростях движения поезда, высокая стоимость) уменьшалось. Так появилось изящное конструктивное решение — противодутьевые поперечные сбойки, применяемые для борьбы с избыточным давлением в протяженном (50450 м) Евротоннеле [3; 4] (скорости эксплуатации поездов до 200 км/ч) (рис. 7). Эксплуатация тоннеля подтвердила эффективность решения в снижении аэродинамического давления до 15–18 %, однако такой способ повышает сроки и сложность сооружения тоннельного пересечения и его стоимость до 15 %.

В 90-ые годы в Японии был смоделирован и рассчитан конструктивный вариант однопутного тоннеля с дополнительными разгружающими камерами и резонаторами (рис. 8, 9). Решение показало свою эффективность до 25 %, тем не менее, в расчетах было достаточно допущений: показана только одна рекомендованная скорость движения поезда в тоннеле (230 км/ч), не были исследованы влияние длины тоннеля, шероховатостей поверхностей. При всех недочетах данный способ является наиболее действенным и полезным в решении проблемы избыточного давления внутри тоннеля при движении поезда со скоростями более 200 км/ч [5].

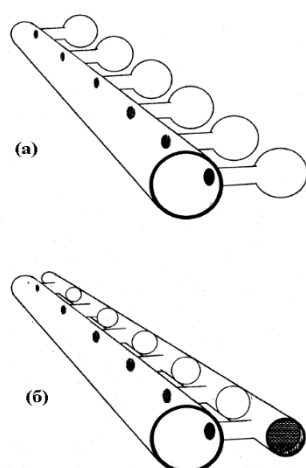


Рисунок 8. Тоннель
с разгружающими камерами [5]
Figure 8. Tunnel
with unloading chambers [5]

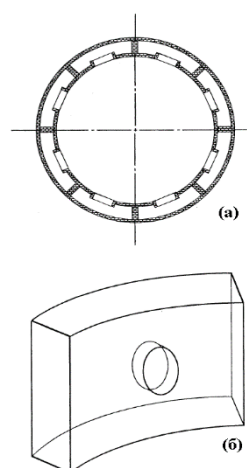


Рисунок 9. Конструкция
тоннеля с резонаторами [5]
Figure 9. Construction
of a tunnel with resonators [5]

Известно, что конструкция верхнего строения железнодорожного пути (ВСП) в тоннеле влияет на распространение волн давления по его длине и их интенсивности (рис. 10). Балластная конструкция пути позволяет снизить давление из-за возникающего трения и поглощения волновых эффектов, однако из-за негативных явлений вылета элементов щебня при скоростях движения поездов от 100 км/ч общемировая тенденция заключается в отказе от балластного пути на высокоскоростных магистралях и применении разнообразных конструкций пути на жестком основании без балласта. Кроме того, отмечается, что основная часть преимуществ балластного пути заключается непосредственно во влиянии на снижение интенсивности части волн микродавления, вырывающихся из тоннеля, тогда как внутри тоннеля это влияние уменьшается [6].

Следует отметить, что параллельно развитию искусственных сооружений происходила эволюция подвижных составов [1], однако данная работа посвящена именно решению вопросов аэродинамики и смягчений аэроупругих воздействий при высокоскоростном движении с точки зрения объектов транспортной инфраструктуры.

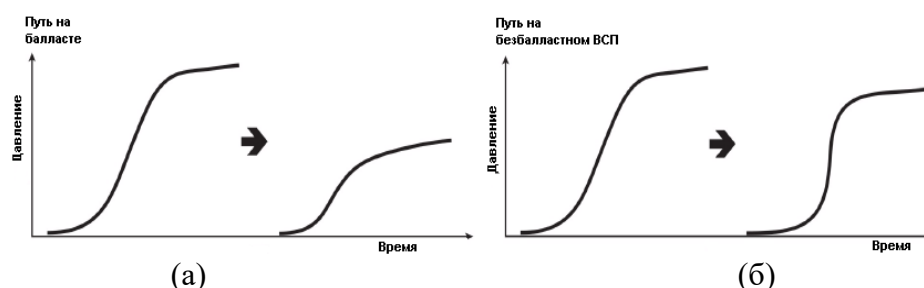


Рисунок 10. График изменения давления в зависимости от времени при образовании волны давления в процессе движения поезда в тоннеле с (а) балластным ВСП; (б) безбалластным ВСП (составлено авторами на основе [6])

Figure 10. Pressure change graph depending on the time during the pressure wave formation during the train movement in a tunnel with (a) ballast track superstructure; (b) ballast-free track superstructure (compiled by the authors based on [6])

Анализ существующих решений показывает очевидную необходимость в разработке аэродинамически эффективного конструктивного решения с удовлетворительными технико-экономическими показателями на протяженной длине тоннельного сооружения. Повышение аэродинамического давления при движении поездов в тоннелях представляет собой комплексный вопрос, исследуемый сейчас не только экспериментально, но в основном с применением математического моделирования, что стало возможным благодаря развитию современных методов и мощностей оборудования, о чем свидетельствуют как работы зарубежных специалистов [7–9], так и отечественные обзорные публикации [10]. Математическое моделирование позволяет расширить возможную область исследований и поиска решений за счет широкого диапазона варьируемых параметров моделируемой системы. Совокупность методов исследования проблемы избыточного аэродинамического давления при движении поездов в тоннелях с высокими скоростями позволяет более эффективно заниматься изучением возможностей снижения величины избыточного аэродинамического давления и разработкой способов управления данным воздействием.

2. Описание конструктивного решения однопутного тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали

2. Design solution description for a single-track tunnel for a high-speed railway

Предложение о компенсационных мерах для снижения избыточного аэродинамического давления в системе «тоннель-поезд» при скоростях движения до 400 км/ч заключается в разработке конструктивного решения однопутного тоннеля. Предложенный конструктивный вариант,

зарегистрированный авторским коллективом патентом на изобретение РФ 2683841³ от 02.04.2019, обладает преимущественными особенностями по сравнению с традиционными, позволяющими смягчать проявления перепадов давления, минимизировать риск наступления предельной амплитуды аэродинамического давления. Особенность заключается в сквозных каналах, расположенных в тоннельной обделке, позволяющих компенсировать перепады давления и волны сжатия, перераспределяя их по длине тоннеля при движении поезда (рис. 11).

Предлагаемый способ регуляции избыточного давления, снижении его интенсивности и управлении аэродинамическим воздействием заключается в следующем: встроенные в постоянную конструкцию тоннеля сквозные каналы, пронизывающие обделку тоннеля по длине, позволяют перераспределять избыточные воздушные массы из зоны высокого давления (область сжатия) в зону более низкого давления (область разрежения) без принудительной вентиляции. Это позволяет решить вопрос безопасности с точки зрения аэродинамического взаимодействия подвижного состава внутри железнодорожного тоннеля, так как происходит уменьшение амплитуды аэродинамического давления.

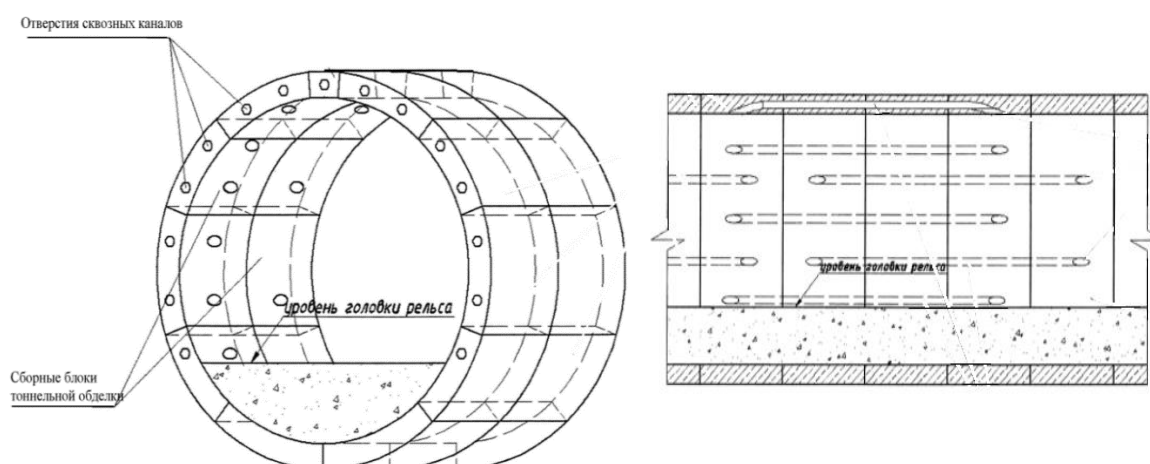


Рисунок 11. Запатентованное конструктивное решение тоннельного сооружения для высокоскоростной магистрали РФ 2683841 (разработано автором)

Figure 11. Patented constructive solution of a tunnel structure for a Russian Federation high-speed highway 2683841 (developed by the author)

Основная гипотеза уменьшения интенсивности негативных аэродинамических проявлений состоит в процессе физического перехода воздушных масс из области сжатой зоны (носовая часть) в область разрежения (головная часть, хвостовая часть) поезда, что способствует снижению интенсивности давления. Очевидно, что под действием

³ Патент 2683841 Российская Федерация, МПК E21D 9/14; E21D 11/20. Тоннель для высокоскоростного подвижного состава: 2018120265: Заявл. 31.05.2018; Оpubл. 02.04.2019. Бюл. № 10. / Кавказский В.Н., Шелгунов О.О. — 16 с.: ил.

высокого давления воздух перемещается в область более низкого давления, однако на скоростях движения, рассматриваемых в работе (250–350 км/ч) воздушные массы начинают проявлять иные свойства, характерные для жидкостей. Известно, что гидравлическое сопротивление вещества повышается с уменьшением свободной площади сечения для прохождения этого вещества, что и происходит при движении поезда в тоннеле. Сквозные каналы теоретически должны быть устроены для того, чтобы дать дополнительную площадь, через которую можно снизить сопротивление и добиться перетекания избыточных воздушных масс под давлением. Резонным вопросом является исследование повышения сопротивления и торможения непосредственно в самих каналах, которые несоразмерны в диаметре тоннельному сооружению. Поэтому важно провести полнофакторное исследование работы данного конструктивного решения, тщательно изучить геометрические и механические параметры каналов, которые могут быть эффективны в решении задачи уменьшения интенсивности аэродинамического давления.

Данный способ потенциально обладает значительными преимуществами в сравнении с существующими: относительная дешевизна и возможность получения экономии при строительстве протяженных тоннелей за счет отсутствия дополнительных выработок и объемов разработки грунта, удобство эксплуатации и сокращение трудозатрат. При доказательстве эффекта снижения давления может быть получена возможность снижения площади поперечного сечения тоннеля при сохранении прежней интенсивности перепадов давления, а значит — соблюдении требований безопасности для пассажиров и персонала по перепадам аэродинамического давления, что приведет к сокращению затрат. В основу дальнейших исследований для усовершенствования конструктивных-технологических, объемно-планировочных параметров тоннеля положено математическое моделирование с учетом аэродинамических явлений.

3. Расчетная схема конечно-элементной модели и условия

3. Finite element model and conditions design model

Целью данного раздела является обоснование эффективности работы конструктивного решения тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали со сквозными каналами, определение геометрических параметров их эффективной работы с учетом аэродинамических процессов, а также определение соответствия тоннельных сооружений требованиям безопасности. Основным критерием безопасности в мировом тоннелестроении и эксплуатации

высокоскоростных поездов согласно нормативной документации⁴ принято лимитирование перепада аэродинамического давления не более 10 кПа в любой точке тоннеля по его длине за любой интервал времени.

Мировая практика проектирования и строительства тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях свидетельствует о том, что в настоящее время эффективным инструментом являются методы численного моделирования подобных задач, в частности метод конечных объемов. Метод конечных объемов (МКО) является наиболее приспособленным к моделированию гидрогазодинамических процессов, не требующий детализированного моделирования пограничного слоя в отличие от метода конечных элементов, более подробно описывающий расчетные области, чем метод конечных разностей. Одна из ключевых характеристик МКО, позволяющая решению удовлетворять интегральным балансам даже на грубой сетке, основывается на интегральном сохранении массы, количества движения и энергии на любом объединении контрольных объемов и на всей расчетной области, при этом число узловых точек может быть любым. Эффективность применения подобных методов подтверждена многочисленными работами, опубликованными в трудах российских и зарубежных специалистов [7–9; 11–14]. Методика прогноза влияния аэродинамических процессов на объекты железнодорожной инфраструктуры также подтверждена исследованиями, выполненными специалистами ФГБОУ ВО ПГУПС [12; 13].

С целью исследования аэродинамического взаимодействия поезда при прохождении однопутного тоннельного пересечения на высокоскоростной железнодорожной магистрали произведена серия экспериментов (имитационное моделирование). 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 — скорости движения поезда v_{tr} (км/ч), площади поперечного сечения S_{tun} (м²) и длины тоннеля L_{tun} (м), приведенные к безразмерным коэффициентам блокирования β (отношение площади поперечного сечения поезда S_{tr} к площади поперечного сечения тоннеля S_{tun}) и длины λ (отношение длины тоннеля L_{tun} к длине поезда L_{tr}).

В качестве граничных условий были заданы параметры окружающей среды, а именно: температура (T°) 293 К, давление (p) 101325 Па, плотность (ρ) 1,204 кг/м³, кинематическая вязкость (ν) $1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с,

⁴ UIC code 779-11R. Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations, 2nd edition. 2005, 86 стр.

динамическая вязкость (η) 18,1 мПа·с. Модели поезда и тоннельного сооружения — элементы *realwall* с заданной шероховатостью (μ).

Среди моделей турбулентности при решении задач аэродинамики движения высокоскоростных железнодорожных составов выделяют RANS (основывающиеся на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds averaged Navier-Stocks Method)) — двухпараметрические модели, базирующиеся на рассмотрении кинетической энергии турбулентных пульсаций k . Второе уравнение имеет либо выражение переноса скорости диссипации энергии ε , либо удельной скорости диссипации энергии ω , а комбинированная модель SST (shear stress transport — перенос сдвиговых напряжений) основывается на высокой точности описания сдвиговых течений при удалении от стенки для k - ε моделей и эффективности моделирования пограничного слоя в k - ω модели. Преимущества этих моделей позволяют при моделировании между зонами достичь плавного перехода.

С целью анализа параметров конструктивного решения однопутного тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали со сквозными каналами в результате серии экспериментов будут определены аэродинамические характеристики каналов разной геометрии; распределение давления в каналах; расчетное сечение канала; геометрические параметры каналов, понижающих давление сжатой зоны; геометрические параметров каналов, перераспределяющих воздушные потоки в зону разрежения.

При этом параметры моделирования системы «тоннель-поезд» принимаются по наименее благоприятным вариантам работы, т.е. критические по длине и площади поперечного сечения сооружения: коэффициент длины $\lambda = 3..7$; площадь поперечного сечения тоннеля $S = 55..75 \text{ м}^2$ ($\beta = 0,19..0,26$); скорость движения поезда $v = 250..350 \text{ км/ч}$. Варьируемые геометрические характеристики: площадь поперечного сечения каналов; длина канала и положение начала группы каналов; угол входа канала.

Математическая модель представляет собой апробированную модель поезда типа высокоскоростного электропоезда «Сапсан» и универсальное тоннельное сооружение с изменяемыми параметрами (при моделировании возможно варьировать геометрические характеристики — длину, площадь поперечного сечения) (рис. 12). Тоннельное сооружение моделируется как объект инфраструктуры с жестким безбалластным основанием, внутреннее оборудование и обустройство воспроизведено в минимальном количестве, так как цель исследования — проанализировать аэродинамические процессы и давление на конструкции. Однопутный железнодорожный тоннель представлен в варианте кругового очертания

тоннеля, сооружаемого щитовым способом с дополнительными воздуховодными каналами.

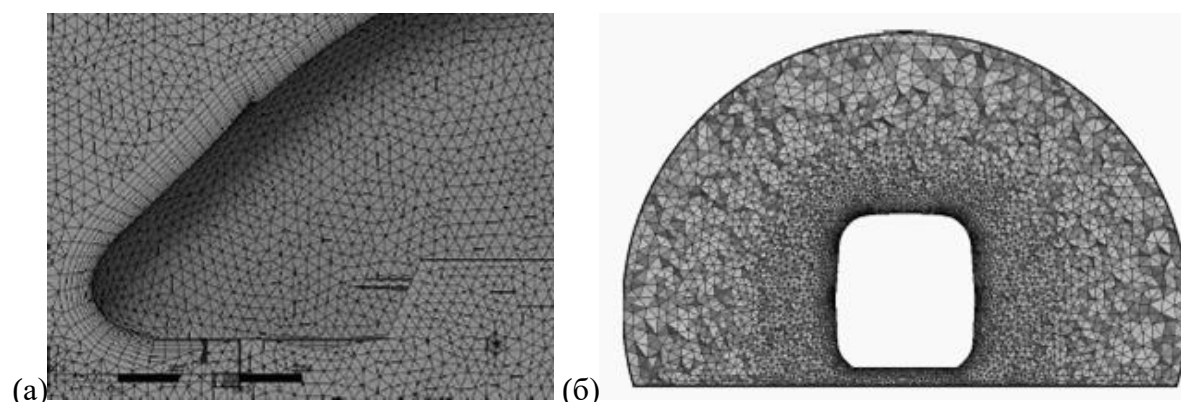


Рисунок 12. Примеры математических моделей с элементами расчетных сеток (а) подвижной состав и прилегающие зоны; (б) пространство внутри сечения тоннеля (разработано автором)

Figure 12. Examples of mathematical models with a cell of the grid elements (a) rolling stock and adjacent areas; (b) space inside the tunnel section (developed by the author)

4. Результаты исследований и обсуждение

4. Research results and discussion

Моделирование и расчет производится поэтапно интервально, сетка разбита на подвижные и неподвижные элементы в зависимости от рассматриваемой области. Основным изменяемым параметром входных данных является скорость движения поезда (250–350 км/ч), выходные параметры — амплитуды статического и динамического давлений, скорости движения воздушных масс, аэродинамическое сопротивление, траектории воздушных потоков. Методика расчета была успешно верифицирована и апробирована специалистами ФГБОУ ВО ПГУПС [12; 13]; в данном исследовании приведено сравнение результатов с нормативными⁵ и натурными данными, полученными в КНР [7; 14; 15], фрагмент сравнений приведен в таблице 1.

Данные сравнительного анализа позволяют сделать вывод о применимости методики расчета к решению аэродинамических задач взаимодействия поезда и железнодорожных однопутных тоннелей. Из подтвержденных физических явлений и удовлетворительной сходимости (в пределах 11 %) следует вывод о том, что задачи имеют корректные решения, правомерность применения методики расчета не вызывает сомнений. Это позволяет применить данную методику к расчету

⁵ UIC code 779-11R. Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations, 2nd edition. 2005, 86 стр.

конструктивного решения однопутного тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали со сквозными каналами.

Таблица 1 / Table 1

Сравнение полученных при моделировании прохождения однопутного тоннеля (без сквозных каналов) поездом со скоростью 300 км/ч результатов

Comparison of the results obtained in the simulation of the train passage on a single-track tunnel (without end-to-end channels) at a speed of 300 km/h

V = 300 км/ч (km/h)	Амплитуда давления, Па Pressure amplitude, Pa	
	$\beta = 0,125; \lambda = 3$	$\beta = 0,125; \lambda = 5$
UIC 779-11 ⁴	3635,0 / 100 %	3385,0 / 100 %
Решение 1 [2; 14] Solution 1	3790,9 / +4,3 %	3535,8 / +4,5 %
Решение 2 [7] Solution 2	3240,4 / -10,8 %	3101,2 / -8,4 %
Натурное исследование (Китай) [7; 15] Field observation (China)	3426,7 / -5,7 %	3194,6 / -5,6 %
Автор (Методика) Author (Methodology)	3544,0 / -2,5 %	3279,2 / -3,1 %

Составлено автором / Compiled by the author

Результатами решения задач аэродинамического взаимодействия стали численные значения и эпюры (рис. 13) перепадов давления, аэродинамического сопротивления, а также характеристики воздушного потока, его траектории (рис. 14). Были определены характерные зоны сжатия и разрежения, а также величины их аэродинамического давления; определены участки наиболее неравномерного проявления давления по длине движущегося поезда и по длине тоннеля; подтверждены наличие сложного поля завихрения в голове и хвосте состава и по длине тоннеля, в том числе вокруг состава по его длине и в областях изменения сечения с наличием сквозных воздухопроводных каналов.

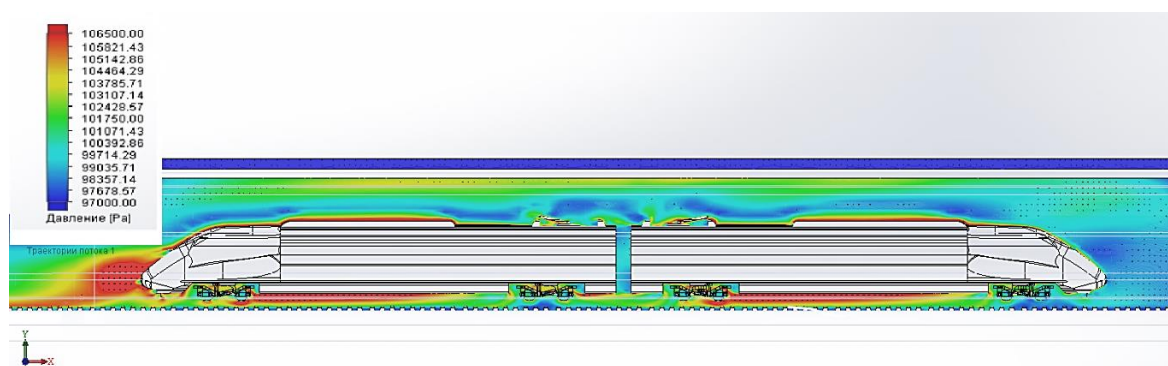


Рисунок 13. Эпюра аэродинамического давления при прохождении (при движении поезда со скоростью 300 км/ч ($\beta = 0,225, \lambda = 3$)) (разработано автором)

Figure 13. Aerodynamic pressure epure during the passage (when the train moves at a speed of 300 km/h ($\beta = 0.225, \lambda = 3$)) (developed by the author)

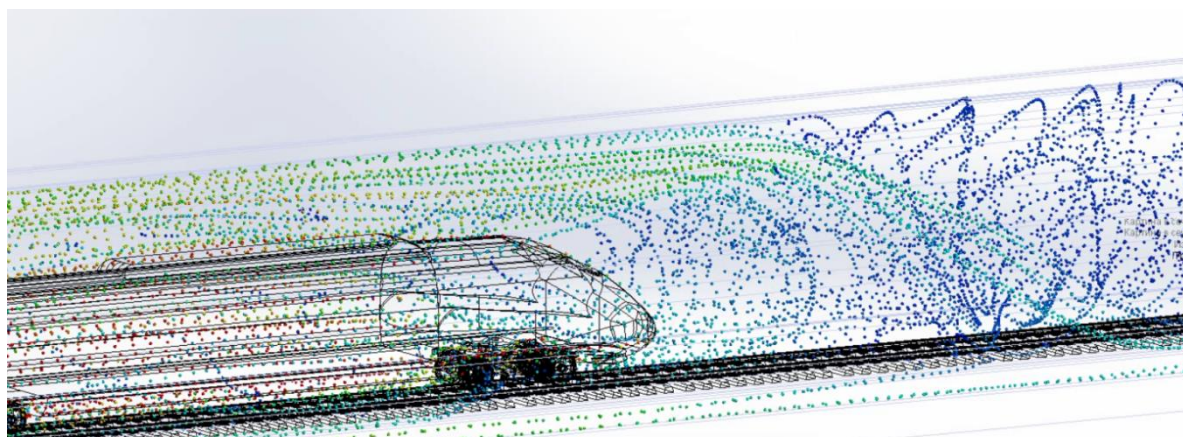


Рисунок 14. Траектории воздушных потоков при прохождении (при движении поезда со скоростью 300 км/ч ($\beta = 0,225$, $\lambda = 3$)) (разработано автором)

Figure 14. Air flows trajectories during the passage (when the train moves at a speed of 300 km/h ($\beta = 0.225$, $\lambda = 3$)) (developed by the author)

Отмечено, что сначала производилось моделирование и расчет кругового очертания нового тоннеля с воздуховодными каналами внутри конструкции обделки с варьируемыми геометрическими параметрами. Моделирование производилось параметрически, с учетом изменения разбивки подвижных сеток в процессе расчета, варьируемая геометрия сквозных каналов представлена в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Варьируемые параметры сквозных каналов при моделировании

Varying parameters of end-to-end channels during simulation

Варьируемый параметр Varying parameter	Диапазон варьирования Variation range	Шаг варьирования Variation step
- количество каналов в сечении channels in the section	10–30	3
- диаметр канала, см / поперечное сечение канала, м ² channel diameter, cm / channel cross-section, m ²	5,0/0,00196–15,0/0,01767	2,0
- длина канала, м channel length, m	10–150	10
- угол входа канала, ° channel entry angle, °	5–30	5

Составлено автором / Compiled by the author

Первым этапом было установление наиболее эффективной конфигурации каналов: были выполнены полнофакторные эксперименты в соответствии с программой планирования. По результатам сравнения был выполнен анализ конструктивных вариантов и выбран для дальнейшего моделирования наиболее эффективный с точки зрения смягчения амплитуды аэродинамического давления.

Было определено, что эффект снижения давления наблюдается при длине канала от 55 м, падает с увеличением длины канала от 80 до 90 м. Кроме того, группа каналов, начинающаяся практически у портала

тоннеля (в пределах 100 м) и продолжающаяся по его длине показывают больший эффект снижения давления, чем каналы, начинающиеся дальше от портала (от 150–200 метров и более) (рис. 15). Это влияние обусловлено эффектом интенсивного и мгновенного изменения аэродинамического сопротивления движению поезда при его входе в тоннель: воздушные массы разгоняются моментально, их кинетическая энергия слишком значительна, поэтому более быстрая компенсация давления (близкое расположение каналов к началу тоннеля) показывает лучший эффект в смягчении перепадов как статического, так и динамического давлений.

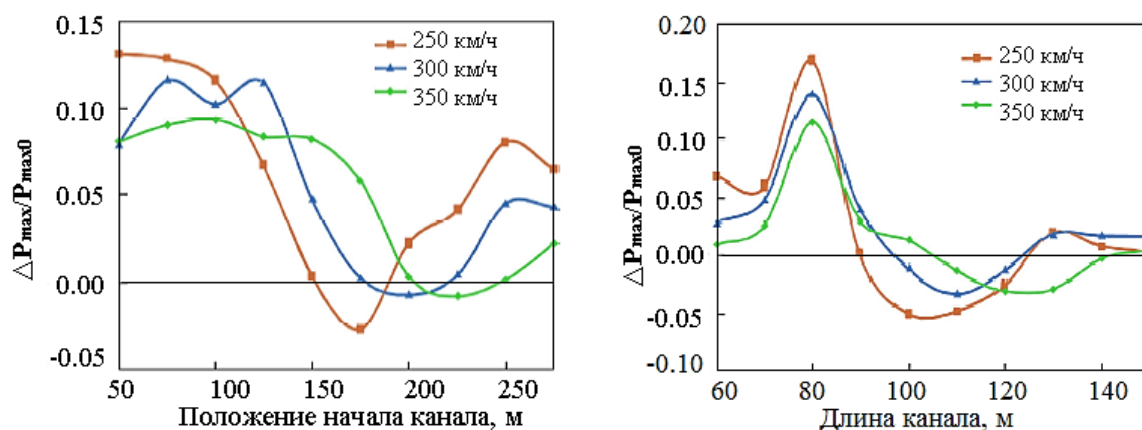


Рисунок 15. Графики зависимостей относительного изменения давления от положения начала сквозного канала и его длины (разработано автором)

Figure 15. Dependency graph of the relative change in pressure on the position of the beginning of the end-to-end channel and its length (developed by the author)

На графиках (рис. 16) показаны зависимости изменения относительного давления при разных площадях поперечного сечения каналов и углах входа. Гидравлическое сопротивление каналов с самого начала слишком значительно для компенсации давления, а разница давлений области сжатия и разрежения слишком мала, чтобы воздушные массы могли через каналы перераспределиться в другую зону. Поэтому важно определение величины количества и минимальной площади поперечного сечения канала для возможности эффективного переноса воздушных масс. Эффективные значения площадей каналов отличаются в диапазоне скоростей движения поездов: так, для скоростей движения от 250 км/ч эффект показывают отверстия диаметром не менее 7 см, с ростом скоростей эффект наблюдается для диаметров до 11–12 см. К определенной скорости, особенно при конкретных значениях коэффициентов длины и блокирования ($\lambda = 3..5$; $\beta = 0,225..0,26$), эффективность каналов диаметром до 15 см начинает падать и колеблется в уровне 0,5–1 %. Однако в тех условиях, которые способствовали эффекту снижения интенсивности давлений, уменьшение составляло до 12,5 % на скорости движения поезда 350 км/ч.

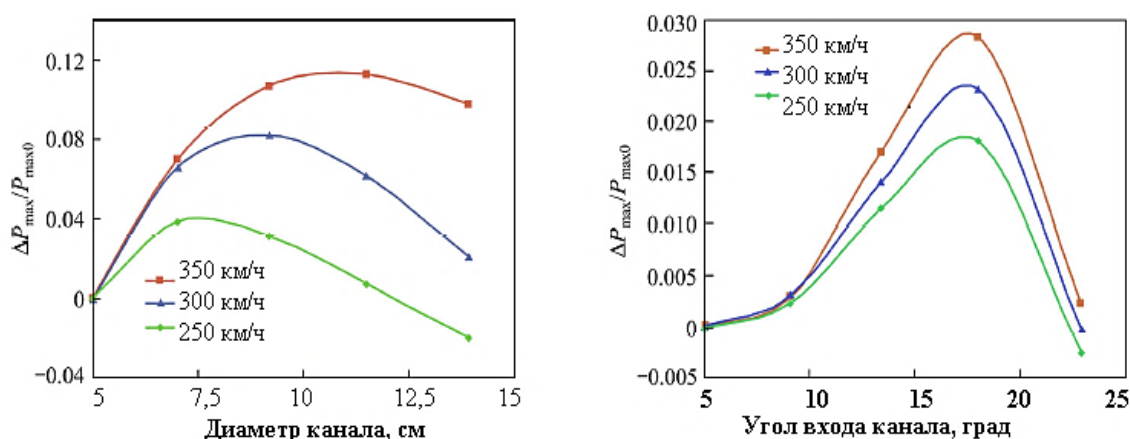


Рисунок 16. Графики зависимостей относительного изменения давления от площади поперечного сечения сквозного канала (разработано автором)

Figure 16. Dependency graph of the relative pressure change on the cross-sectional area of the end-to-end channel (developed by the author)

Угол каналов напрямую связан с углом атаки воздушных потоков, и для выявления эффективного угла требуется провести больше детальных комплексных исследований пограничных слоев в зоне начала отверстий каналов в обделке тоннеля. Удалось качественно и количественно определить, что эффективный диапазон находится в пределах 8° – 17° . При этом эффект заключается именно в принципиальной возможности движения воздушных масс при входе в канал под конкретным углом, отсутствии их торможения и уплотнения внутри канала воздуховода. До 8° и более 17° – 20° возникает повышение гидравлического сопротивления каналов, которое почти не преодолевается воздушными массами сжатой зоны (менее 2 %). Кроме того, это явление следует сопоставить и сравнить в дальнейших исследованиях и длиной каналов.

При площади сечения тоннеля 55 м^2 эффект проявляется не менее, чем при 12 сквозных каналах в сечении тоннеля. С ростом величины площади поперечного сечения тоннеля аэродинамическое давление уменьшается, эффект смягчения продолжает проявляться, поэтому увеличение количества отверстий каналов в сечении более 12 нецелесообразно. Эффект незначительно усиливается в пределах 12–25 каналов в сечении, затем остается стабильным, однако увеличение количества каналов может привести к снижению несущей способности тоннельной обделки.

Результаты моделирования конструктивного решения тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали со сквозными каналами сравнивались с аналогичными по геометрическим (длины, площади поперечного сечения) и механическим характеристикам системы «тоннель-поезд» расчетными вариантами конструкций без каналов в диапазоне скоростей движения поезда 250–350 км/ч. Результаты расчетов

с учетом варьирования скоростей с шагом 50 км/ч при наихудших условиях ($\lambda = 5$, $S = 55 \text{ м}^2$ и $S = 75 \text{ м}^2$) приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Результаты исследования амплитуды избыточного
аэродинамического давления при движении поезда в однопутном тоннеле

The study results of the excess aerodynamic
pressure amplitude when a train moves in a single-track tunnel

Параметр Parameter	Амплитуда избыточного аэродинамического давления, %/Па The amplitude of excess aerodynamic pressure, %/Pa					
Коэффициент длины, б/р Length coefficient, b/r	$\lambda = L_{\text{тон}}/L_{\text{пс}} = 5$					
Скорость движения поезда, км/ч Train speed, km/h	250		300		350	
Площадь поперечного сечения тоннеля, м^2 Tunnel cross-sectional area, м^2	55	75	55	75	55	75
Конструкция тоннельной обделки без каналов Tunnel lining design without channels	100 % 5383,50	100 % 3652,05	100 % 7784,25	100 % 5291,35	100 % 10200,0	100 % 7060,80
Конструкция тоннельной обделки с каналами Tunnel lining design with channels	94 % 5060,50	95 % 3469,45	89 % 6927,98	92,5 % 4894,50	90,5 % 9231,0	87,5 % 6178,20

Составлено автором / Compiled by the author

При коэффициенте блокирования от 0,19 до 0,26 критическое давление в тоннелях с коэффициентом длины 5 возможно смягчить до 12,5 %, а в тоннелях с коэффициентом длины до 7 отмечается эффект снижения давления до 10 % (рис. 17). Данная эпюра представляет собой сравнение двух круговых сечений тоннелей — площадь поперечного сечения первого варианта при внутреннем диаметре $\varnothing 10200 \text{ мм}$ (без сквозных каналов) больше второго варианта при внутреннем диаметре $\varnothing 9400 \text{ мм}$ (со сквозными каналами) на 14,5 %.

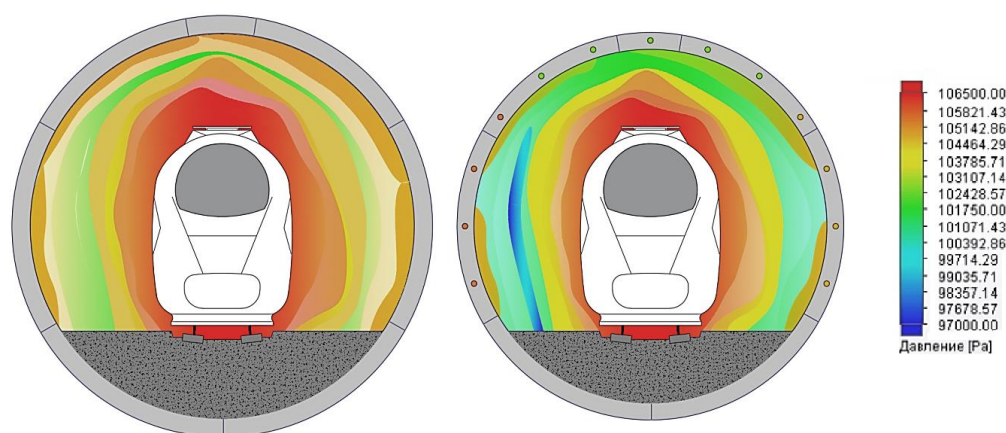


Рисунок 17. Сравнение эпюр аэродинамического давления при прохождении поезда тоннеля со скоростью 350 км/ч ($\beta = 0,225$, $\lambda = 5$) в тоннеле без сквозных каналов и со сквозными каналами (разработано автором)

Figure 17. Comparison of aerodynamic pressure diagrams when a train passes through a tunnel at a speed of 350 km/h ($\beta = 0.225$, $\lambda = 5$) in a tunnel without end-to-end channels and with end-to-end channels (developed by the author)

Критерий безопасного давления в 10 кПа на скорости до 350 км/ч соблюден в обоих конструктивных вариантах; кроме того, в тоннеле со сквозными отверстиями снижена интенсивность аэродинамического давления. Таким образом, даже при улучшенном режиме эксплуатации по аэродинамическим воздействиям, вариант конструкции со сквозными каналами может позволить сократить площадь поперечного сечения на 14,5 % без ухудшения условий аэродинамики. Это значительная величина, учитывая протяженность высокоскоростных тоннелей, что дает возможность экономии. С возрастанием скоростей эффект от каналов проявляется более значительно, так как позволяет рационально распределять избыточное давление воздушных масс (происходит уменьшение аэродинамического давления до 10–12,5 %).

На рисунке 18 показана сравнительная картина изолиний давлений в поперечном сечении при движении поезда со скоростью 250–350 км/ч в тоннеле без сквозных каналов и со сквозными каналами: она отражает характерные зоны уменьшения интенсивности давления.

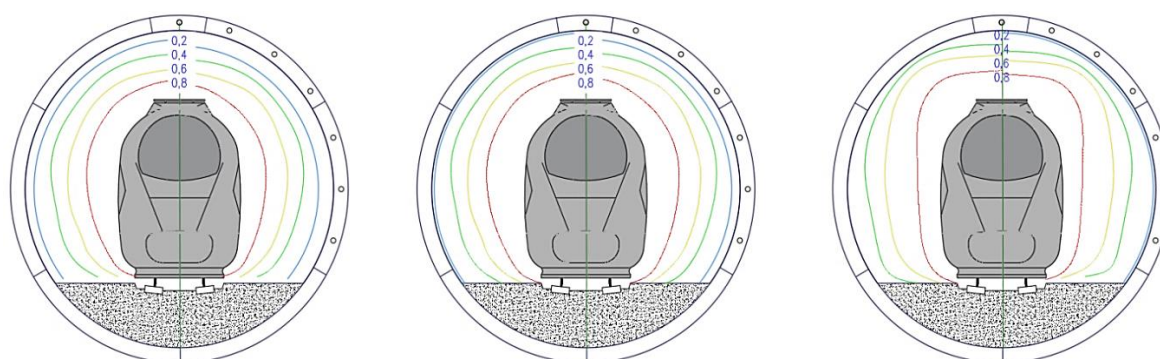


Рисунок 18. Изолинии аэродинамического давления при прохождении поездом тоннеля со скоростью 250–350 км/ч ($\beta = 0,225$, $\lambda = 5$) (разработано автором)

Figure 18. Isolines of aerodynamic pressure when a train passes through a tunnel at a speed of 250–350 km/h ($\beta = 0.225$, $\lambda = 5$) (developed by the author)

Интенсивность перепадов незначительно (5–7 %) изменяется по длине тоннеля, однако для протяженных тоннелей это изменение носит существенный характер из-за продолжительности аэродинамического воздействия. В поперечном сечении тоннеля давление носит менее пульсационный характер, однако оказывает неравномерное (несимметричное) воздействие на обделку тоннеля — это связано в первую очередь с турбулентными завихрениями, а также принципом наложения волн, образующих сложное по траектории волновое поле вокруг движущегося поезда. Наиболее интенсивным оказывается воздействие на обделку в уровне верхнего контура поезда, где, даже несмотря на сглаженные аэродинамические формы состава, может возникать срыв потоков как в головной, так и в хвостовой частях поезда. С точки зрения завихрений и траекторий воздушных потоков не возникает проблемы

забивания каналов обездвиженным воздухом. В новом конструктивном варианте интенсивность подобных потоков и воздействий удастся компенсировать за счет распространения воздушных потоков в зону разрежения и область тоннеля, свободную от движения поезда, стабилизировать аэродинамическое состояние системы «тоннель-поезд».

5. Обсуждение

5. Discussion

Моделирование позволило убедиться в эффективности конструктивного решения однопутного тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали, подтверждении гипотез о перераспределении давления через сквозные каналы. Было обосновано положительное влияние воздухопроводов на перепады аэродинамического давления, снижении общей амплитуды давления до 12,5 %. В связи с увеличением свободной площади для движения воздушных масс за счет дополнительных каналов в обделке главным преимуществом технического решения является возможность уменьшения площади поперечного сечения тоннеля в сравнении с вариантом без сквозных каналов, что также приводит к возможности уменьшения площади поперечного сечения проходческого оборудования. Данные обстоятельства влекут за собой уменьшение стоимости строительства, а поскольку тоннельные сооружения на высокоскоростных магистралях, как правило, значительно превышают по длине тоннели на обычных магистралях, то положительный технико-экономический эффект будет возрастать с увеличением длины тоннельного сооружения. Кроме того, понижается аэродинамическое сопротивление движению поезда, следовательно, новый вариант конструктивно-технологического решения открывает возможность получения улучшенных эксплуатационных показателей, что позволит уменьшить стоимость эксплуатации нового тоннеля (затраты на электроэнергию), обеспечив при этом требуемые провозную способность и скорости движения поездов.

Сооружение новых тоннелей для высокоскоростных железнодорожных магистралей щитовым способом позволит получить рациональное круговое очертание поперечного сечения, способного воспринимать аэродинамические воздействия, возникающие при скоростях движения поездов до 400 км/ч. Оптимальная площадь поперечного сечения тоннеля для высокоскоростной магистрали в зависимости от скорости прохождения поезда в таком случае будет зависеть в том числе от требуемых аэродинамических характеристик системы «тоннель-поезд».

Перспективой исследования является установление прочностных характеристик нового предлагаемого конструктивного решения однопутного тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали. В частности, прочностной расчет сечения, ослабленного за счет пространства, высвобождаемого под сквозные каналы -воздуховоды. Также перспективным является определение особенностей внутренней геометрии каналов и структура их поверхности: шероховатость и форма, в частности рассмотрение варианта спиралевидного сечения каналов, которое может способствовать более эффективному и интенсивному перетеканию воздушных потоков за счет повторения своей формой траектории движения данных потоков.

Заключение

Conclusion

Проектирование, строительство и эксплуатация однопутных тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях — технически и технологически сложная задача. Обеспечение безопасного уровня аэродинамического давления и разработка оптимальных объемно-планировочных и конструктивных решений в первую очередь зависит от правильно принятых методов прогнозирования и последующих расчетов аэродинамического состояния «тоннель-поезд» и является ответственной задачей.

Предложенный вариант объемно-планировочного, конструктивно-технологического решения для однопутных высокоскоростных железнодорожных тоннелей является обоснованно эффективным и соответствует современным требованиям. По совокупности результатов численного моделирования определены величины перепадов аэродинамического давления, характерные траектории воздушных потоков, дана оценка аэродинамического состояния системы «тоннель-поезд»: их анализ показал эффективность конструкции в решении задачи снижения аэродинамического давления в тоннеле. В ходе исследования установлена возможность улучшения условий эксплуатации однопутных тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях с точки зрения аэродинамических воздействий и минимизации конструктивных рисков.

Конструктивное решение тоннеля для высокоскоростной железнодорожной магистрали обладает потенциалом к уменьшению материалоемкости и улучшению технико-экономических характеристик сооружения и может быть применено при проектировании и строительстве для дальнейшей эффективной эксплуатации перспективных скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий: Ростов-Туапсе-Адлер,

Казань-Екатеринбург-Челябинск в современных условиях с учетом аэродинамических явлений. При этом область применения однопутных железнодорожных тоннелей не ограничивается направлениями горных местностей, а является универсальной: такие решения могут применяться при проектировании и строительстве подводных, городских, базисных железнодорожных тоннелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чурков, Н.А.** Аэродинамика железнодорожного поезда: (принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной среды на железнодорожный поезд) / Н.А. Чурков. — М.: Желдориздат, 2006. — 331 с.
2. **Mei, Y.** A Generalized Numerical Simulation Method for Pressure Waves Generated by High-Speed Trains Passing through Tunnels / Y. Mei. — DOI <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.8.1427> // Advances in Structural Engineering. — 2013. — Т 16. — № 8. — С. 1427–1436. — URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/1369-4332.16.8.1427> (дата обращения: 29.06.2022).
3. **Reinke, P.** Aerodynamics and ventilation in rail tunnels / P. Reinke, M. Flueckiger, T. Wicht // TunnelTalk. — 2015. — URL: <https://www.tunneltalk.com/TunnelTECH-May2015-Aerodynamics-and-ventilation-in-rail-tunnels-civil-measures.php> (дата обращения: 29.06.2022).
4. **Фролов, Ю.С.** Тоннели на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Ю.С. Фролов // Транспорт Российской Федерации. — 2010. — № 1. — С. 28–31. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15501795> (дата обращения: 29.06.2022).
5. **Sugimoto, N.** Shock-free Tunnel for Future High-Speed Trains / N. Sugimoto // Proceedings of the International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokohama, Japan November 22–26 / Йокогама: Japan Society of Mechanical Engineers, 1993. — С. 284–292. — URL: https://www.researchgate.net/publication/354089582_Shock-free_Tunnel_for_Future_High-Speed_Trains (дата обращения: 29.06.2022).
6. **Fukuda, T.** Propagation of compression wave in a long slab-tracked tunnel and ballast-tracked tunnel / T. Fukuda, T. Miyachi, M. Iida, S. Ozawa // Twelfth international symposium on aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, Portoroz, Slovenia, 2006 / Крэнфилд: BHR Group, 2006. — С. 777–788. — URL: https://www.researchgate.net/publication/290226423_Propagation_of_compression_wave_in_a_long_slab-tracked_tunnel_and_ballast-tracked_tunnel (дата обращения: 29.06.2022).
7. **Jiqiang, N.** Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research / N. Jiqiang, S. Yang, Y. QiuJun, C. Xiaoling, Y. Yanping. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.03.003> // Energy and Built Environment. — 2020. — Т 1. — № 4. — С. 351–375. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123320300179> (дата обращения: 29.06.2022).
8. **Du, J-M.** 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. — DOI <https://doi.org/10.3390/sym14030479> // Symmetry. — 2022. — Т 14. — № 3. — С. 479. — URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/3/479> (дата обращения: 29.06.2022).
9. **Jia, W.** Air flow and differential pressure characteristics in the vacuum tube transportation system based on pressure recycle ducts / W. Jia, K. Wang, A. Cheng, X. Kong, X. Cao, Q. Li. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.12.023> // Vacuum. — 2018. — Т 150. — С. 58–68. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0042207X17311867> (дата обращения: 29.06.2022).
10. **Космин, В.В.** Аэродинамика движения высокоскоростных поездов в тоннеле: некоторые результаты проведенных в мире исследований / В.В. Космин, В.Е. Меркин // Метро и тоннели. — 2021. — № 1. — С. 29–33. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44886727> (дата обращения: 29.06.2022).

11. **Дубинский, С.И.** Численное моделирование аэродинамики высокоскоростного и магнито-левитационного транспорта / С.И. Дубинский // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. — 2016. — № 4. — С. 34–44. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27472894> (дата обращения: 29.06.2022).
12. **Ким, К.К.** Разработка метода по уменьшению лобового аэродинамического сопротивления капсулы трубопроводного транспорта / К.К. Ким, И.Р. Крон, Я.С. Ватулин, Е.Я. Ватулина // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т 16. — № 2. — С. 263–267. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38978297> (дата обращения: 29.06.2022).
13. **Ледяев, А.П.** Математическое моделирование аэродинамических процессов в железнодорожных тоннелях на высокоскоростных магистралях / А.П. Ледяев, В.Н. Кавказский, О.О. Шелгунов // Метро и тоннели. — 2021. — № 4. — С. 40–43. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46566062> (дата обращения: 29.06.2022).
14. **Wang, X.Y.** Numerical analysis on aerodynamic behavior of high-speed trains in the tunnel and open air based on the virtual reality technology / X.Y. Wang. — DOI <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18430> // Journal of Vibroengineering. — 2018. — Т 20. — № 2. — С. 1144–1160. — URL: <https://www.extrica.com/article/18430> (дата обращения: 29.06.2022).
15. **Somaschini, C.** Full-Scale Experimental Investigation of the Interaction between Trains and Tunnels / C. Somaschini, T. Argenti, E. Brambilla, D. Rocchi, P. Schito, G. Tomasini. — DOI <https://doi.org/10.3390/app10207189> // Applied Sciences. — 2020. — Т 10. — № 20. — С. 7189. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/20/7189> (дата обращения: 29.06.2022).

Сведения об авторах:

Шелгунов Олег Олегович — аспирант кафедры «Тоннели и метрополитены», факультета «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ooshelgunov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7339-5563>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=971989

Кавказский Владимир Николаевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Тоннели и метрополитены», факультета «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Kavkazskiy_VN@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=333858

Статья получена: 07.07.2022. Принята к публикации: 14.09.2022. Опубликовано онлайн: 30.09.2022.

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в теоретических и практических вопросах численного моделирования аэродинамических процессов, ценные советы, замечания и научную поддержку к.т.н. Ватулину Я.С. и к.т.н. Свитину В.В.

REFERENCES

1. Churkov N.A. Aerodinamika zheleznodorozhnogo poyezda: (printsipy konstruirovaniya podvizhnogo sostava, minimiziruyushchiye vozdeystviya vozduшной среды na zheleznodorozhnyy poyezd) [Aerodynamics of a railway train: (principles for the design of rolling stock, minimizing the impact of the air environment on a railway train)]. Moscow: Zheldorizdat; 2006. (In Russ.).
2. Mei Y. A Generalized Numerical Simulation Method for Pressure Waves Generated by High-Speed Trains Passing through Tunnels. *Advances in Structural Engineering*. 2013; 16(8): 1427–1436. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.8.1427>.
3. Reinke P., Flueckiger M., Wicht T. Aerodynamics and ventilation in rail tunnels. *TunnelTalk*. 2015. Available at: <https://www.tunneltalk.com/TunnelTECH-May2015-Aerodynamics-and-ventilation-in-rail-tunnels-civil-measures.php> (accessed 29th June 2022). (In Eng.).
4. Frolov Yu.S. Tunnels at High-Speed Railroad Mains. *Transport of the Russian Federation. A magazine of science, economy and practice*. 2010; (1): 28–31. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15501795> (accessed 29th June 2022). (In Russ., abstract in Eng.).

5. Sugimoto N. Shock-free Tunnel for Future High-Speed Trains. In: *Proceedings of the International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokohama, Japan November 22–26*. Yokohama: Japan Society of Mechanical Engineers; 1993. p. 284–292. Available at: https://www.researchgate.net/publication/354089582_Shock-free_Tunnel_for_Future_High-Speed_Trains (accessed 29th June 2022). (In Eng.).
6. Fukuda T., Miyachi T., Iida M., Ozawa S. Propagation of compression wave in a long slab-tracked tunnel and ballast-tracked tunnel. In: *Twelfth international symposium on aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, Portoroz, Slovenia, 2006*. Cranfield: BHR Group; 2006. p. 777–788. Available at: https://www.researchgate.net/publication/290226423_Propagation_of_compression_wave_in_a_long_slab-tracked_tunnel_and_ballast-tracked_tunnel (accessed 29th June 2022). (In Eng.).
7. Jiqiang N., Yang S., QiuJun Y., Xiaoling C., Yanping Y. Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research. *Energy and Built Environment*. 2020; 1(4): 351–375. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.03.003>.
8. Du J-M., Fang Q., Wang G., Wang J., Li J-Y. Aerodynamic Effects Produced by a High-Speed Train Traveling through a Tunnel Considering Different Car Numbers. *Symmetry*. 2022; 14(3): 479. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14030479>.
9. Jia W., Wang K., Cheng A., Kong X., Cao X., Li Q. Air flow and differential pressure characteristics in the vacuum tube transportation system based on pressure recycle ducts. *Vacuum*. 2018; 150: 58–68. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.12.023>.
10. Cosmin V.V., Merkin V.E. Aerodynamics of high-speed trains in the tunnel: some results of the worldwide research. *Metro and tunnels*. 2021; (1): 29–33. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44886727> (accessed 29th June 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Dubinskiy S.I. Numerical Simulation of The High-Speed and Maglev Transport Aerodynamics. *Byulleten' Ob'yedinnennogo uchenogo soveta OAO RZhD [Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways]*. 2016; (4): 34–44. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27472894> (accessed 29th June 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
12. 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. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38978297> (accessed 29th June 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
13. Lediaev A.P., Kavkazskiy V.N., Shelgunov O.O. Mathematical Modeling of Aerodynamic Processes in Railway Tunnels on High-Speed Highways. *Metro and tunnels*. 2021; (4): 40–43. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46566062> (accessed 29th June 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Wang X.Y. Numerical analysis on aerodynamic behavior of high-speed trains in the tunnel and open air based on the virtual reality technology. *Journal of Vibroengineering*. 2018; 20(2): 1144–1160. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18430>.
15. Somaschini C., Argenti T., Brambilla E., Rocchi D., Schito P., Tomasini G. Full-Scale Experimental Investigation of the Interaction between Trains and Tunnels. *Applied Sciences*. 2020; 10(20): 7189. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app10207189>.

Information about the authors:

Oleg O. Shelgunov — Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: ooshelgunov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7339-5563>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=971989

Vladimir N. Kavkazskiy — Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Kavkazskiy_VN@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=333858

Submitted: 7th July 2022. Revised: 14th September 2022. Published online: 30th September 2022.

The author is deeply grateful for the help in theoretical and practical issues of aerodynamic processes numerical simulation, valuable advice, comments, and scientific support from Ph.D. Vatulin Ya.S. and Ph.D. Svitin V.V.