

УДК 621.336.7

## К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений

А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, А. С. Ватаев, Д. Д. Каримов, К. А. Сотников

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

**Для цитирования:** Воробьев А. А., Ватулин Я. С., Ватаев А. С., Каримов Д. Д., Сотников К. А. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 590–599. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-590-599

### Аннотация

**Цель:** Разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности и безопасности процесса грузовых и пассажирских перевозок на основе анализа процессов аэродинамического взаимодействия движущегося подвижного состава и искусственных сооружений тоннельного типа. Изучение воздействия воздушного потока на ЭПС и локомотивную бригаду с использованием программы Solid Works, модуль Flow Simulation. **Методы:** Исследование принципа формирования структуры воздушной среды в районе порталной части тоннельного сооружения стандартного типа и оборудованного средствами нивелирования колебания воздушного давления путем моделирования движения воздушных масс методом «заторможенного ротора». **Результаты:** Разработана конструкция порталной части тоннеля, и проведено численное исследование в среде Solid Works Flow Simulation. При входе и выходе из тоннеля можно несколько раз уменьшить скорость воздушного потока, воздействующего на ЭПС и тоннельные сооружения, а также стабилизировать давление воздушных масс и приблизить к нормальному атмосферное давление. **Практическая значимость:** Предлагаемая конструкция позволяет улучшить качество грузопассажирских перевозок, а именно снизить негативное давление и скорость воздушного потока, воздействующего на локомотивные бригады, пассажиров и тоннельные сооружения, а также уменьшить энергопотребления электроподвижного состава.

**Ключевые слова:** Аэродинамический эффект, искусственные сооружения тоннельного типа, лобовое воздушное сопротивление, конфузор, диффузор, метод конечных элементов, статическое давление, численное моделирование.

В настоящее время основные исследовательские усилия в области проектирования высокоскоростных транспортных средств направлены на преодоление аэродинамических эффектов,

влияющих на безопасность и показатели эксплуатационных энергозатрат.

Особенно значимо данные аэродинамические эффекты проявляются негативным образом

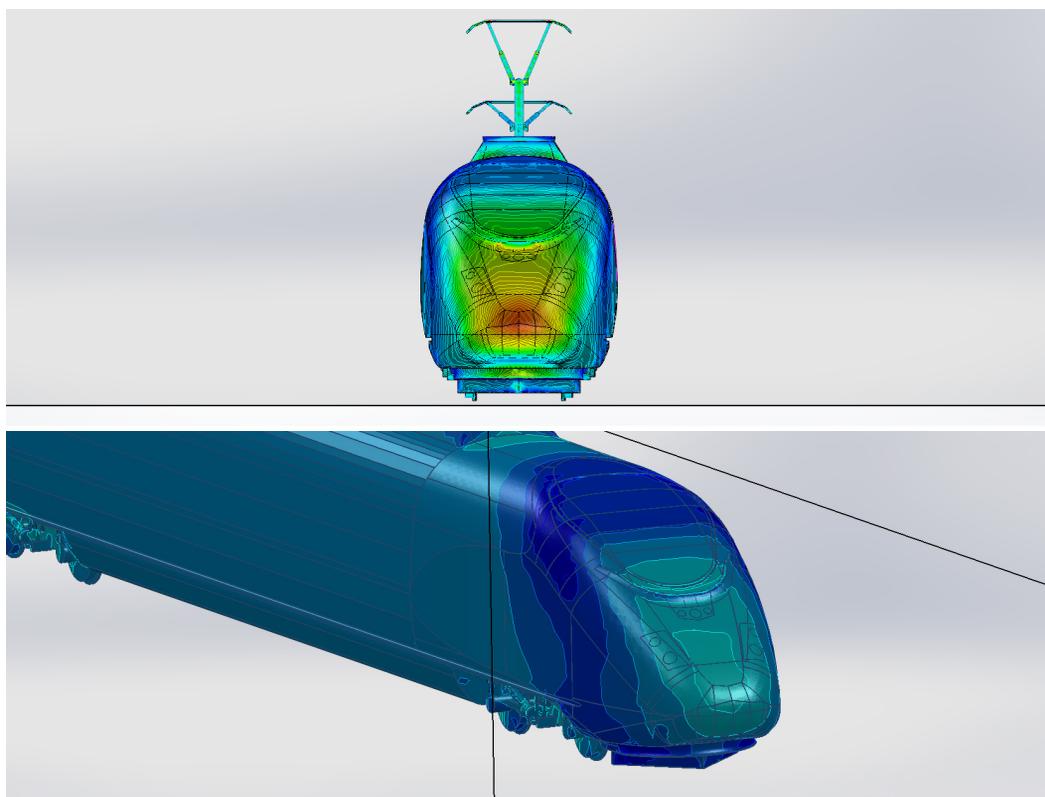


Рис. 1. Эпюры давления воздушной среды на поверхностях головной и хвостовой части модели состава объекта — профиль Siemens VelaroRUS «Сапсан»

при прохождении транспортным средством тоннельных сооружений, когда движущийся корпус подвижного состава образует с тоннелем последовательно расположенные области стесненного движения воздушных масс в виде диффузоров и конфузоров.

Максимальную амплитуду давления имеет знакопеременный импульс, образующийся в районе головного обтекателя поезда (рис. 1). Область разрежения, формирующаяся на хвостовом обтекателе состава, по амплитуде значительно меньше головного импульса, характеризуется высокой турбулентностью, с образованием струйно-отрывных течений воздушной среды.

Резкий перепад статического давления окружающей среды более чем на 1 мм рт. ст. за час вызывает ухудшение самочувствия человека, сонливость, снижение трудоспособности, вялость в конечностях. Крайне негативным для человека

считается перепад в 6,7 мм рт. ст. Увлечение движущимся поездом значительных объемов воздушных масс формируют также тоннельные волны и волны микродавления, образующиеся в результате сложных процессов под воздействием поршневого эффекта подвижного состава [1].

Существуют международные нормы [2–4], по которым максимальные перепады давления в тоннеле не должны превышать 10 кПа (так называемый критерий здоровья). Например, в Германии максимальный перепад давления не должен превышать 500 Па за 1 с, 800 Па за 3 с, 1000 Па за 10 с. Изменение давления определяется структурой воздушной среды, формирующейся в процессе аэроупругого взаимодействия высокоскоростного состава и сооружениями тоннеля.

Одним из способов исследования аэродинамических процессов является численное моделирование. Современные компьютерные программы,

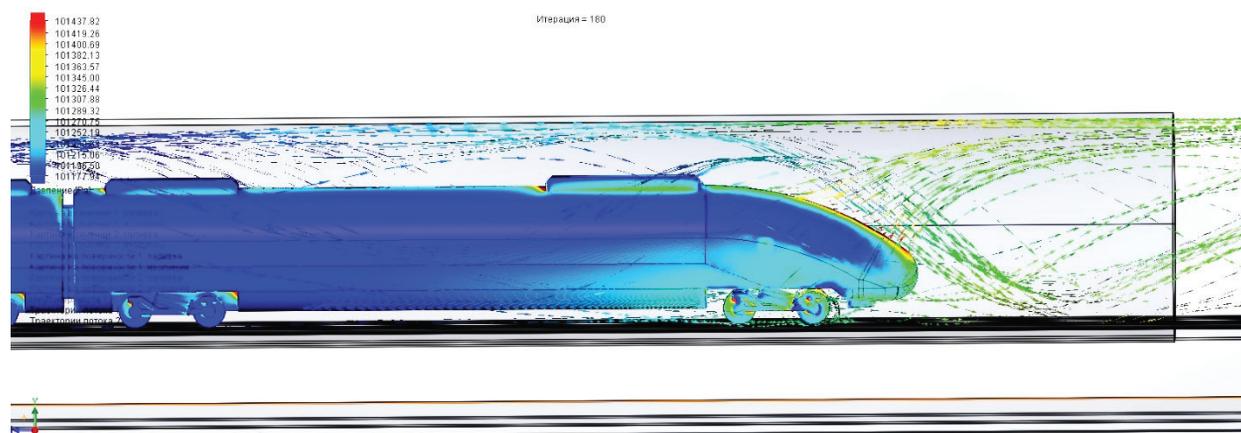


Рис. 2. Эпюра траекторий движения воздушных потоков с учетом поршневого действия поезда (при выходе)

использующие данный метод, позволяют решать широкий круг задач, связанных с взаимосвязанными стационарными и нестационарными тепловыми и аэродинамическими полями и процессами в тоннельных сооружениях при движении подвижного состава [5–9]. Данный способ оказывается более предпочтительным ввиду более низких затрат по сравнению с натурными экспериментами. Кроме того, численные эксперименты отличаются универсальностью, высоким быстродействием и возможностью выполнения исследований на стадии проектирования.

В качестве примера рассмотрим процесс выхода из тоннеля типовой конструкции [10, 11] ЭПС типа «Сапсан», движущегося со скоростью 200 км/ч (рис. 2), температура окружающей среды — 293 К, давление окружающей среды — 101 395 Па, число Рейнольдса —  $0,49e + 5$ .

Наибольший интерес представляет участок выхода из тоннеля: значение скорости текучей среды на этом участке практически постоянно и составляет 14–15 м/с, независимо от текущего местоположения поезда в тоннеле, что объясняется действием «поршневого» эффекта состава в ограниченном пространстве тоннеля [12].

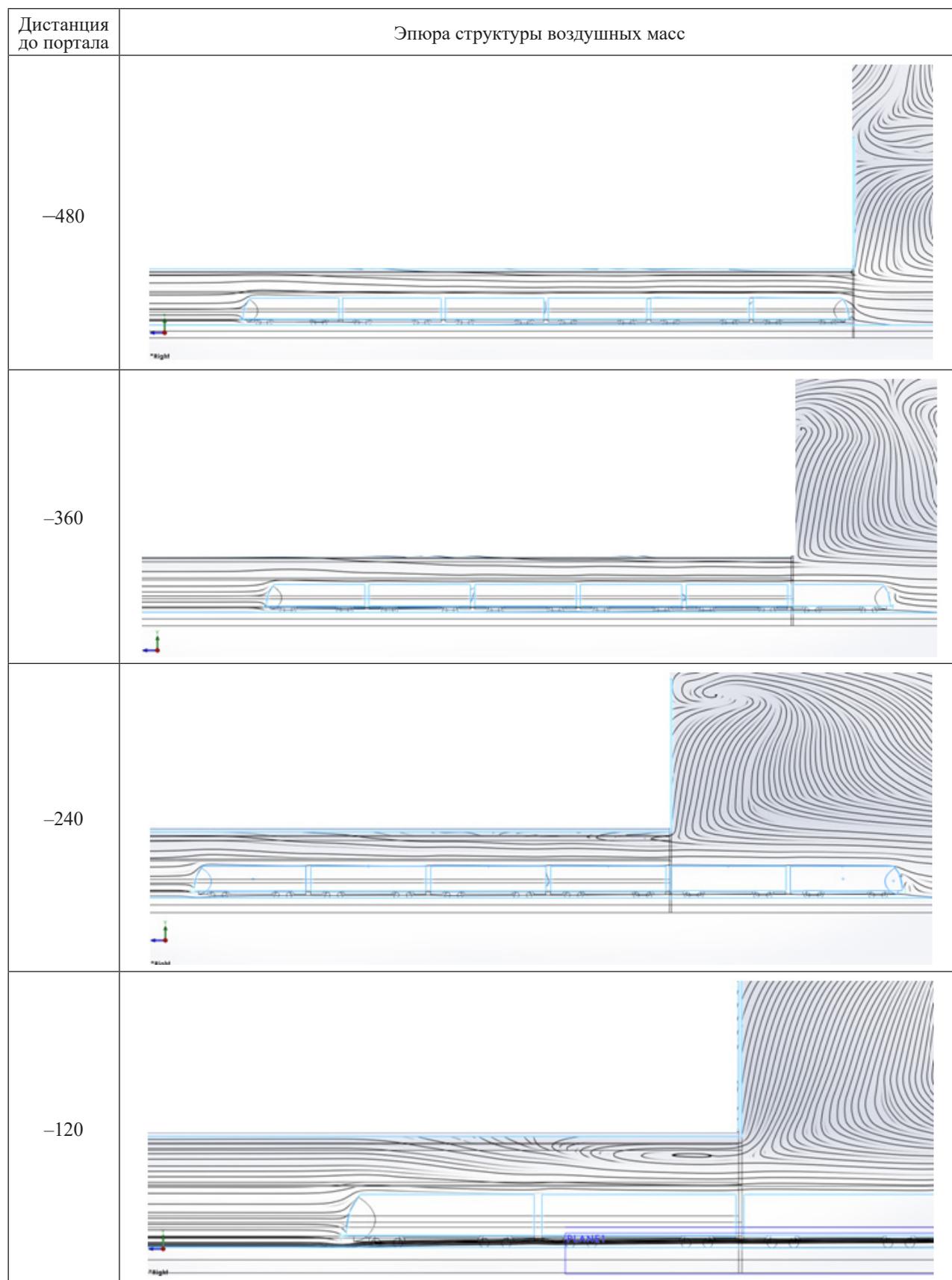
В среде модуля Flow Simulation программного продукта Solid Works проведен ряд исследова-

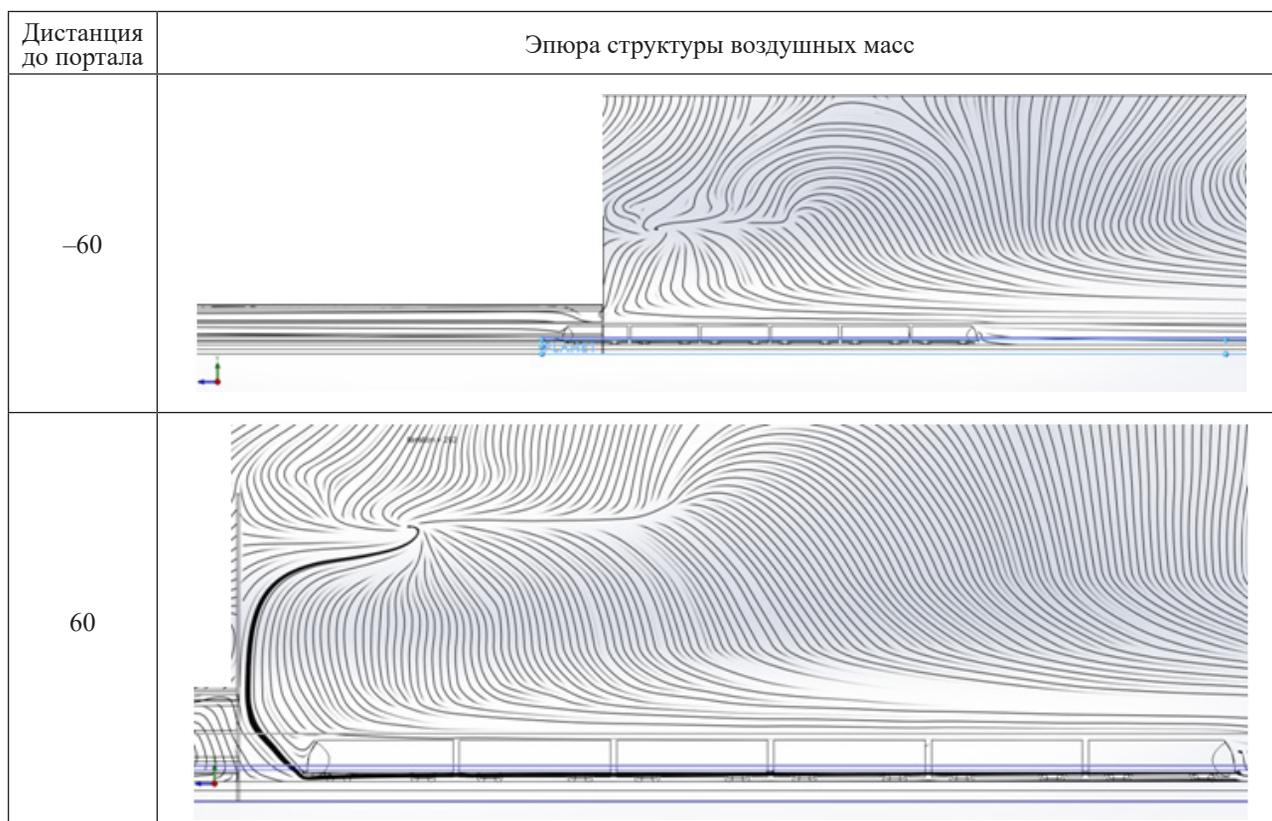
ний процесса входа и выхода из тоннеля высокоскоростного электропоезда. За прототип модели подвижного состава принят профиль Siemens VelaroRUS «Сапсан». На модели установлены граничные условия, имитирующие взаимодействие газа с движущимися поверхностями поезда и неподвижными стенками тоннеля. В качестве технологического подхода применен метод «заторможенного ротора» [13, 14], при котором рассматривается возмущенная структура окружающей текучей среды в состоянии «стопкадра» процесса движения состава по замкнутому кольцевому маршруту. С целью получения достаточной точности решения рассматривается модель тоннеля и подвижного состава в реальном масштабе, замеры определяются на уровне контактного провода.

Значительные изменения структуры текучей среды происходят на дистанции 240–120 м до порталной части тоннеля (таблица), что связано с явлением затекания (засасывания) объемов внешних воздушных масс в зону низкого давления полости тоннеля непосредственно за хвостовым вагоном состава.

При входе подвижного состава в тоннель наблюдается формирование поршневого эффекта, которое сопровождается появлением потоков

Эпюра структуры воздушных масс в зоне портала





воздуха, направленных навстречу подвижному составу, а также формирование локальных зон сжатия и расширения воздуха вблизи портальной части и потолка тоннеля в области тоннеля, занятой подвижным составом. При выходе из тоннеля со стороны хвостовой части подвижного состава образуется область разрежения и начинается интенсивное всасывание воздушных масс в портальной части тоннеля. Указанные явления имеют зависимость от скорости подвижного состава, коэффициента блокирования, соотношения длины части поезда, находящейся в тоннеле, к общей длине поезда. Данные процессы формируют вихреобразование воздушных масс, которое создает сопротивление тяговой силе подвижного состава.

С целью решения проблемы снижения негативного эффекта от вихреобразования воздушных масс и стабилизации давления при выходе ЭПС из тоннеля была разработана конструкция

портальной части, позволяющая сгладить пульсации давления (рис. 4). Увеличивая коэффициент блокировки, можно избежать возникновения вихреобразующих воздушных масс, облегчить всасывание воздуха в тоннеле, стабилизировать давление воздуха на выходе тоннеля, снизить скорость и температуру воздуха, а также уменьшить энергозатраты ЭПС.

С целью повышения эффективности процесса обработки результатов исследования была разработана схема формализации представления кривой колебания давления в районе головного и хвостового обтекателя ЭПС (рис. 5) [15, 16].

По результатам численного исследования (рис. 6, а) установлено, что для тоннельных сооружений, не оборудованных специальными конструктивными средствами для выравнивания колебаний давления воздушной среды, при скорости подвижного состава 200 км/ч, скорость сжатого воздуха достигает 18 м/с, а амплитуда

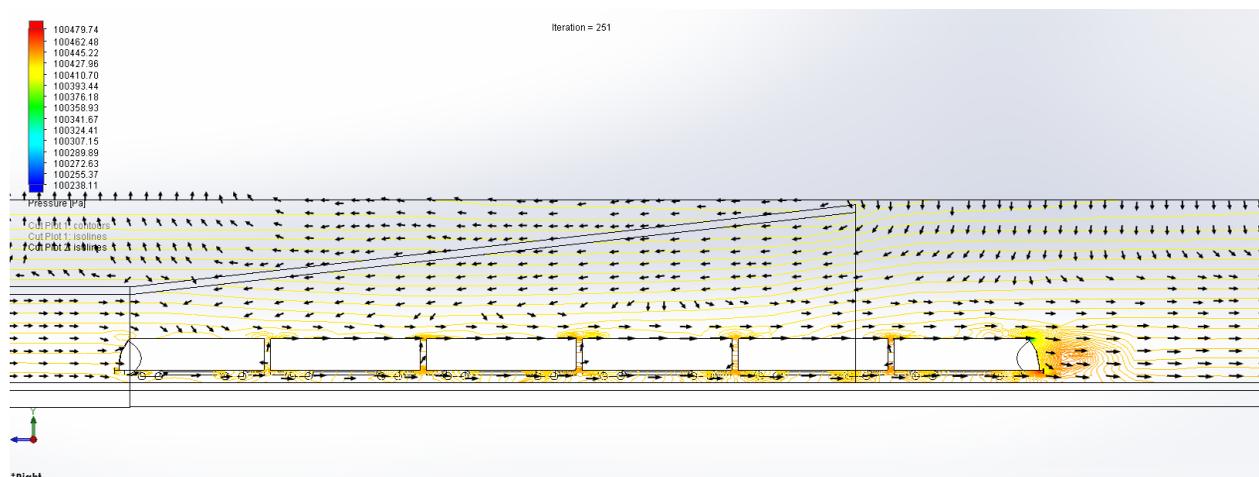


Рис. 4. Модель движения воздушных масс в процессе выхода электропоезда из тоннеля, оборудованного устройством стабилизации динамических характеристик движущихся воздушных масс

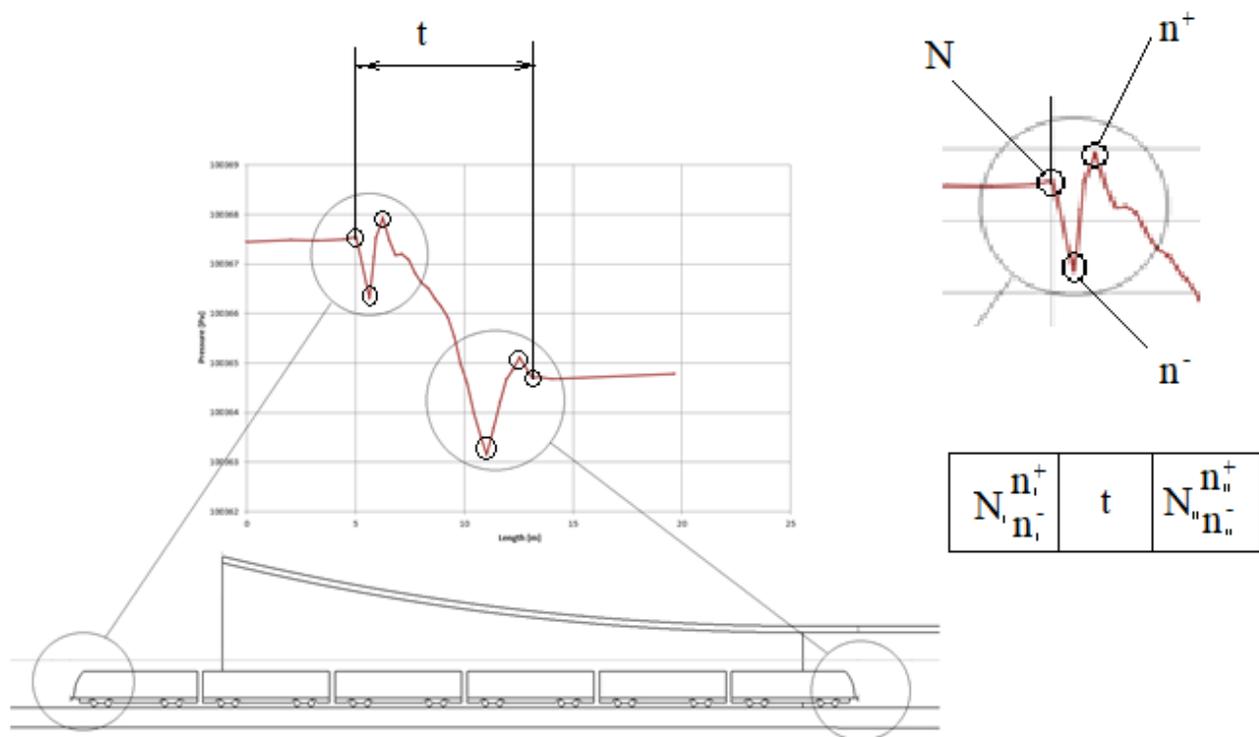


Рис. 5. Схема формализованного представления кривой колебания давления в области обтекателя головного и хвостового вагона ЭПС, при входе и выходе тоннеля

гармоники давления составляет 225 Па за период до 3 секунд.

Перепад давления при этом составляет более 2275 Па (относительно нормального

атмосферного), что превышает существующие международные нормы и негативно влияет на самочувствие локомотивной бригады и пассажиров.

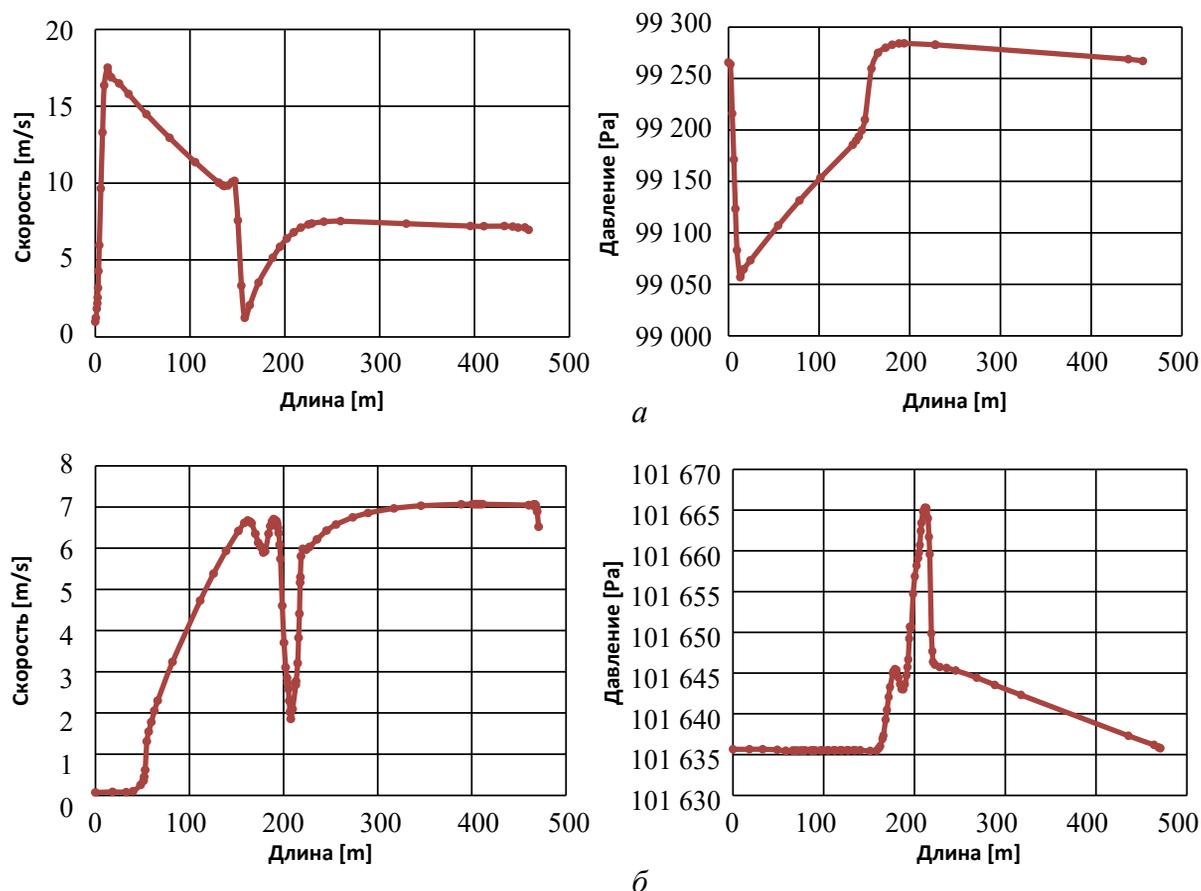


Рис. 6. Динамические характеристики движения воздушных масс в зоне порталного сооружения тоннеля:

*а* — не оборудованного специальными конструктивными средствами выравнивания колебаний давления воздушной среды; *б* — с использованием средств выравнивания колебаний давления

Использование средств выравнивания колебаний давления воздушной среды (рис. 6, *б*) позволяет примерно в 2 раза снизить амплитуду колебания скоростных характеристик воздушной среды в пространстве «ЭПС — тоннель», а также стабилизировать давление, приблизив его к атмосферному с показателями 30 Па за 2 секунды, что в 5 раз ниже показателя, полученного для тоннельных сооружений, не оборудованных специальными конструктивными средствами.

**Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».**

### Библиографический список

1. Алферова Е. Л. Моделирование возмущений воздушного потока при движении поездов в двухпутном тоннеле метрополитена / Е. Л. Алферова, И. В. Лугин, Л. А. Кияница // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 6. — С. 5–14.
2. 779-11R. Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations.
3. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные.
4. Нормативные документы. Специальные технические условия. Свод правил. Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий.
5. Джаббаров С. Т. Движение тонкого осесимметрического тела в полупространстве, занятом занятом сжи-

маемым газом / С. Т. Джаббаров // Проблемы механики. — 2016. — Вып. 1. — С. 12–17.

6. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 464 с.

7. CFD simulation of train aerodynamics: traininduced wind conditions at an underground railroad passenger platform / A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen, J. Straathof // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2015. — Vol. 139. — Pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.01.19.

8. Кравец В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 2 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Залізн. трансп. України. 9. Трудоношин В. А. Введение в метод конечных элементов / В. А. Трудоношин, М. Ю. Уваров. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 9 с.

10. Проектная документация. Строительство нового Байкальского тоннеля на перегоне Дельбичинда — Дабан Восточно-Сибирской железной дороги. Раздел 3. Технологические и конструктивные решения линейного объекта. Искусственные сооружения. ОАО «СтройТрест». — 2014.

11. Бамтоннельпроект. Объекты. — URL: <http://www.btpnsk.ru/objects>.

12. Лазаренко Ю. М. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин // Вестн. ВНИИЖТа. — 2012. — № 4. — С. 11–14.

13. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, мето-

ды, рекомендации / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 562 с.

14. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 464 с.

15. Бараз В. Р. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учеб. пособие / В. Р. Бараз, В. Ф. Пегашкин; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУим. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). — 2-е изд., перераб. и доп. — Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014 — 181 с.

16. Бурнаева Э. Г. Статистический пакет анализа данных в Excel 2013: учебное пособие / Э. Г. Бурнаева, С. Н. Леора. — СПб.: СПбГУ, 2020. — 40 с.

Дата поступления: 27.05.2022

Решение о публикации: 01.08.2022

#### **Контактная информация:**

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доц.; yan-roos@yandex.ru

ВАТАЕВ Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; avataev@yandex.ru

КАРИМОВ Дастонбек Давронбой угли — аспирант; dostonkarimov325@gmail.com

СОТНИКОВ Кирилл Андреевич — аспирант; k-sotnikov@yandex.ru

## On the Issue of Negative Effect Reduction of Aeroelastic Interaction Between High-Speed Rolling Stock and Tunnel Structure Elements

A. A. Vorob'ev, Ya. S. Vatulin, A. S. Vatayev, D. D. Karimov, K. A. Sotnikov

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

**For citation:** Vorob'ev A. A., Vatulin Y. S., Vatayev A. S., Karimov D. D., Sotnikov K. A. On the Issue of Negative Effect Reduction of Aeroelastic Interaction Between High-Speed Rolling Stock and Tunnel Structure Elements // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 590–599. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-590-599

### Summary

**Purpose:** The development of recommendations on the improvement of energy efficiency and safety of freight and passenger transportation process on the basis of the analysis of aerodynamic interaction processes between moving rolling stock and tunnel-type artificial structures. To study the effect of air flow on electric rolling stock (ERS) and locomotive crew using SolidWorks program, Flow Simulation module. **Methods:** Investigation of the principle of formation of air environment structure in the portal part area of standard type tunnel structure that's equipped with means for leveling air pressure fluctuations by air mass movement modeling by “braked rotor” method. **Results:** The design of tunnel portal part was developed and numerical study in the SolidWorks Flow Simulation environment was carried out. At tunnel entrance and exit, it is possible to reduce several times air flow velocity, affecting ERS and tunnel structures, as well as to stabilize air mass pressure and to bring atmospheric pressure closer to normal one. **Practical significance:** The proposed design allows to improve cargo and passenger transportation quality and namely to reduce negative pressure and velocity of air flow, affecting locomotive crews, passengers and tunnel structures as well as to lower electric rolling stock power consumption.

**Keywords:** Aerodynamic effect, artificial tunnel-type structures, frontal air drag, confuser, diffuser, finite element method, static pressure, numerical simulation.

### References

1. Alferova E. L., Lugin I. V., Kiyanitsa L. A. *Moderivanie vozmushcheniy vozdushnogo potoka pri dvizhenii poezdov v dvukhputnom tonnele metropolitena* [Modeling of airflow disturbances during train movement in a double-track subway tunnel]. (In Russian)
2. 779-11R. Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations.
3. *Normativnye dokumenty. SP 122.13330.2012 «Tonneli zheleznodorozhnye i avtodorozhnye»* [Regulatory documents. SP 122.13330.2012 “Railway and road tunnels”]. (In Russian)
4. *Normativnye dokumenty. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya Svod pravil «Sooruzheniya iskusstvennye vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh liniy»* [Regulatory documents. Special technical conditions Code of rules “Artificial structures of high-speed railway lines”]. (In Russian)
5. Dzhabbarov S. T. Dvizhenie tonkogo osesimmetricheskogo tela v poluprostranstve, zanyatom zanyatom szhimaemym gazom [Movement of a thin axisymmetric body in a half-space occupied by a compressible gas]. *Problemy mekhaniki* [Problems of Mechanics]. 2016, I. 1, pp. 12–17. (In Russian)
6. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v Solid-WorksSimulation* [Engineering calculations in Solid-WorksSimulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 464 p. (In Russian)

7. Khayrullina A., Blocken B., Janssen W., Straathof J. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015, vol. 139, pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.01.19.
8. Kravets V. V. *Aerodinamika vysokoskorostnykh poezdov* [Introduction to the finite element method]. 2005, I. 3, pp. 16–20. (In Russian)
9. Trudonoshin V. A., Uvarov M. Yu. *Vvedenie v metod konechnykh elementov* [Aerodynamic impact of the Sapsan high-speed electric train on passengers on platforms and on oncoming trains during crossing]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana Publ. 9 p. (In Russian)
10. *Proektnaya dokumentatsiya. Stroitel'stvo novogo Baykal'skogo tonnylya na peregone Del'bichinda – Daban Vostochno-Sibirskoy zheleznoy dorogi. Razdel 3. Tekhnologicheskie i konstruktivnye resheniya lineynogo ob'ekta. Iskusstvennye sooruzheniya. OAO «StroyTrest»* [Project documentation. Construction of a new Baikal tunnel on the Delbichinda-Daban section of the East Siberian Railway. Section 3. Technological and design solutions for a linear facility. Artificial constructions. OAO “StroyTrest”]. 2014. (In Russian)
11. *Bamtonnel'proekt. Ob'ekty* [Bamtunnel project. Objects]. Available at: <http://www.btpnsk.ru/objects>. (In Russian)
12. Lazarenko, Yu. M. Aerodinamicheskoe vozdeystvie vysokoskorostnogo elektropoezda «Sapsan» na passazhirov na platformakh i na vstrechnye poezda pri skreshchenii [Project documentation. Construction of a new Baikal tunnel on the Delbichinda-Daban section of the East Siberian Railway. Section 3. Technological and design solutions for a linear facility]. *Vestn. VNIIZhTa* [Artificial constructions. OAO “StroyTrest”]. 2012, I. 4, pp. 11–14. (In Russian)
13. Alyamovskiy A. A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations]. Moscow: DMK Press Publ., 2015. 562 p. (In Russian)
14. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorksSimulation* [Engineering calculations in SolidWorksSimulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2019. 464 p. (In Russian)
15. Baraz V. R. *Ispol'zovanie MS Excel dlya analiza statisticheskikh dannykh* [Statistical Data Analysis Package in Excel]. *M-vo obrazovaniya i nauki RF; FGAOU VPO «UrFUim. pervogo Prezidenta Rossii B.N.El'tsina», Nizhnetagil. tekhn. in-t (filial)* [Ministry of Education and Science of the Russian Federation; FGAOU VPO “UrFUim. the first President of Russia B.N. Yeltsin, Nizhny Tagil. tech. in-t (branch)]. Nizhny Tagil: NTI (filial) UrFU Publ., 2014. 181 p. (In Russian)
16. Burnaeva E. G., Leora S. N. *Statisticheskii paket analiza dannykh v Excel 2013* [Statistical Data Analysis Package in Excel 2013]. St. Petersburg: SPbGU Publ., 2020. 40 p. (In Russian)

Received: May 27, 2022

Accepted: August 01, 2022

**Author's information:**

Aleksandr A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Yan S. VATULIN — PhD in Engineering, Associate Professor; yan-roos@yandex.ru

Andrey S. VATAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; avataev@yandex.ru

Dostonbek D. KRIMOV — Postgraduate Student; dostonkarimov325@gmail.com

Kirill A. SOTNIKOV — Postgraduate Student; k-sotnikov@yandex.ru