

УДК 629.3.015

Использование численного моделирования при анализе аэроупругого взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями

Н. В. Богданов, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев, К. А. Сотников

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

Для цитирования: Богданов Н. В., Ватулин Я. С., Воробьев А. А., Сотников К. А. Использование численного моделирования при анализе аэроупругого взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — Вып. 1. — С. 65–73. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73

Аннотация

Цель работы: исследование формирования сложной воздушной структуры в условиях движения подвижного состава по протяженным подземным сооружениям с использованием методов численного моделирования. **Методы:** проведен анализ влияния аэродинамических факторов на подвижной состав, пассажиров и железнодорожную инфраструктуру на основе метода конечных элементов и объемов. Исследованы причины возникновения уплотненной воздушной зоны, которая возникает перед головным вагоном состава и оказывает значительное сопротивление движению поезда с использованием метода Frozen Rotor. Проанализированы показатели энергоэффективности и безопасности процесса грузовых и пассажирских перевозок с учетом процессов аэродинамического взаимодействия движущегося подвижного состава и искусственных сооружений тоннельного типа. **Результаты:** с помощью численного моделирования и использования метода Frozen Rotor удалось получить качественную картину распределения поперечных вихревых потоков воздуха, возникающих вследствие возникновения вязкостного трения. Обнаружены закономерности в изменении динамики давления и скорости воздушных масс на поверхности головного обтекателя при въезде поезда в тоннель. Установлен факт негативного влияния зон повышенного и пониженного давления, а также их резкого перепада на локомотивную бригаду и пассажиров. **Практическая значимость:** показана возможность проведения исследований в области аэродинамики железнодорожного транспорта с использованием современных методов численного моделирования. Данная тематика очень актуальна в области проектирования высокоскоростного подвижного состава.

Ключевые слова: аэроупругое взаимодействие, искусственные сооружения тоннельного типа, энергоэффективность, численное моделирование, поперечные вихри, «поршневой» эффект.

Введение

В последнее время актуальным направлением в области разработки высокоскоростного подвижного состава стало преодоление аэродинамических эффектов, которые влияют на безопасность и эксплуатационные характеристики железнодорожного транспорта. Основной задачей является быстрое прохождение тоннельных сооружений. Даже на действующем подвижном составе приходится значительно снижать скорость при прохождении тоннелей. А это пря-

мым образом сказывается на пропускной способности магистралей. Проблема заключается в образовании сложной вихревой структуры воздушной массы в пространстве между корпусом поезда и обделкой тоннеля, а также в возникновении перепадов давления в области головного и хвостового вагонов состава.

Но без тоннельных сооружений в современном мире не обойтись. Быстрая доставка грузов из одной точки страны в другую — это залог надежного функционирования экономики Российской Федерации. Тоннели позволяют повысить надежность и удобство эксплуатации железной дороги. Данные сооружения повсеместно используются во всем мире [1–3].

Характеристики воздушной массы вокруг корпуса подвижного состава при его движении по тоннелю существенно отличаются от таковых при движении по открытому пространству. Из-за вязкостных свойств возникают поперечные вихри, которые блокируют свободное течение воздушных масс, приводя к возникновению уплотненной зоны перед поездом. Это, в свою очередь, повышает сопротивление движению состава, снижая эффективность его использования. Помимо всего прочего, образующиеся вихри провоцируют образование твердых частиц, взвешенных в воздухе, которые могут привести к повреждению как подвижного состава, так и элементов тоннельного сооружения [4].

Также важно учитывать взаимодействие между подвижным составом и окружающей средой, так как это может влиять на энергетический баланс. Например, при высоких скоростях движения могут возникать вихри и турбулентность, которые, в свою очередь, могут усилить потери энергии. Также известно, что форма корпуса и текстура его поверхности могут влиять на характер распределения полей давления на поверхности подвижного состава [5, 6].

Надежность функционирования порталных сооружений тоннелей является крайне важной для обеспечения безопасности движения подвижного состава. Одним из основных факторов, влияющих на аэроупругое взаимодействие между поездом и тоннелем, является скоростной напор воздушных потоков, которые вызываются движением тела поезда. Важным параметром для каждого конкретного тоннельного сооружения является коэффициент блокирования, который зависит от площади сечения и длины тоннеля.

Однако, помимо скорости инерционного наддува и коэффициента блокирования, также имеют значение и другие факторы, такие как удельное сопротивление воздушной среды, длина поезда, шероховатость стенок тоннеля и поезда, установившаяся скорость воздуха в тоннеле, а также наличие и расположение вентиляционных шахт. Все эти параметры вместе определяют характер аэроупругого взаимодействия и могут оказывать существенное влияние на безопасность движения в тоннеле.

Математическое моделирование процессов аэроупругого взаимодействия с использованием численного моделирования в комбинации с методом *Frozen Rotor*

Для решения задач, связанных с аэроупругим взаимодействием подвижного состава с тоннельными сооружениями, часто применяется математическое моделирование, основанное на методах конечных элементов и конечных объемов [7, 8].

Наиболее популярным и удобным методом, который используется при решении гидравлических задач, является метод *Frozen Rotor*. Метод изначально разрабатывался и предназначался для решения гидравлических задач, связанных с работой центробежных насосов, где в конструкции применяются такие элементы, как статор (неподвижная часть) и ротор (подвижная часть). Поэтому для решения задач, связанных с движением поезда в тоннеле, данный метод необходимо адаптировать. В роли статора принимается тоннель, а в роли ротора — поезд. Радиус окружности принимается очень большим (более 1000 км). При таких условиях в отдельно взятом отрезке времени поезд будет двигаться не по окружности, а по прямой, что будет соответствовать реальному движению. При самом моделировании поезд остается неподвижным на протяжении всего процесса. Основные силы и импульсы при таком подходе прикладываются к окружающему поезд воздушному потоку. Таким образом, удастся получить качественную картину распределения воздушных потоков вдоль всего состава [9–12].

Исследование проводилось в программном комплексе *SolidWorks* с использованием модуля *Flow Simulation*. Была разработана модель станции петербургского метрополитена «Обводный канал». В качестве подвижного состава был выбран электропоезд 81-717/714. Для повышения производительности расчетов в моделях были приняты некоторые допущения, которые не оказывают существенного влияния на результаты исследований.

Размер ячеек принят равным 0,5 м со сгущением до размера 0,25 м ближе к поверхностям объектов с использованием методов построения ориентированной сетки. Использована k - ϵ модель турбулентности.

В качестве граничных условий на торцевых сечениях тоннелей и эскалаторного наклонного хода применены следующие параметры среды: давление — 101395 Па, температура — 20 °С, начальная скорость воздушной среды — 0 м/с, кинематическая вязкость, ν , — $1,5 \cdot 10^{-5}$ (м²/с), динамическая вязкость, η , — 18,1 (мПа·с). Режим движения: торможение состава — от 80 до 0 км/ч.

Результаты исследования представлены на рис. 1–3.

На первой эпюре отчетливо видно образование вихревых структур повышенной плотности перед головным вагоном состава, а также в подвагонном и

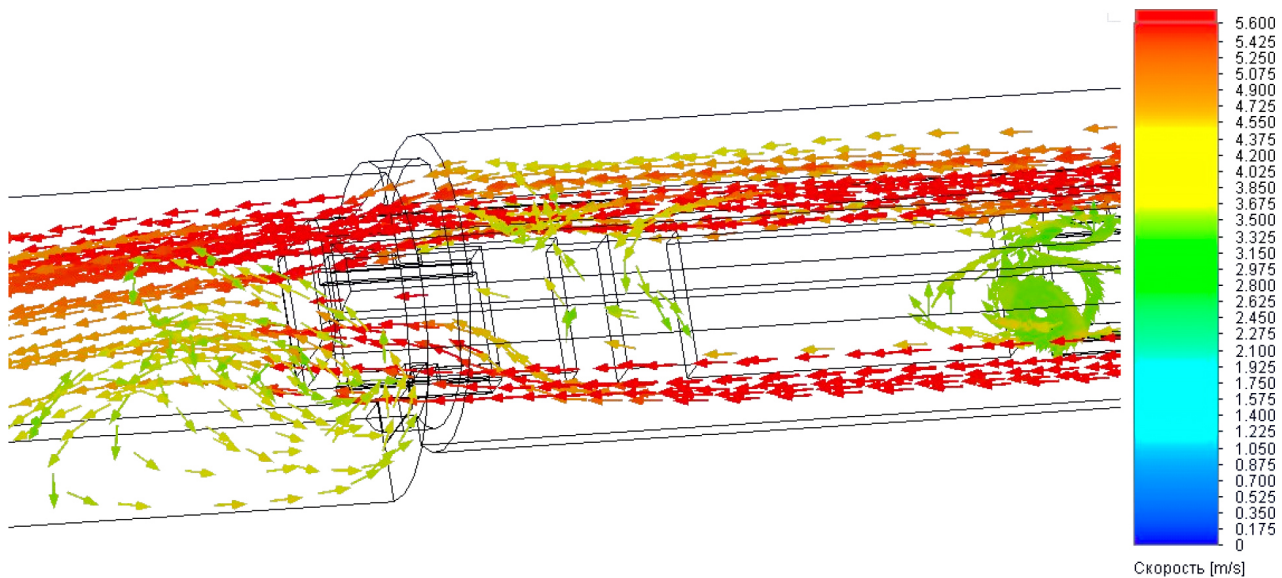


Рис. 1. Эпюра траектории движения воздушных масс в процессе образования «поршневого» эффекта

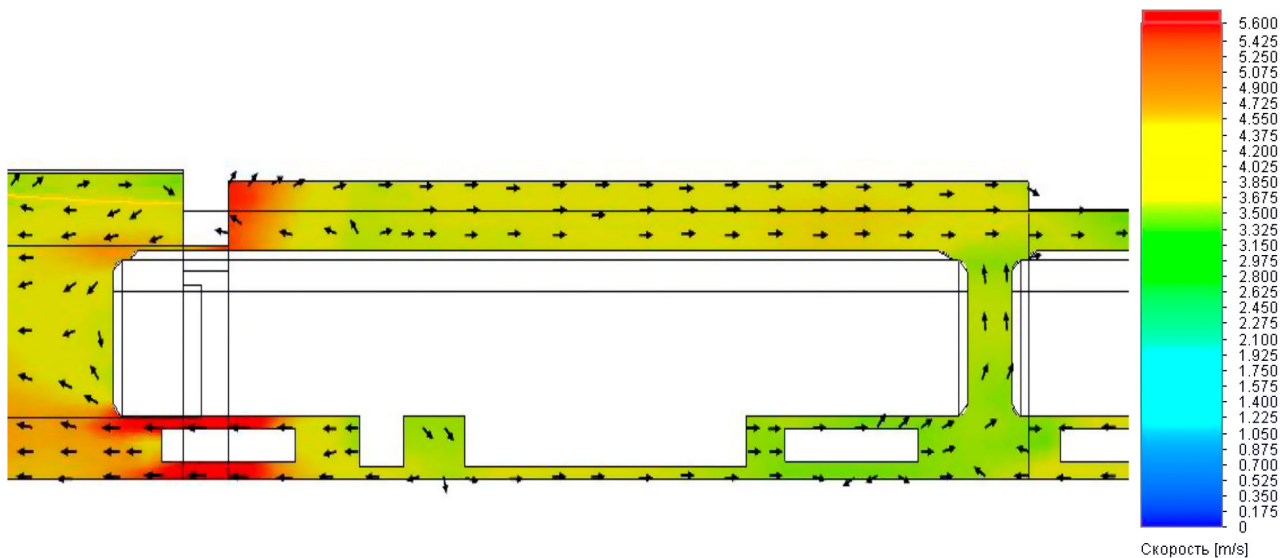
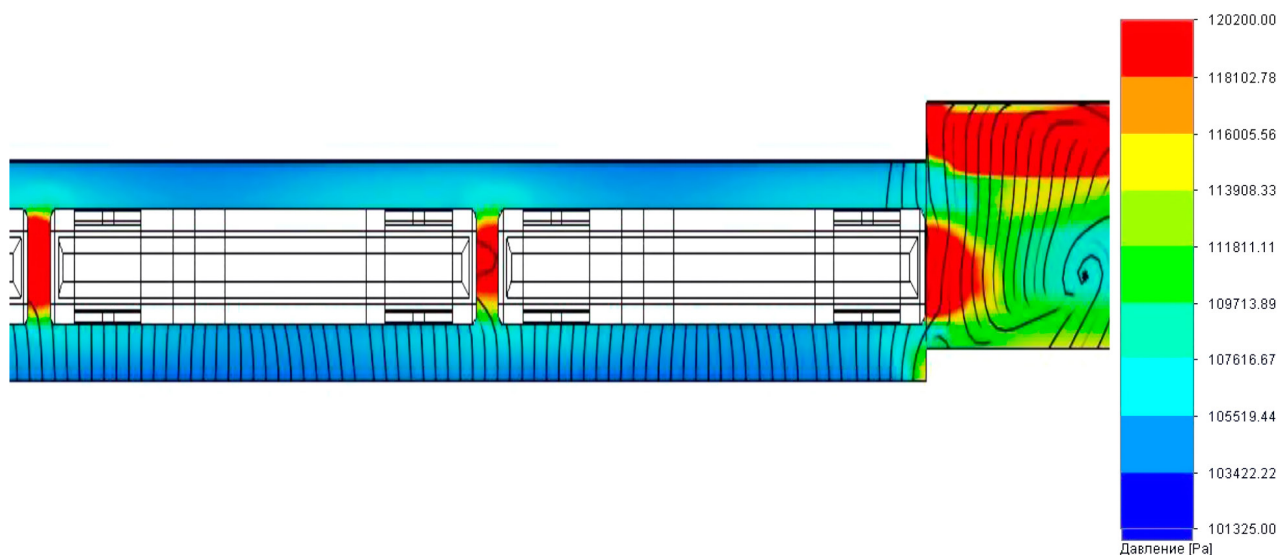


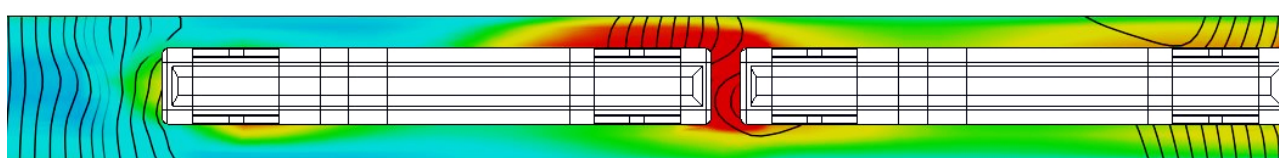
Рис. 2. Эпюра распределения скорости воздушных масс вдоль поезда (продольное сечение)

межвагонном пространствах. Это, в свою очередь, подтверждает наличие сложной воздушной структуры, которая формируется и накапливается при движении поезда в тоннеле. Образование плотных воздушных масс, которые складываются из одиночных спиралевидных вихрей, называется «поршневым» эффектом. Именно это явление вызывает основное сопротивление движению поезда и представляет наибольший интерес при изучении.

Вместе с образованием вихрей наблюдается ускоренное течение воздушных масс в пространстве между поездом и обделкой тоннеля. На рис. 1 и 2 отчетливо видна повышенная скорость в области порталной части тоннеля при прохождении поезда.



а) головная часть состава



б) хвостовая часть состава

Рис. 3. Эпюра распределения давления по длине поезда (продольное сечение)

На рис. 3 наблюдается динамическое распределение избыточного давления текучей среды в объеме тоннеля. Перед движущимся поездом образуется область повышенного давления, причем его резкий перепад наблюдается в головной части (рис. 3, а). Далее давление практически линейно снижается по направлению к хвосту состава. Вблизи него снова возникает скачок и область разрежения, давление в которой также изменяется по направлению к выходу из тоннеля (рис. 3, б).

Заключение

По результатам численного моделирования обнаружены закономерности в динамике формирования сложной структуры воздушных масс. На эпюрах (рис. 1–3) видно, что избыточное давление, а также скорость воздушных масс может изменяться в пределах одного поезда в разные моменты времени. При этом важно отметить, что головной обтекатель сталкивается с неподвижным воздухом, в то время как хвост поезда — с воздухом в движении. Это приводит к возникновению ускоренных вязких сил между обтекателем и тоннелем. Эти факторы необходимо учитывать при проектировании тоннелей под высокоскоростной подвижной состав.

Формирование турбулентных явлений в стесненных условиях движения поезда оказывает значительное влияние не только на эффективность использования подвижного состава, но и на человека. Перепады давления могут вызвать у человека сонливость или ухудшение самочувствия. Поэтому исследование аэродинамических факторов играет важную роль при проектировании высокоскоростного подвижного состава.

В целом такие исследования помогают улучшить конструкцию транспортных средств и снизить затраты на топливо. В конечном счете это способствует экономическому росту и уменьшению вредного влияния на окружающую среду. Поэтому детальные исследования в области аэродинамики транспорта являются важным шагом на пути к созданию более эффективных и экологически безопасных транспортных средств.

Библиографический список

1. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта: технический регламент Таможенного союза от 15.07.11 с изм. на 09.12.11 (ТР ТС 002/2011) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293437> (дата обращения: 01.01.2024).

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

3. Paradot N., Talcotte C., Willaime A., et al. Methodology for computing the flow around a high speed train for drag estimation and validation using wind tunnel experiments. World Congress on Rail Research, Tokyo. 1999.

4. Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Воробьев А. А. и др. Цифровое моделирование аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 1. С. 104–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123.

5. Воробьев А. А., Ватулин Я. С., Ватаев А. С. и др. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб., 2022. № 3. С. 590–599.

6. Каримов Д. Д., Ватулин Я. С., Воробьев А. А. и др. Особенности формирования структуры воздушных масс в тоннеле при движении поезда // Транспорт БРИКС. 2023. № 2 (2). С. 1–6. DOI: 10.46684/2023.2.6

7. Богданов Н. В., Ватаев А. С., Ватулин Я. С. и др. Обзор методов CFD-моделирования аэродинамических процессов при движении подвижного состава по протяженным подземным сооружениям // Системы автоматизированного проектирования на транспорте. 2023. Ст. 28–34. DOI: 56575829.

8. Каримов Д. Д., Ватаев А. С., Метлякова и др. Использование численного моделирования при анализе аэродинамических проблем на транспорте // Транспорт БРИКС. 2023. № 2 (3). С. 1–5. DOI: 10.46684/2023.3.5/.

9. Каримов Д. Д., Воробьев А. А., Ватаев А. С. и др. Исследование поперечной устойчивости высокоскоростного подвижного состава при выходе из тоннеля // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. Вып. 2. С. 115–135.

10. Лугин И. В., Алферова Е. Л. Исследование аэродинамических процессов при движении поезда в протяженных железнодорожных тоннелях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2018. Т. 5. С. 155–160.

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

12. Ледяев А. П., Кавказский В. Н., Креер Р. О. Особенности проектирования тоннелей на высокоскоростных магистралях // Транспорт Урала. 2015. № 4 (47). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-3-9.

Дата поступления: 27.01.2024

Решение о публикации: 01.03.2024

Контактная информация:

БОГДАНОВ Никита Вадимович — аспирант, nttk@pgups.ru

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

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — докт. техн. наук, доцент, nttk@pgups.ru

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

Use of numerical modeling in analysis of aeroelastic interaction of rolling stock with tunnel constructions

N. V. Bogdanov, Ya. S. Vatulin, A. A. Vorob'ev, K. A. Sotnikov

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

For citation: *Bogdanov N. V., Vatulin Ya. S., Vorob'ev A. A., Sotnikov K. A.* Use of numerical modeling in analysis of aeroelastic interaction of rolling stock with tunnel constructions // Bulletin of scientific research results, 2024, iss. 1, pp. 65–73. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73

Abstract

Purpose of the work: study of the formation of a complex air structure under conditions of rolling stock movement along extended underground structures using numerical modeling methods. **Methods:** an analysis of the influence of aerodynamic factors on rolling stock, passengers and railway infrastructure was carried out based on the finite element and volume method. The reasons for the occurrence of a compacted air zone, which appears in front of the head car of the train and exerts significant resistance to the movement of the train using the “Frozen Rotor” method, have been investigated. The indicators of energy efficiency and safety of the process of freight and passenger transportation are analyzed, taking into account the processes of aerodynamic interaction of moving rolling stock and artificial tunnel-type structures. **Results:** using numerical modeling and the use of the “Frozen Rotor” method, it was possible to obtain a qualitative picture of the distribution of transverse vortex air flows resulting from the occurrence of viscous friction. Regularities were discovered in the changes in the dynamics of pressure and speed of air masses on the surface of the head

fairing when a train enters a tunnel. The fact of the negative impact of zones of high and low pressure, as well as their sharp drop, on the locomotive crew and passengers has been established. **Practical significance:** the possibility of conducting research in the field of aerodynamics of railway transport using modern numerical modeling methods is shown. This topic is very relevant in the field of designing high-speed rolling stock.

Keywords: aeroelastic interaction, artificial tunnel-type structures, energy efficiency, numerical modeling, transverse vortices, “piston” effect.

References

1. O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: tehničeskij reglament Tamozhennogo sojuza ot 15.07.11 s izm. na 09.12.11 (TR TS 002/2011) [Elektronnyj resurs]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293437> (data obrashhenija: 01.01.2024). (In Russian)
2. Tehničeskij reglament Tamozhennogo Sojuza TR TS 002/2011 “O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta”. (In Russian)
3. N. Paradot, C. Talcotte, A. Willaime, et al. Methodology for computing the flow around a high speed train for drag estimation and validation using wind tunnel experiments. World Congress on Rail Research, Tokyo. 1999.
4. Vataev A. S., Vatulin Ja. S., Vorob’ev A. A. i dr. Cifrovoe modelirovanie ajerouprugogo vzaimodejstvija podvizhnogo sostava s portal’nymi sooruzhenijami pereval’nyh tonnelj // Bjuľeten’ rezul’tatov nauchnyh issledovanij. 2022. № 1. S. 104–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123. (In Russian)
5. Vorob’ev A. A., Vatulin Ja. S., Vataev A. S. i dr. K voprosu snizhenija negativnogo jeffekta vozdejstvija ajerouprugogo vzaimodejstvija vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava s jelementami tonnel’nyh sooruzhenij // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija. SPb., 2022. № 3. S. 590–599. (In Russian)
6. Karimov D. D., Vatulin Ja. S., Vorob’ev A. A. i dr. Osobennosti formirovanija struktury vozdušnyh mass v tonnele pri dvizhenii poezda // Transport BRIKS. 2023. № 2 (2). S. 1–6. DOI: 10.46684/2023.2.6 (In Russian)
7. Bogdanov N. V., Vataev A. S., Vatulin Ja. S. i dr. Obzor metodov CFD-modelirovanija ajerodinamicheskih processov pri dvizhenii podvizhnogo sostava po protjazhennym podzemnym sooruzhenijam // Sistemy avtomatizirovannogo proektirovanija na transporte. 2023. St. 28–34. DOI: 56575829. (In Russian)
8. Karimov D. D., Vataev A. S., Metljakova i dr. Ispol’zovanie čislenno modelirovanija pri analize ajerodinamicheskih problem na transporte // Transport BRIKS. 2023. № 2 (3). S. 1–5. DOI: 10.46684/2023.3.5/. (In Russian)
9. Karimov D. D., Vorob’ev A. A., Vataev A. S. i dr. Issledovanie poperečnoj ustojčivosti vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava pri vyhode iz tonnelja // Bjuľeten’ rezul’tatov nauchnyh issledovanij. 2023. Vyp. 2. S. 115–135. (In Russian)
10. Lugin I. V., Alferova E. L. Issledovanie ajerodinamicheskih processov pri dvizhenii poezda v protjazhennyh zheleznodorozhnyh tonneljah // Interjekspo GEO-Sibir’. 2018. T. 5. S. 155–160. (In Russian)

11. Ledjaev A. P., Kavkazskij V. N., Shelgunov O. O. Matematicheskoe modelirovanie ajerodinamicheskikh processov v zheleznodorozhnyh tunneljah na vysokoskorostnyh magistraljah // Metro i tonneli. 2021. № 3. S. 40–43. 12. Ledjaev A. P., Kavkazskij V. N., Kreer R. O. Osobennosti proektirovanija tonnelej na vysokoskorostnyh magistraljah // Transport Urala. 2015. № 4 (47). S. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-3-9. (In Russian)

Received: 27.01.2024

Accepted: 01.03.2024

Author's information

Nikita V. BOGDANOV — Graduate Student, ntk@pgups.ru

Yn. S. VATULIN — Associate Professor, yan-roos@yandex.ru

Aleksander A. VOROB'EV — D. Sci. in Engineering, Associate Professor, ntk@pgups.ru

Kirill A. SOTNIKOV — Graduate Student, k-sotnikov@yandex.ru