

Научная статья
УДК 629.3.015.3
doi: 10.46684/2687-1033.2024.4.437-444

Оценка динамики движения высокоскоростного подвижного состава

А.А. Воробьев^{1✉}, А.С. Ватаев², Я.С. Ватулин³, В.С. Майоров⁴, А.Н. Цыбульский⁵

^{1,2,3,4,5} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС); г. Санкт-Петербург, Россия

¹ ntk@pgups.ru✉

² ntk@pgups.ru

³ ntk@pgups.ru

⁴ ntk@pgups.ru

⁵ ntk@pgups.ru

АННОТАЦИЯ

При движении по эстакаде подвижной состав (ПС) подвергается воздействию сложного сочетания воздушных потоков, образующихся в результате вытеснения и инерционного увлечения воздушных масс движущимся корпусом, а также потоков воздушных масс бокового направления со стороны открытого пространства. Формирующееся таким образом аэродинамическое нагружение отличается от варианта движения состава по высокой насыпи.

Выполнено численное моделирование аэродинамической нагрузки на высокоскоростной состав при его движении на эстакадах, расположенных в районах интенсивного влияния ветра. Проведена оценка устойчивости ПС при воздействии явления «сноса»: одновременного действия бокового ветра и инерционного надува воздушных масс. Определены сочетания составляющих аэродинамического влияния, при которых формируются условия недопустимого снижения уровня весовой нагрузки на ходовые колеса тележек. Установлены предельные значения скоростного режима движения поезда в зависимости от аэродинамической нагрузки, образующейся при штормовых условиях.

Результаты исследований показали наличие определенной корреляции уровня турбулентности возмущенной воздушной среды в коридоре движения железнодорожного транспортного средства и реакций в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» передней и задней тележек.

Ключевые слова: аэродинамический снос; инерционный надув воздушных масс; высокоскоростной подвижной состав; аэродинамика; устойчивость; эстакада; контактная группа «колесо – рельс»

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

Для цитирования: Воробьев А.А., Ватаев А.С., Ватулин Я.С., Майоров В.С., Цыбульский А.Н. Оценка динамики движения высокоскоростного подвижного состава // Техник транспорта: образование и практика. 2024. Т. 1. Вып. 4. С. 437–444. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2024.4.437-444>.

Original article

Evaluation of the dynamics of high-speed rolling stock

Alexander A. Vorobyov^{1✉}, Andrey S. Vataev², Jan S. Vatulin³, Vladimir S. Mayorov⁴, Artem N. Tsybulsky⁵

^{1,2,3,4,5} Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS); Saint Petersburg, Russian Federation

¹ ntk@pgups.ru✉

² ntk@pgups.ru

³ ntk@pgups.ru

⁴ ntk@pgups.ru

⁵ ntk@pgups.ru

© А.А. Воробьев, А.С. Ватаев, Я.С. Ватулин, В.С. Майоров, А.Н. Цыбульский, 2024

ABSTRACT

When moving on an overpass, a rolling stock is exposed to a complex combination of air flows formed as a result of displacement and inertial entrainment of air masses by the moving body, as well as lateral air mass flows from the open space. The aerodynamic loading formed in this way differs from the variant of train movement on a high embankment.

A numerical simulation of the aerodynamic load on a high-speed train when it moves on overpasses located in areas of intense wind exposure was performed. An assessment of the stability of the rolling stock under the effect of the "drift" phenomenon was carried out: the simultaneous action of a crosswind and inertial pressurization of air masses. Combinations of aerodynamic impact components were determined, under which conditions for an unacceptable decrease in the level of weight load on the running wheels of the bogies are formed. Limit values of the speed mode of train movement were established depending on the aerodynamic load formed under storm conditions.

The results of the studies showed the presence of a certain correlation between the level of turbulence of the disturbed air environment in the corridor of movement of a railway vehicle and reactions in the contact groups "running wheels – rail head" of the front and rear bogies.

Keywords: aerodynamic demolition; inertial pressurization of air masses; high-speed rolling stock; aerodynamics; stability; overpass; wheel – rail contact group

Acknowledgments. The research carried out on this topic was conducted within the framework of the implementation of the federal program of support for universities "Priority-2030".

For citation: Vorobyov A.A., Vataev A.S., Vatulin Y.S., Mayorov V.S., Tsybulsky A.N. Evaluation of the dynamics of high-speed rolling stock. *Transport technician: education and practice.* 2024;1:437-444. (In Russ.). <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2024.4.437-444>.

ВВЕДЕНИЕ

Современное видение обеспечения надежно железнодорожного движения [1] предполагает движение по эстакадам определенной высоты.

Однако при движении по эстакаде подвижной состав (ПС) подвергается воздействию сложного сочетания воздушных потоков, образующихся в результате вытеснения и инерционного увлечения воздушных масс движущимся корпусом, а также потоков воздушных масс бокового направления со стороны открытого пространства. Формирующееся таким образом аэродинамическое нагружение отличается от варианта движения состава по высокой насыпи.

Подобная проблема характерна также, например, для высокоскоростного движения по линии Méditerranée (Франция) на участках в направлении Марселя и Монпелье. При пересечении долины Роны (южнее Авиньона) поезд TGV Duplex должен двигаться по виадуку высотой 55 м с заявленной скоростью 300 км/ч [2]. Но в данной местности нередко образуются мощные порывы ветра, способные создавать значительный опрокидывающий момент.

Результаты исследований, проведенные в Научно-техническом центре строительства CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment) (г. Нант) на масштабных моделях 1:15 поезда TGV

Duplex [2] в аэродинамической трубе Института аэротехники (Institut AéroTechnique, IAT Saint-Cyr), позволили получить визуальную информацию о поведении потоков воздушных масс вблизи корпуса (рис. 1).

Кроме того, результаты исследований [3, 4] показывают, что структура возмущенной воздушной среды, образующаяся в непосредственной близости от движущегося поезда, в значительной степени зависит от конфигурации и расположения элементов приближенных сооружений. Таким образом, данную задачу необходимо рассматривать в обобщенной трехмерной постановке с учетом конфигурации окружающих поверхностей.

Устойчивость ПС к воздействию бокового ветра на специфических участках пути при определенных климатических условиях регламентируется в технических требованиях ЕС по технико-эксплуатационной совместимости (TSI). Опрокидывающий момент [5, 6], образованный результирующей воздействия ветровой нагрузки, создает дисбаланс нагружения колесной пары, что снижает эффективность процесса торможения и создает риск вкатывания колеса на головку рельса [7]. Критерием предельного снижения давления служит распределение веса ПС на колесные пары менее 10 % [8, 9].

Сложность решения данной задачи заключается в том, что объект представляет собой много-



Рис. 1. Масштабная модель 1:15 TGV Duplex в рабочей камере аэродинамической трубы (Франция) [2]

фюзеляжную систему взаимодействующих между собой объектов с системой упруго-диссипативных связей в виде пружинно-фрикционного поглощающего аппарата [10].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическое моделирование процесса потери устойчивости ПС выполнено на основе составления и решения дифференциальных уравнений [11], описывающих вынужденные колебания двухмассовой системы, находящейся под воздействием внешних силовых факторов возмущения гармонического характера, с ограничением по критерию смещения проекции центра масс вагона под влиянием системы возмущающих подъемных и боковых аэродинамических сил [12–15].

Для оценки силового воздействия движущихся воздушных масс на ПС необходимо установить механизмы передачи внешних аэродинамических нагрузок с поверхности корпуса ПС на тележку и далее на верхнее строение пути. С этой целью следует:

1. Составить расчетную схему для определения аэродинамического давления на корпус движущегося поезда методом конечных объемов, используя подходы теории упругости.

2. Определить механизм формирования воздушного сопротивления высокоскоростного состава типа «Сапсан» при его движении по эстакаде определенной высоты в условиях воздействия бокового ветра.

3. Установить динамический отклик упруго-податливой подвески ПС на возмущение от аэродинамического воздействия.

4. Определить усилия в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» при различных скоростях движения состава и скорости бокового ветра.

Исходные данные

Для моделирования боковых потоков воздушных масс приняты условия формирования аэродинамической нагрузки при сильном шторме и урагане (по шкале Бофорта): 12 м/с — 6 баллов, 27 м/с — 10 баллов, 36 м/с — 12 баллов соответственно.

Расчетным ПС был принят высокоскоростной электропоезд на платформе Siemens Velaro, в частности, Velaro RUS (ЭВС2 «Сапсан»).

Основные характеристики высокоскоростного поезда Velaro RUS (ЭВС2 «Сапсан») приведены в табл. 1.

Моделирование аэродинамического нагружения

Аэродинамическое воздействие на корпусные элементы поезда формирует пространственно направленный суммарный вектор движения воздушных масс относительно ПС (рис. 2): в горизонтальной (угол рыскания) и вертикальной плоскостях (угол тангажа).

Таблица 1

Основные характеристики высокоскоростного поезда Velaro RUS

Параметр	Значение
Число вагонов, шт.	10
Число осей вагона, шт.	4
Длина вагона, м	24,73
Длина поезда, м	246,27
Вес поезда, кН	6412
Средняя осевая нагрузка, кН/м	26,04
Высота вагона от уровня головки рельса, м	5
Уровень головки рельса над земной поверхностью, м	4,0
Жесткость пружины, МН/м	26,21
Коэффициент демпфирования, Н·с/мм	35

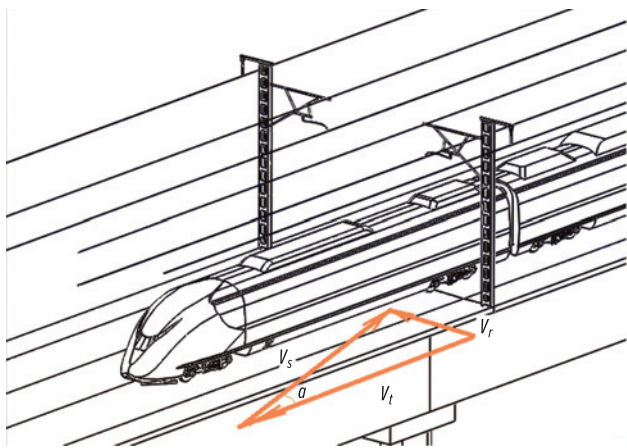


Рис. 2. Схема движения воздушных масс относительно подвижного состава

Для движения поезда с постоянной скоростью и принятой модели устойчивого бокового ветра [16] суммарный вектор аэродинамического воздействия на корпус ПС определяется по формуле

$$V_s = \sqrt{V_r^2 + V_t^2},$$

где V_t — скорость транспортного средства, м/с; V_r — скорость бокового воздушного потока, м/с.

Угол рыскания рассчитывается по выражению

$$\tan \alpha = \frac{V_r}{V_t}.$$

Установившиеся аэродинамические силы F и моменты M определяются следующим образом

$$F = 0,5\rho SC_F(\alpha)V_s^2;$$

$$M = 0,5\rho ShC_M(\alpha)V_s^2,$$

где F — аэродинамическая сила, Н; ρ — плотность воздуха, кг/м³; S — контрольная площадь, м²; C_F — коэффициент аэродинамической силы; M — аэродинамический момент, Н/м; h — контрольная высота, м; C_M — коэффициент аэродинамического момента.

Для моделирования порывистого бокового ветра применяется методика, изложенная в СП 20.13330.2011 п. 11 «Нагрузки и воздействия». Трасса проходит в двух зонах IV и V по скорости ветра. По давлению ветра I, II зоны соответствуют 30,59 кг/м² (п. 11.1.4 табл. 1.1, прил. Ж). Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на 1 м² наветренной поверхности состава W_m составило 48,09 кг/м², нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_p на высоте z — 19,33 кг/м², пиковая положительная ветровая нагрузка W_z — 67,42 кг/м² (0,66 кПа).

В принятой k - ϵ модели турбулентности базовый размер ячеек составляет 0,4 м со сгущением до

размера 0,01 м ближе к стенкам поезда и поверхностям периферийных сооружений, при этом пограничный пристеночный слой полностью находится в пределах первого сеточного слоя от стенки.

В модели приняты следующие допущения:

1. С целью снижения времени расчета упрощена геометрия.
2. Нестационарный характер движения циркуляционных потоков учитывается через коэффициент трения воздушной среды.
3. Вся расчетная область имеет постоянную температуру.
4. Колесные пары находятся в постоянном контакте с рельсами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Результаты численного моделирования качественно подтверждают эксперимент, описанный в источниках [16, 17] (рис. 3).

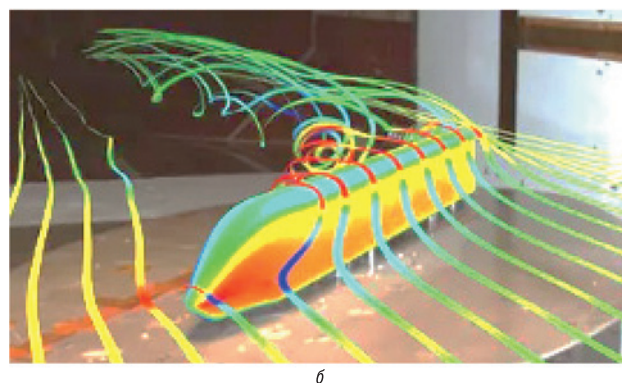
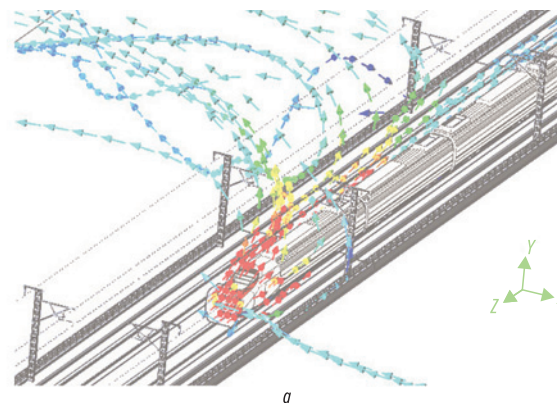


Рис. 3. Взаимодействие сочетания боковой ветровой нагрузки с корпусом головного вагона подвижного состава: а — моделирование вихреобразования, численная модель; б — эксперимент в аэродинамической трубе Института аэротехники (Institut AéroTechnique, IAT Saint-Cyr) [17]

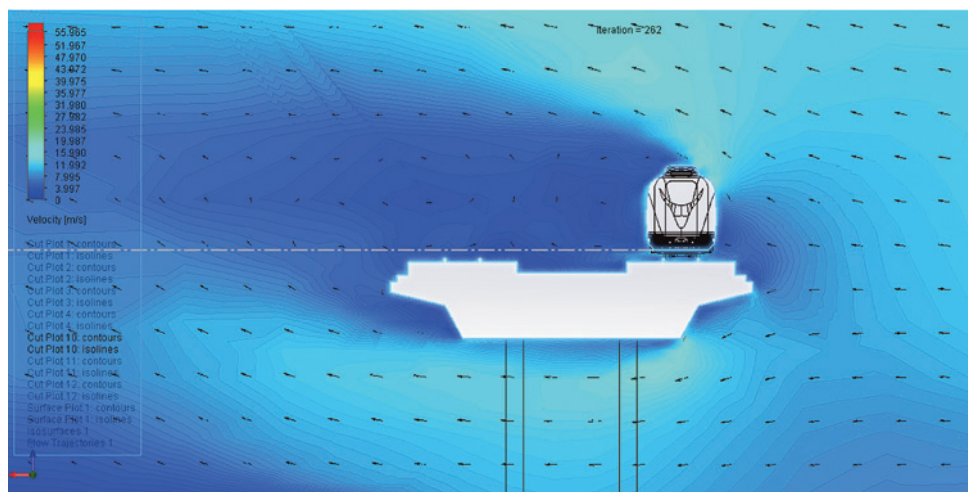


Рис. 4. Эпюра распределения поля скоростей в поперечном направлении: скорость поезда – 200 км/ч, скорость бокового ветра – 12 км/ч

Вместе с тем имеют место определенные отличия: эксперимент выполнен с неподвижным объектом, находящимся на уровне поверхности земли. Наличие свободного пространства под пролетным строением эстакады формирует особую конфигурацию аэродинамической тени, создаваемой корпусом ПС и эстакады. В частности, с наветренной стороны воздушный поток разделяется на две части: верхняя часть омывает крышевую и боковую поверхности корпуса, здесь преобладают зоны высоких скоростей, что способствует образованию области отрицательного давления; вторая направлена в зону свободного пространства под пролетным строением эстакады (рис. 4). Нижняя часть боковой поверхности корпуса вагона и подвагонное пространство находятся в зоне резкой смены направления разделяющихся потоков воздушных масс, что вызывает снижение скорости и рост давления среды. При движении транспортного средства, например, по высокой насыпи, подвагонная область

ПС подвержена интенсивному воздействию ускоренно перемещающихся воздушных масс.

Усредненные значения давления воздушной среды на поверхности корпуса головного вагона с наветренной и подветренной сторон сведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ СОСТАВА С УЧЕТОМ ОДНОКРАТНОЙ ПИКОВОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В результате вычислений получены значения нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 12 и 36 м/с, которые представлены в табл. 3, 4 соответственно.

Таблица 2

Значения давления воздушных масс на боковую поверхность корпуса головного вагона с наветренной и подветренной сторон

Скорость поезда, км/ч	Сторона нагружения, Ра	Скорость бокового ветра, м/с		
		12	27	36
200	Наветренная	-6,2	35,1	62,7
200	Подветренная	-128	-387	-653,6
300	Наветренная	-26,9	110,9	123,5
300	Подветренная	-191,2	-403,1	-650,5
400	Наветренная	-103,1	138,5	248,1
400	Подветренная	-319,7	-424	-669,1

Таблица 3

**Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 12 м/с
(процент распределения нагрузки на колесо)**

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН		Нагрузка на колеса задней тележки, кН	
Правый	7,26 (11,6)	8,03 (12,8)	7,65 (12,24)	8,33 (13,32)
Левый	7,41 (11,8)	7,68 (12,28)	7,9 (12,64)	8,28 (13,24)

Таблица 4

Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 36 м/с

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН		Нагрузка на колеса задней тележки, кН	
Правый	10,57 (14,4)	10,58 (14,4)	8,08 (11)	12,3 (16,75)
Левый	7,27 (9,9)	7,97 (10,85)	8,13 (11)	8,5 (11,5)

Результаты исследований показывают наличие определенной корреляции уровня турбулентности возмущенной воздушной среды в коридоре движения железнодорожного транспортного средства и реакций в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» передней и задней тележек. В пределах скоростного режима движения поезда 300 км/ч и боковом ветре не более 27 м/с колебательный процесс в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» имеет гармонический характер.

При увеличении скорости бокового ветра более 27 м/с и скоростном режиме движения поезда свыше 300 км/ч наблюдается постепенная смена режима колебательного процесса в контактных группах «колесо – рельс», в частности появляются признаки низкочастотной неустойчивости, что связано с резко возросшей турбулентностью формирующихся срывных потоков воздушной среды на кузове вагона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное моделирование многофакторного процесса аэродинамического воздействия на высокоскоростной ПС при его движении по эстакаде в условиях повышенной ветровой нагрузки пока-

зало характерную картину, формирующуюся под влиянием инерционного наддува и увлечения воздушной среды движением поезда.

Снос срывного потока воздушной среды в направлении хвостовых вагонов создает условия образования значительной разницы давлений на наветренной и подветренной поверхностях кузова вагона, чем вызывает опасный бортовой крен части состава, взаимовлияние сопряженных упруго-податливыми связями вагонов и усложнение колебательного процесса в контактных группах «колесо – рельс».

При скоростном режиме поезда 200 км/ч усиление бокового ветра с 12 до 36 м/с приводит к росту углового отклонения положения вагона на 32 %, а также увеличению времени процесса стабилизации подрессоренных масс на 10 %. При этом наблюдается превышение предельно допустимого десятипроцентного уровня снижения давления на колесные пары распределенного веса ПС, что повышает риск потери сцепления колеса с рельсом и, следовательно, снижает эффективность процесса торможения в течение 1 с при заданном скоростном режиме движения. Предельно допустимая скорость порыва бокового ветра не должна превышать 27 м/с для скоростных режимов движения состава в пределах 300 км/ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова Н.Б., Писарева И.Н., Потапов П.Р. Обеспечение безопасности движения поездов: учебное пособие. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. 148 с. EDN YSDJNH.

2. Мамонтов Д. Аэродинамика скоростных поездов: почему ветер не мешает TGV // Techinsider. 2021. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/10632-protiv-vetra-aerodinamika/>

3. Полякова Е.Я. Особенности аэродинамики подвагонного пространства высокоскоростного подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 150 с. EDN BTVRLE.

4. Каримов Д.Д.У. Управление аэроупругим взаимодействием подвижного состава с элементами искусственных сооружений тоннельного типа: автореферат дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2023. 17 с.

5. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 564 с.

6. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks-Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с.

7. Сидорова Е.А., Певзнер В.О., Чечельницкий А.И. Показатели силового взаимодействия пути и подвижного состава при движении грузового вагона по длинным неровностям с учетом действия продольных сил // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80. № 6. С. 359–365. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-6-359-365. EDN RNWVWC.

8. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): учебное пособие. СПб., 2002. 545 с. EDN YNFVSM.

9. Котуранов В.А. Обоснование показателей, характеризующих новационность конструкций поглощающих аппаратов автосцепки в условиях маневровых соударений: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУПС, 2014. 181 с. EDN SVBZQX.

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

11. Бороненко Ю.П., Поляков Б.О., Полякова Е.Я. Воздействие сил бокового ветра на контейнеры с двухэтажным рас-

положением // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2023. № 1–2 (104–105). С. 41–45. EDN FJWRRP.

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

13. Воробьев А.А., Ватулин Я.С., Ватаев А.С., Каримов Д.Д.У., Сотников К.А. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. № 3. С. 590–599. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-590-599. EDN HBOTGU.

14. 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. № 1. С. 65–73. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73. EDN ZKCCRY.

15. Yu M., Jiang R., Zhang Q., Zhang J. Crosswind Stability Evaluation of High-Speed Train Using Different Wind Models // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 32. Issue 1. DOI: 10.1186/s10033-019-0353-7

16. NUCARS // MxV Rail. 2017. URL: <http://www.aar.com/nucars/>

17. Centre scientifique et technique du bâtiment TGV. URL: <https://cstb.hal.science/>

REFERENCES

1. Aleksandrova N.B., Pisareva I.N., Potapov P.R. *Ensuring the safety of train traffic: textbook*. Moscow, Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2016;148. EDN YSDJNH. (In Russ.).

2. Mamontov D. Aerodynamics of high-speed trains: why the wind does not interfere with TGV. *Techinsider*. 2021. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/10632-protiv-vetra-aerodinamika/> (In Russ.).

3. Polyakova E.Ya. *Features of the aerodynamics of the undercar space of high-speed rolling stock: dissertation ... candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2021;150. EDN BTVRLE. (In Russ.).

4. Karimov D.D.U. *Control of aeroelastic interaction of rolling stock with elements of artificial tunnel-type structures: abstract of thesis. ... candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2023;17. (In Russ.).

5. Alyamovsky A.A. *SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations*. Moscow, DMK Press, 2015;564. (In Russ.).

6. Alyamovsky A.A. *Engineering calculations in SolidWorksSimulation*. Moscow, DMK Press, 2010;464. (In Russ.).

7. Sidorova E.A., Pevzner V.O., Chechel'nitskiy A.I. Indicators of the force interaction of the track and rolling stock when a freight car runs on long irregularities, taking into account the action of longitudinal forces. *Russian Railway Science Journal*.

2021;80(6):359-365. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-6-359-365. EDN RNWVWC. (In Russ.).

8. Girgidov A.D. *Mechanics of liquid and gas (hydraulics): textbook*. St. Petersburg, 2002;545. EDN YNFVSM. (In Russ.).

9. Koturanov V.A. *Justification of indicators characterizing the innovativeness of the designs of automatic coupler draft gears under conditions of shunting collisions: dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, MGUPS, 2014;181. EDN SVBZQX. (In Russ.).

10. Sladkova L.A., Neklyudov A.N. Dynamics of the rolling stock and the choice of parameters of vibration dampers. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(4):(95):13-20. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-4-2. EDN JYOTRB. (In Russ.).

11. Boronenko Yu.P., Polyakov B.O., Polyakova E.Y. Impact of lateral wind forces on double-stack container transportation. *Transport of the Russian Federation*. 2023;1-2(104-105):41-45. EDN FJWRRP. (In Russ.).

12. Vataev A., Vatulin Ya., Vorob'ev A., Sotnikov K. Digital modeling of aeroelastic interaction of a rolling stock with portal buildings of passover tunnels. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2022;2:104-123. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123. EDN KKZYHU. (In Russ.).

13. Vorob'ev A., Vatulin Ya., Vataev A., Karimov D., Sotnikov K. 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;19(3):590-599. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-590-599. EDN HBOTGU. (In Russ.).

14. Bogdanov N., Vatulin Ya., Vorob'ev A., Sotnikov K. Use of numerical modeling in analysis of aeroelastic interaction of rolling stock with tunnel constructions. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2024;1:65-73. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73. EDN ZKCCRY. (In Russ.).

15. Yu M., Jiang R., Zhang Q., Zhang J. Crosswind Stability Evaluation of High-Speed Train Using Different Wind Models. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2019;32(1). DOI: 10.1186/s10033-019-0353-7

16. NUCARS. *MxV Rail*. 2017. URL: <http://www.aar.com/nucars/>

17. *Centre scientifique et technique du bâtiment TGV*. URL: <https://cstb.hal.science/>

Об авторах

Александр Алфеевич Воробьев — доктор технических наук, доцент; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; nttk@pgups.ru;

Андрей Сергеевич Ватаев — кандидат технических наук, доцент; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; nttk@pgups.ru;

Ян Семенович Ватулин — кандидат технических наук, доцент; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; nttk@pgups.ru;

Владимир Сергеевич Майоров — кандидат технических наук, доцент; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; nttk@pgups.ru;

Артем Николаевич Цыбульский — аспирант; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)**; 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; nttk@pgups.ru.

Bionotes

Alexander A. Vorobyov — Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; nttk@pgups.ru;

Andrey S. Vataev — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; nttk@pgups.ru;

Jan S. Vatulin — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; nttk@pgups.ru;

Vladimir S. Mayorov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; nttk@pgups.ru;

Artem N. Tsybulsky — postgraduate student; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; nttk@pgups.ru.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Автор, ответственный за переписку: Александр Алфеевич Воробьев, nttk@pgups.ru.

Corresponding author: Alexander A. Vorobyov, nttk@pgups.ru.

Статья поступила в редакцию 04.08.2024; одобрена после рецензирования 05.09.2024; принята к публикации 28.10.2024.

The article was submitted 04.08.2024; approved after reviewing 05.09.2024; accepted for publication 28.10.2024.