

УДК 629.4.014, 624.9, 624.041.12

## Актуализация методики учета аэродинамического воздействия от поездов на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Н. А. Лабутин<sup>1</sup>, Л. К. Дьяченко<sup>2</sup>, Е. Е. Луковников<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>1,2</sup> ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений», Россия, 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 113а

**Для цитирования:** Лабутин Н. А., Дьяченко Л. К., Луковников Е. Е. Актуализация методики учета аэродинамического воздействия от поездов на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 142–155. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-142-155

### Аннотация

При расчете конструкций, расположенных вблизи железнодорожных путей (шумозащитных экранов вдоль путей, путепроводов над высокоскоростными железнодорожными магистралями (ВСМ), элементов пролетных строений с ездой понизу и т. д.), должны учитываться аэродинамические воздействия при движении высокоскоростных поездов. **Целью** настоящего исследования является изучение аэродинамического воздействия движущегося высокоскоростного поезда на сооружения и конструкции, расположенные в непосредственной близости от высокоскоростной железнодорожной магистрали с последующей корректировкой действующей нормативной базы для проектирования объектов инфраструктуры ВСМ. **Методами** исследования в настоящей работе являются математическое моделирование в специализированном программном комплексе вычислительной гидрогазодинамики с экспериментальной верификацией разработанных расчетных моделей и последующим анализом и обобщением полученных результатов. **Результаты** исследования представлены картинками распределения и интенсивностями аэродинамического воздействия от движущегося высокоскоростного поезда для двух наиболее характерных расчетных случаев: воздействие на вертикальную поверхность, расположенную параллельно оси пути, и на горизонтальную поверхность, расположенную над осью движения поезда. Для рассматриваемых расчетных случаев были установлены зависимости интенсивности воздействия от таких параметров, как расстояние до конструкции от оси пути (для вертикальной поверхности) и высота над уровнем головки рельса (для горизонтальной поверхности). **Практическая значимость** настоящего исследования заключается в разработке предложений по корректировке и дополнению действующей нормативной базы для проектирования сооружений и конструкций, входящих в состав инфраструктуры высокоскоростных железнодорожных магистралей.

**Ключевые слова:** ВСМ, высокоскоростная магистраль, аэродинамика, аэродинамическое воздействие, высокоскоростной поезд, инфраструктура, объекты инфраструктуры.

### Введение

Разработка специальных технических условий (СТУ) для проектирования и строительства высокоскоростной железнодорожной магистрали ВСЖМ-1 Санкт-Петербург — Москва обусловлена необходимостью учета при

проектировании некоторых специальных нагрузок и воздействий, учет которых недостаточно представлен в действующей нормативной базе. Одной из таких нагрузок является нагрузка от аэродинамического воздействия

высокоскоростного подвижного состава на объекты инфраструктуры магистрали [1–3].

Нагрузка от аэродинамического воздействия представляет собой «бегущую» знакопеременную воздушную волну из областей повышенного (избыточного) и пониженного (разреженного) давлений с резкой сменой их экстремальных значений. Особая значимость именно для объектов инфраструктуры ВСМ нагрузки от аэродинамического воздействия обусловлена квадратичной зависимостью давления, оказываемого воздушным потоком, от скорости генерируемого поездом ветрового потока, существенно превышающей скорость ураганного ветра [4–7].

### **Обзор ранее разработанной нормативной базы**

Впервые в России аэродинамическое воздействие от высокоскоростных поездов было отмечено в Указаниях по проектированию мостов для головного участка Ленинград — Москва высокоскоростной железнодорожной магистрали «Центр — Юг» с эксплуатационной скоростью до 300 км/ч, разработанных ЛИИЖТ в 1990 году [8]. Рост интенсивности аэродинамического взаимодействия между встречными поездами был компенсирован увеличением ширины междупутья до 5 м [9].

В 2007 году в рамках подготовки к организации высокоскоростного движения на существующей линии Санкт-Петербург — Москва ОАО «РЖД» был введен стандарт организации СТО 1.07.001-2007 «Инфраструктура линии Санкт-Петербург — Москва для высокоскоростного движения поездов. Общие технические требования», в котором было обозначено требование к учету нагрузки от аэродинамического воздействия объектами инфраструктуры линии.

Мощным импульсом развития исследования вопросов аэродинамического воздействия поездов послужила разработка специальных технических условий для проектирования и строительства ВСМ-2 Москва — Казань в 2014–2016 годах со скоростью движения до 400 км/ч [10]. Вследствие отсутствия отечественного опыта исследования аэродинамического воздействия в СТУ были заимствованы основные положения из европейских норм проектирования Eurocode EN 1991-2, ограниченные скоростями движения до 300 км/ч. В это же время ОАО «РЖД» была утверждена опытная методика расчета аэродинамического воздействия от высокоскоростных поездов при скоростях движения до 400 км/ч [11], в которой был расширен диапазон рабочих скоростей движения и введены коэффициенты, учитывающие распределение аэродинамического давления в различных расчетных случаях. В дальнейшем данная методика легла в основу рекомендаций по расчету аэродинамического воздействия, приведенных в СТУ для проектирования и строительства ВСЖМ-1 Санкт-Петербург — Москва.

### **Экспериментальные исследования аэродинамического воздействия**

Для ликвидации имеющегося дефицита в экспериментальных исследованиях аэродинамического взаимодействия подвижного состава и воздушной среды летом 2021 года специалистами Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС) были выполнены экспериментальные измерения аэродинамического воздействия на отдельных участках железной дороги Санкт-Петербург — Москва с установленными скоростями движения от 200 до 250 км/ч [11–12]. Работы выполнены специалистами кафедры «Мосты» ФГБОУ ВО ПГУПС и ООО «Инженерное

бюро искусственных сооружений» совместно с сотрудниками мостоиспытательной станции № 1 Санкт-Петербургского центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры ОАО «РЖД». Для измерений были использованы высокочастотные мембранные датчики избыточного давления, устанавливаемые на штативах и прикрепляемые к различным объектам инфраструктуры. Процесс измерений представлен на рис. 1.

Результаты измерений были представлены графиками изменения во времени избыточного давления при прохождении подвижного состава. Пример полученной зависимости приведен на рис. 2.

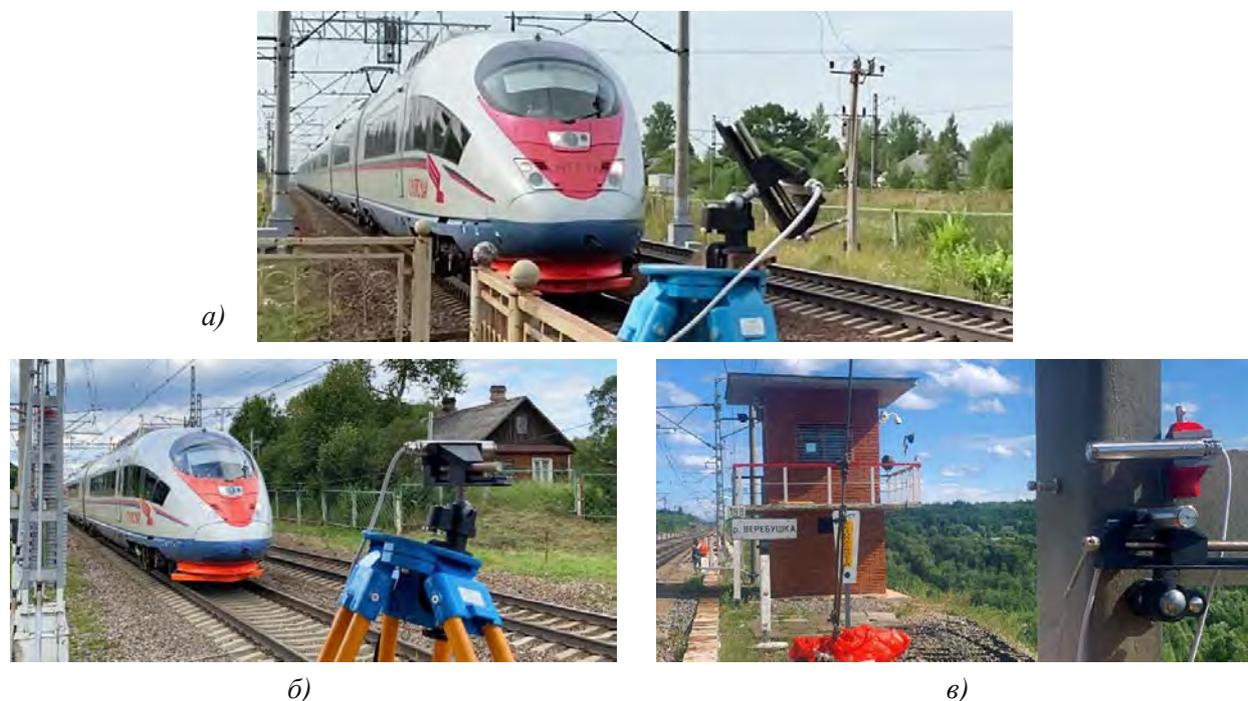
На основе полученных результатов были построены изополя распределения экстремальных величин избыточного давления вокруг поезда. Также был определен характер затухания интенсивности воздушного давле-

ния при удалении от оси пути для различных форм подвижного состава [12].

### Численное моделирование аэродинамического воздействия

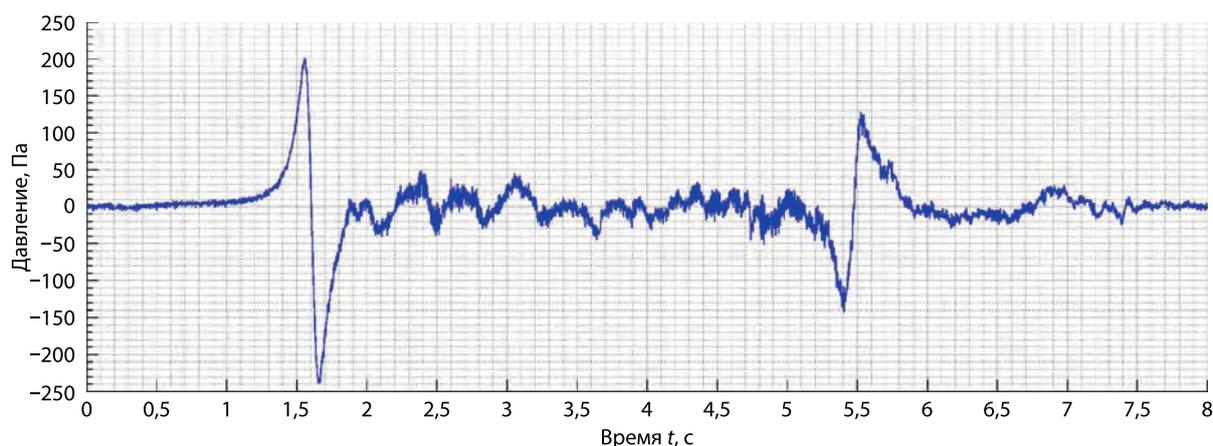
В качестве рассматриваемых расчетных случаев аэродинамического воздействия, оказываемого движущимся высокоскоростным поездом, были рассмотрены два наиболее характерных случая: воздействие на горизонтальную и на вертикальную поверхности, расположенные параллельно оси пути.

Исследование задач аэродинамического взаимодействия воздушной среды, подвижного состава и объектов инфраструктуры является крайне трудоемкой задачей при физическом моделировании на аэродинамических установках [14], так как возникающий поток генерируется непосредственно поездом, движущимся в воздушной среде.



**Рис. 1.** Рабочие моменты выполнения экспериментальных измерений  
 (а — пл. Саблино, б — ст. Мстинский Мост, в — 199-й км линии Санкт-Петербург — Москва).

Фотографии предоставлены авторами

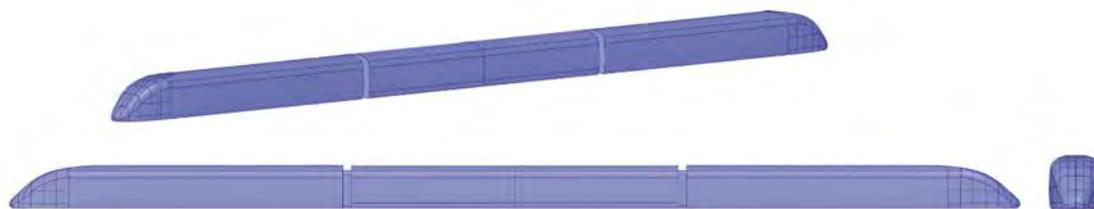


**Рис. 2.** График изменения давления при проходе высокоскоростного поезда «Сапсан» со скоростью 250 км/ч

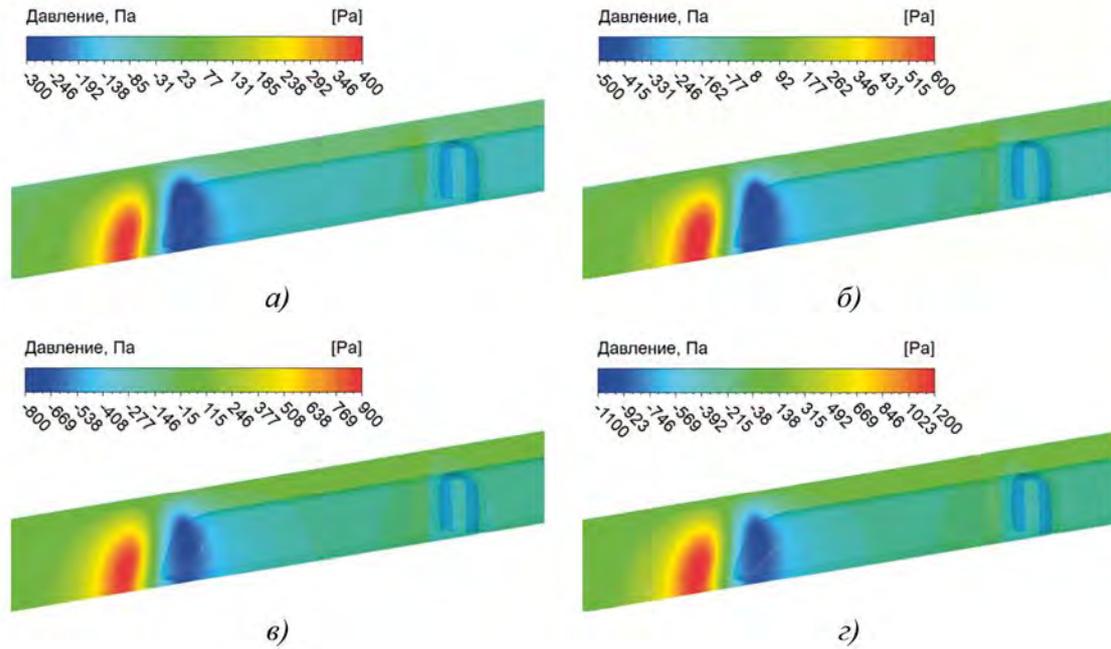
Таким образом, при решении рассматриваемых задач аэродинамического взаимодействия целесообразно прибегать к методам численного моделирования в программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Численное моделирование аэродинамических процессов основано на решении системы уравнений неразрывности воздушной среды, уравнений сохранения энергии и движения, дополняемых уравнениями моделей турбулентности воздушного потока [15]. Для численного моделирования был использован программный комплекс вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX с применением расчетных моделей, верифицированных по результатам выполненных экспериментальных измерений и демонстрирующих достаточно высокую степень достоверности получаемых результатов [16, 17].

В качестве расчетного поезда был принят высокоскоростной электропоезд «Сапсан» в трехвагонной компоновке (рис. 3), позволяющей в полной мере оценить воздействие хвостовой и концевой воздушных волн с существенной экономией вычислительных ресурсов вследствие сокращения размеров расчетной модели.

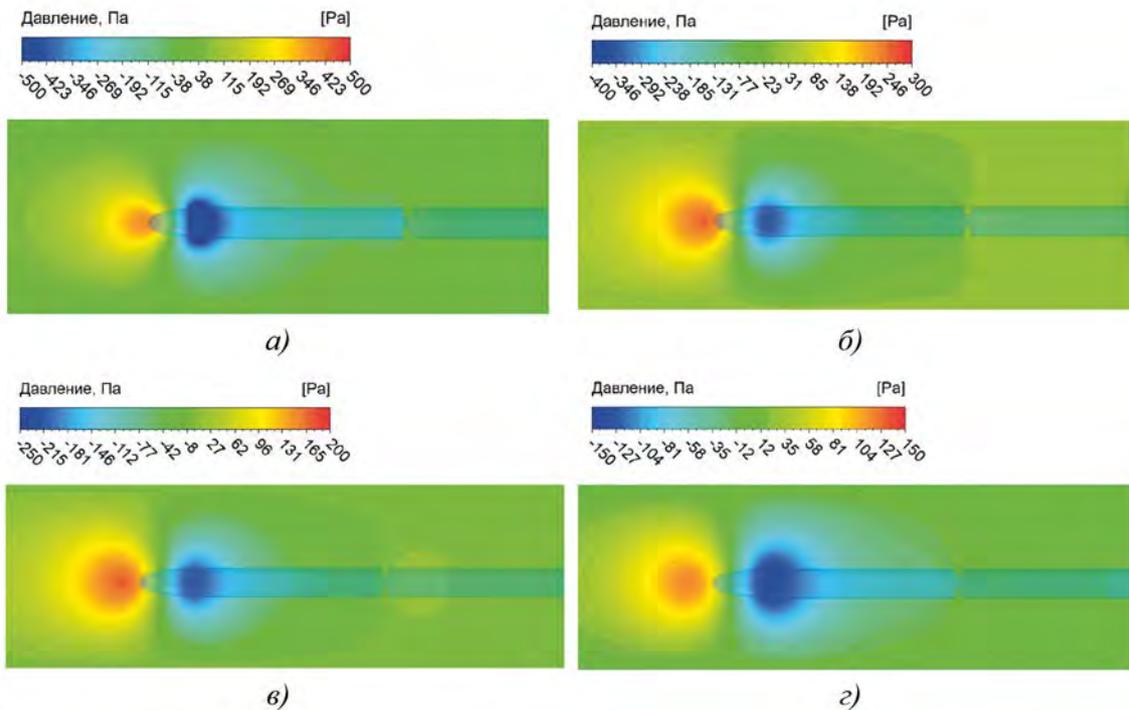
Для оценки величины и характера аэродинамического воздействия была выполнена последовательная серия расчетов на вертикальную поверхность, расположенную параллельно оси пути на расстоянии от 2,5 до 7,0 м от оси пути, и на вертикальную поверхность, расположенную над осью пути на высоте от 5,0 до 8,0 м над уровнем головки рельса (УГР). Полученные характерные изополя распределения давлений на вертикальную и горизонтальную поверхности приведены на рис. 4, 5.



**Рис. 3.** Расчетная модель высокоскоростного электропоезда «Сапсан»



**Рис. 4.** Распределение давлений на вертикальную поверхность, расположенную на расстоянии 2,5 м от оси пути, при скорости движения поезда:  
*а* — 200 км/ч; *б* — 250 км/ч; *в* — 300 км/ч; *г* — 350 км/ч



**Рис. 5.** Распределение давлений на горизонтальную поверхность при скорости движения поезда 250 км/ч и высоте поверхности над УГР: *а* — 5 м; *б* — 6 м; *в* — 7 м; *г* — 8 м

По результатам численного моделирования были получены графики распределения максимальных интенсивностей аэродинамического воздействия в зависимости от расстояния от оси пути и высоты над уровнем головки рельса (рис. 6).

### Разработка методики определения интенсивности эквивалентной нагрузки от аэродинамического воздействия

Величина аэродинамического воздействия определяется такими параметрами, как скорость поезда и его форма, геометрические характеристики и пространственное расположение конструкции относительно подвижного состава, и может быть описана следующим выражением (1):

$$q = 0,5 \cdot \rho_v \cdot v^2 \cdot k_1 \cdot C_p, \quad (1)$$

где:  $\rho_v = 1,225 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха в нормальных условиях;

$v$  — скорость движения поезда;

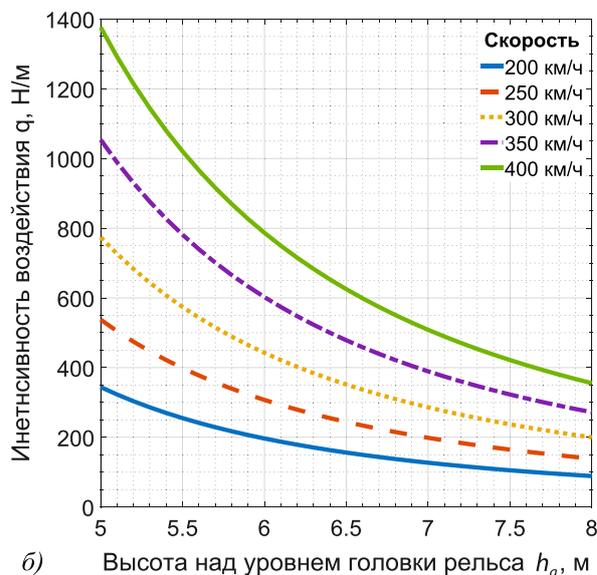
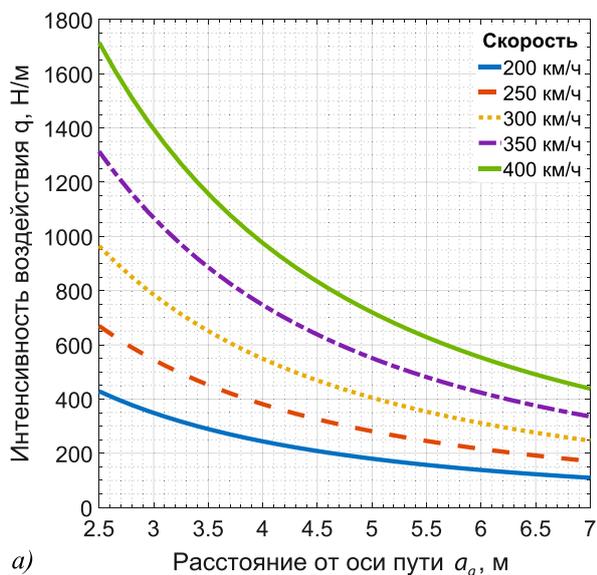
$k_1$  — коэффициент, учитывающий форму поезда;

$C_p$  — коэффициент распределения давления.

Коэффициент распределения давления зависит от рассматриваемого расчетного случая. При воздействии на вертикальные поверхности, параллельные оси пути, коэффициент  $C_p$  определяется в зависимости от расстояния от оси пути до поверхности  $a_g$  (рис. 8), согласно выражению (2):

$$C_p = C_{p1}(a_g) = \frac{8}{(a_g + 2,1)^2}. \quad (2)$$

При воздействии на горизонтальные поверхности, расположенные над подвижным составом, коэффициент  $C_p$  зависит от возвышения отметки низа конструкции над уровнем головки рельса  $h_g$  и ширины конструкции  $W$ . Так, при ширине конструкции от 1,5 до 3,0 м коэффициент  $C_p$  может определяться



**Рис. 6.** Графики распределения интенсивностей аэродинамического воздействия для:  
 а — вертикальной поверхности, расположенной параллельно оси пути;  
 б — горизонтальной поверхности, расположенной над подвижным составом

выражением (3), а при ширине конструкции от 3,0 до 20,0 м — выражением (4).

$$C_p = C_{p2}(h_g, W) = (0,04 \cdot W + 0,41) \cdot \frac{5,5}{(h_g - 1,9)^2}; \quad (3)$$

$$C_p = C_{p2}(h_g, W) = 0,53 \cdot \frac{5,5}{(h_g - 1,9)^2}. \quad (4)$$

При расчете конструкций, пересекающих ВСМ, ширина ( $W$ ) которых более 20 м, их требуется рассматривать как тоннели. В этом случае необходимо учитывать волновой характер воздействия аэродинамического давления на конструкцию.

Поперечное распределение нагрузки от аэродинамического воздействия на поверхность определяется выражениями (5), (6):

$$C_{p2}(h_g, W, a_g) = C_{p2}(h_g, W, 0) \cdot (1 - 0,01a_g^2), \quad (5)$$

если  $a_g < 10,0$  м;

$$C_{p2}(h_g, W, a_g) = 0, \text{ если } a_g \geq 10,0 \text{ м.} \quad (6)$$

где  $a_g$  — расстояние от оси пути.

Сопоставление поперечного распределения нагрузки от аэродинамического воздействия, полученного по выражениям (5), (6), и распределения, полученного путем прямого численного моделирования, проиллюстрировано на рис. 7.

Коэффициент  $k_1$ , учитывающий аэродинамические качества подвижного состава, принимается равным 0,6 для высокоскоростных поездов с обтекаемыми формами (электропоезд типа «Сапсан» (рис. 8, а), 0,85 для скоростных поездов, не имеющих достаточно обтекаемых аэродинамических форм (электропоезд «Ласточка», электровозы ЧС6, ЧС200 и др. (рис. 8, б), и 1,0 для обычных поездов (электровозы ЭП2к и др. (рис. 8, в). Значения коэффициента аэродинамической формы были определены при проведении экспериментальных измерений аэродинамического воздействия подвижного состава [13].

Предлагаемые схемы приложения эквивалентных нагрузок от аэродинамического воздействия представлены на рис. 9–10. Величины интенсивностей нагрузок  $q_{1k}$  и  $q_{2k}$

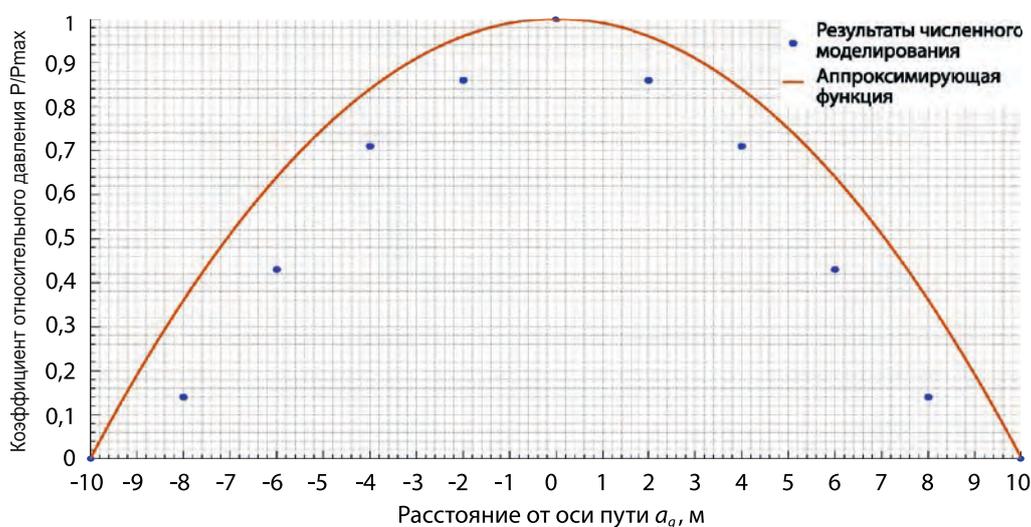
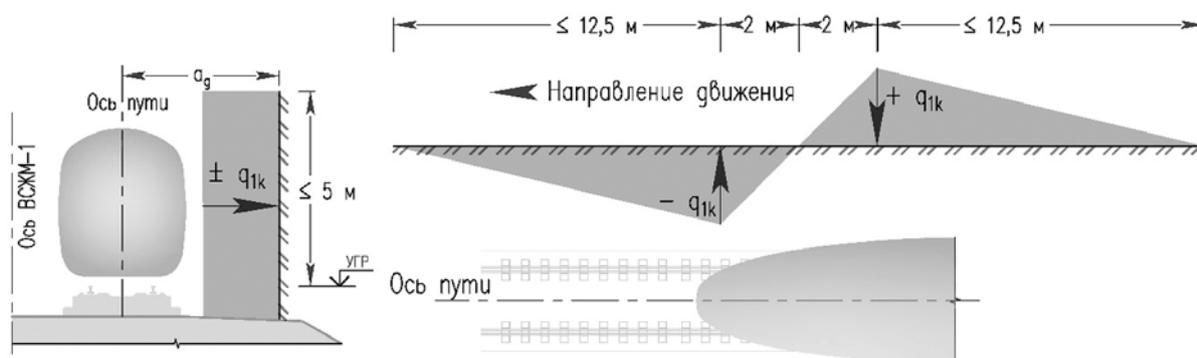


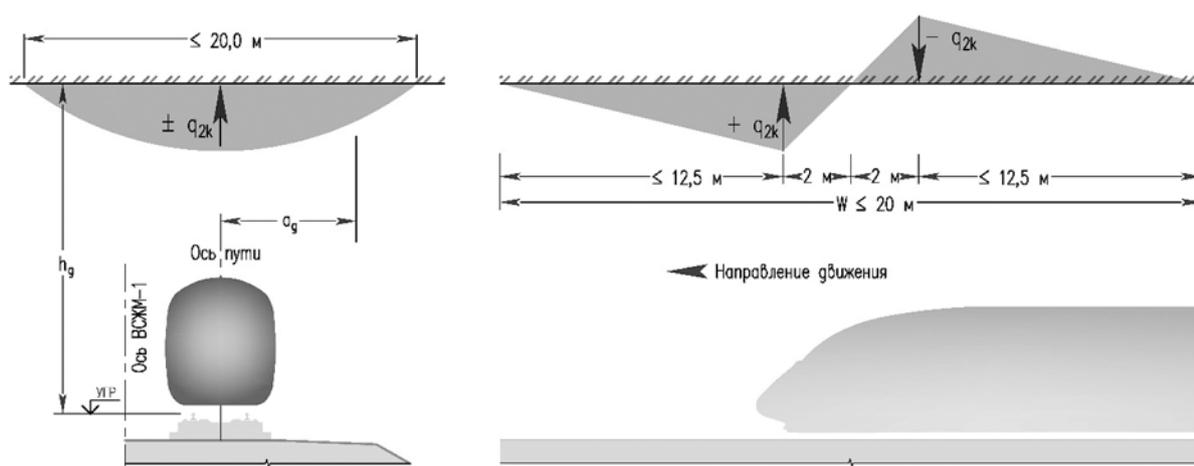
Рис. 7. Поперечное распределение нагрузки от аэродинамического воздействия на горизонтальную поверхность над осью пути



**Рис. 8.** Подвижной состав с наиболее характерными очертаниями кузовов.  
Фотографии предоставлены авторами



**Рис. 9.** Схема приложения эквивалентных нагрузок от аэродинамического воздействия на вертикальную поверхность, расположенную параллельно оси пути



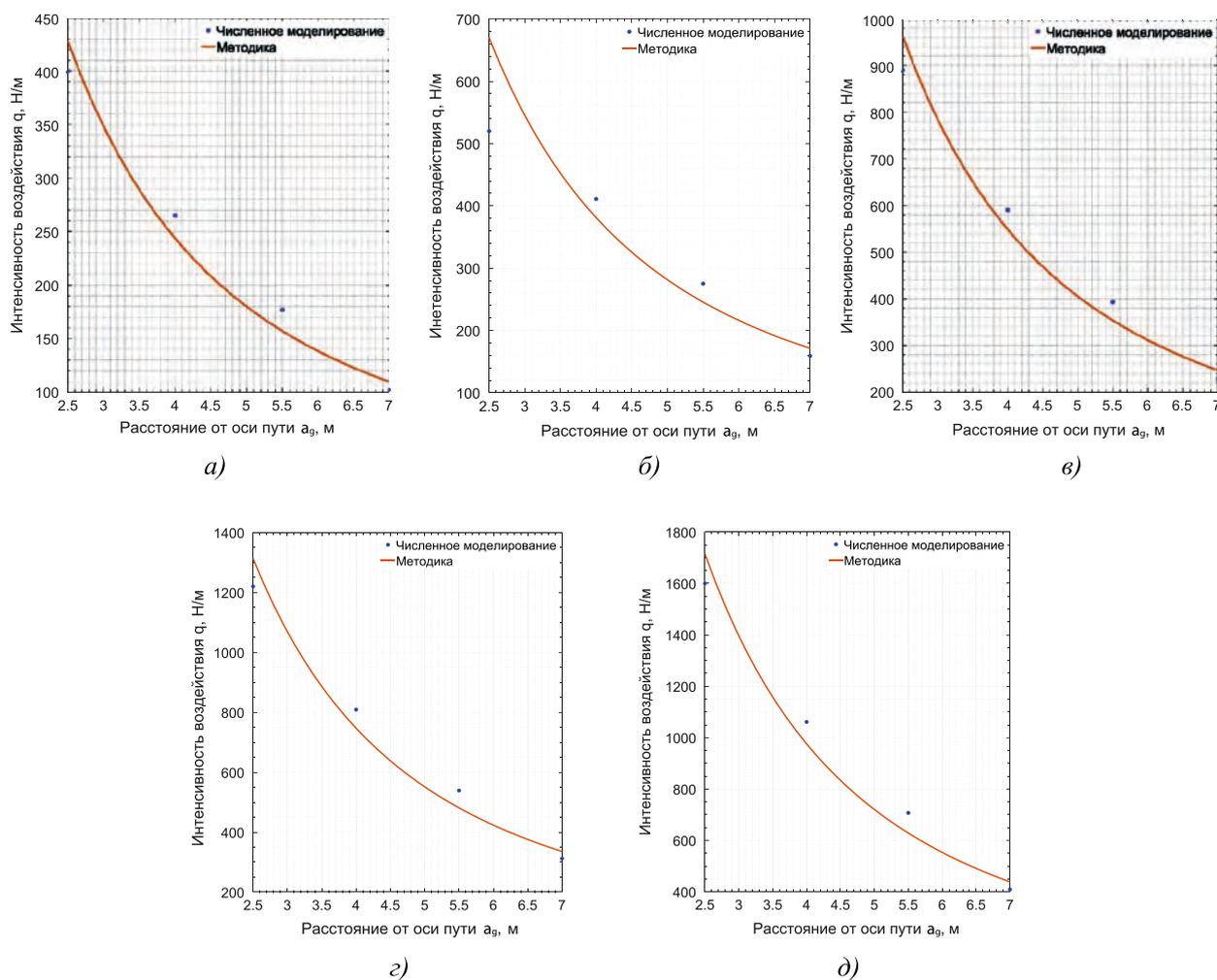
**Рис. 10.** Схема приложения эквивалентных нагрузок от аэродинамического воздействия на горизонтальную поверхность, расположенную над путем

приведены на рис. 6, а, для вертикальной поверхности, расположенной параллельно оси пути, и рис. 6, б, для горизонтальных поверхностей, расположенных над подвижным составом.

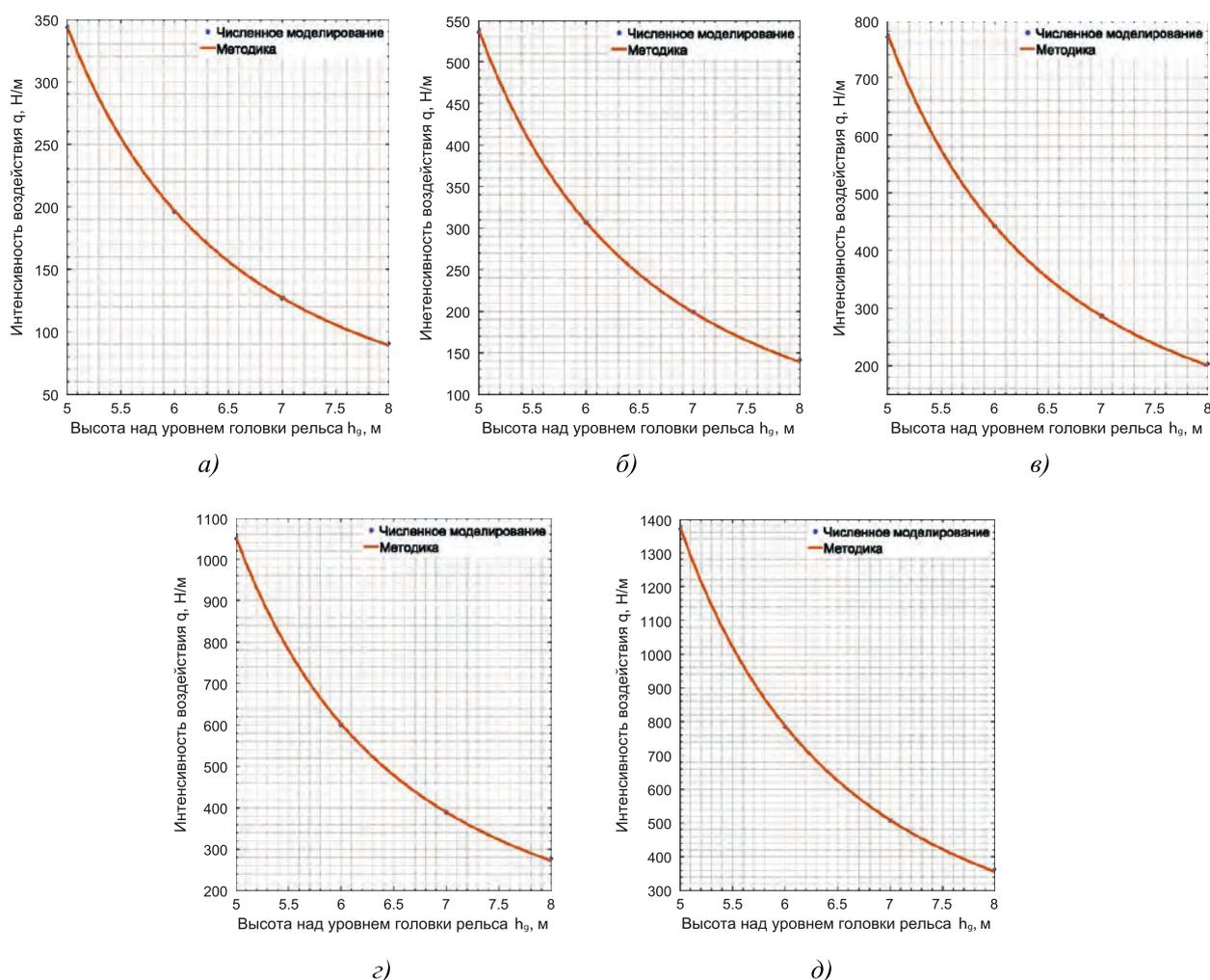
Оценка достоверности результатов представленной методики выполнена путем сопоставления с результатами, полученными путем прямого моделирования численного эксперимента в программном комплексе. Графики сопоставления величин интенсив-

ностей эквивалентных аэродинамических нагрузок, полученных методом прямого расчета и согласно методике, приведены на рис. 11, 12.

Сопоставление результатов численного моделирования в программном комплексе и предлагаемой методики демонстрирует их высокую степень сходимости, что подтверждает возможность ее практического применения при проектировании объектов инфраструктуры ВСЖМ.



**Рис. 11.** Графики сопоставления величины аэродинамического воздействия на вертикальную поверхность, расположенную вдоль оси пути, полученные численным моделированием в программном комплексе и по предлагаемой методике при скоростях движения: *a* — 200 км/ч, *б* — 250 км/ч, *в* — 300 км/ч, *г* — 350 км/ч, *д* — 400 км/ч



**Рис. 12.** Графики сопоставления величины аэродинамического воздействия на горизонтальную поверхность над путем, полученные с помощью численного моделирования в программном комплексе и по предлагаемой методике при скоростях движения:  
*a* — 200 км/ч, *б* — 250 км/ч, *в* — 300 км/ч, *г* — 350 км/ч, *д* — 400 км/ч

**Заключение**

В настоящей статье были рассмотрены вопросы актуализации и совершенствования методики учета аэродинамического воздействия от высокоскоростных поездов на объекты инфраструктуры.

На основании результатов анализа существующих отечественных разработок и исследований в части аэродинамического воздействия подвижного состава и инфраструктуры был сделан вывод о его недостаточной из-

ученности. В качестве метода исследования было выбрано численное моделирование в программном комплексе вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX. Также для комплексного исследования аэродинамического воздействия и верификации расчетных моделей были выполнены экспериментальные измерения аэродинамического воздействия высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на линии Санкт-Петербург — Москва при скоростях движения до 250 км/ч.

В дальнейшем путем прямого численного моделирования были определены распределения нагрузок от аэродинамического воздействия для двух наиболее характерных расчетных случаев: воздействие на вертикальные конструкции, расположенные параллельно оси пути, и воздействие на горизонтальные конструкции, расположенные над поездом. Сопоставление полученных результатов интенсивностей нагрузок и их распределения с аналогичными результатами, полученными по действующим методикам, демонстрирует необходимость корректировки существующей методики.

В заключение были представлены результаты корректировки схем приложения нагрузок от аэродинамического воздействия и их интенсивностей.

### Библиографический список

1. Смирнов В. Н., Дьяченко Л. К., Дьяченко А. О. Особенности проектирования мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях // БРНИ. 2017. № 3. С. 69–81.
2. Бенин А. В., Дьяченко Л. К., Смирнов В. Н. Особенности проектирования и строительства мостов высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Казань // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2015. № 4 (45). С. 15–20.
3. Дьяченко Л. К., Воробьев Д. Е., Барановский А. А. Особенности аэродинамического воздействия высокоскоростных поездов на объекты инфраструктуры // Новые технологии в мостостроении: сб. трудов Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 28 апреля 2017 года. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2018. С. 66–75.
4. Лазаренко Ю. М., Капускин А. Н. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 4. С. 11–14.
5. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 1. Fundamentals // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118, iss. 1201. P. 201–228.
6. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 2. Application // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118, iss. 1202. P. 345–382.
7. Проектирование защитных сооружений приближенных строений железнодорожной инфраструктуры на основе методики оценки аэродинамического влияния высокоскоростного подвижного состава / Ватулина Е. Я., Комиссаров Е. В., Поляков Б. О. и др. // Вестник научных конференций. 2016. № 4–2. С. 26–34.
8. Указания по проектированию мостов для головного участка Ленинград — Москва высокоскоростной пассажирской магистрали «Центр — Юг». Л., 1990. 29 с.
9. Богданов Г. И., Смирнов В. Н. Из истории разработки проекта специальных технических условий для проектирования мостов на ВСМ-2 Москва — Казань // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему): сб. трудов Международной научно-технической конференции 2015 года, Санкт-Петербург, 21–22 апреля 2015 года. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. С. 57–67.
10. Специальные технические условия «Сооружения искусственного участка Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Казань — Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству». СПб., 2016.
11. Методика расчета аэродинамического воздействия от высокоскоростных поездов при скоростях движения 400 км/ч и ветра на конструкции пролетных строений мостовых сооружений, а также на конструкции объектов инфраструктуры, расположенных в непосредственной близости от желез-

нодорожного пути (для опытного применения на высокоскоростных железнодорожных магистралях). М., 2016.

12. Комплексные измерения динамического и аэродинамического воздействий высокоскоростного подвижного состава на мостовые сооружения / Лабутин Н. А., Ланг А. В., Луковников Е. Е. и др. // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в двух томах, Санкт-Петербург, 18–25 апреля 2022 года. Т. 1. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2022. С. 34–38.

13. Лабутин Н. А., Дьяченко Л. К., Ланг А. В. Экспериментальные измерения аэродинамики подвижного состава // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (62). С. 40–48.

14. Айрапетов А. Б., Катунин А. В. Исследование картины аэродинамического взаимодействия скоростного поезда, движущегося под конструкцией автомобильного путепровода на установке прямого движения // Материалы XXVII научно-технической конференции по аэродинамике, Жуковский, Московская область, 21–22 апреля 2016 года / Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ). Жуковский: Централь-

ный аэрогидродинамический институт имени проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ). 2016. С. 23–24.

15. Белостоцкий А. М., Акимов П. А., Афанасьева И. Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства: учеб. пособие. М.: АСВ, 2017. 720 с.

16. Лабутин Н. А. Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры // Мир транспорта. 2022. Т. 20, № 4 (101). С. 6–16.

17. Labutin N. A., Benin A. V., Diachenko L. K. Experimental verification of a simulation model of high-speed train aerodynamic impact on railway infrastructure. Civil Engineering Conference (CEC 2022) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2022. No. 1252. С. 1–8.

Дата поступления: 15.11.2023

Решение о публикации: 15.01.2024

#### **Контактная информация:**

ЛАБУТИН Никита Андреевич — аспирант, инженер; labutin@pgups.ru

ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович — канд. техн. наук, генеральный директор;

lkdiachenko@ebs-spb.tech

ЛУКОВНИКОВ Егор Евгеньевич — аспирант; lee0202@vk.com

## Updating the methodology for considering the aerodynamic impact from trains on high-speed railways

N. A. Labutin<sup>1</sup>, L. K. Diachenko<sup>2</sup>, E. E. Lukovnikov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>1,2</sup> “Engineering bureau of structures” LLC, 113a, nab. reki Fontanki, Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** Labutin N. A., D'yachenko L. K., Lukovnikov E. E. Updating the methodology for considering the aerodynamic impact from trains on high-speed railways. Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 142–155. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-142-155. (In Russian)

### Abstract

In the calculation of structures located near railway tracks (noise protection screens along the tracks, overpasses over high-speed railway lines (HSM) of deck elements with downhill driving, etc.), the aerodynamic effects of high-speed trains shall be considered. **Objective:** study of the aerodynamic impact of a moving high-speed train on structures and structures, Located in the immediate vicinity of the high-speed railway line with subsequent adjustment of the current regulatory framework for the design of TSM infrastructure facilities. **Methods:** mathematical modeling in a specialized software complex of computational hydrogas dynamics with experimental verification of the developed calculation models and subsequent analysis and generalization of the obtained results. **Results:** distribution patterns and aerodynamic intensities from a moving high-speed train for the two most characteristic design cases: impact on a vertical surface parallel to the track axis and on a horizontal surface, located above the axis of train movement. For the calculation cases under consideration, the intensity of the impact was related to parameters such as the distance to the structure from the path axis (for the vertical surface) and the height above the rail head (for the horizontal surface). **Practical importance:** the need Development of proposals for adjustment and addition of the current regulatory framework for the design of structures and structures included in the infrastructure of high-speed railway lines.

**Keywords:** high-speed railway, high-speed line, aerodynamics, aerodynamic impact, high-speed train, infrastructure, infrastructure facilities.

### References

1. Smirnov V. N., D'yachenko L. K., D'yachenko A. O. Osobennosti proektirovaniya mostov na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah // BRNI. 2017. No. 3. S. 69–81. (In Russian)
2. Benin A. V., D'yachenko L. K., Smirnov V. N. Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva mostov vysokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva — Kazan' // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2015. No. 4 (45). S. 15–20. (In Russian)
3. D'yachenko L. K., Vorob'ev D. E., Baranovskij A. A. Osobennosti aerodinamicheskogo vozdejstviya vysokoskorostnyh poezdov na ob'ekty infrastruktury // Novye tekhnologii v mostostroenii: sb. trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 28 aprelya 2017 goda. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2018. S. 66–75. (In Russian)
4. Lazarenko Yu. M., Kapuskin A. N. Aerodinamicheskoe vozdejstvie vysokoskorostnogo elektropoezda “Sapsan” na passazhirov na platformah i na vstrechnye poezda pri skreshchenii // Vestnik VNIIZHT. 2012. No. 4. S. 11–14. (In Russian)
5. Baker S. J. A review of train aerodynamics. Part 1. Fundamentals // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118, iss. 1201. P. 201–228.
6. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 2. Application // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118, iss. 1202. P. 345–382.

7. Proektirovanie zashchitnyh sooruzhenij priblizhennyh stroenij zheleznodorozhnoj infrastruktury na osnove metodiki ocenki aerodinamicheskogo vliyaniya vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava / E. Ya. Vatulina, E. V. Komissarov, B. O. Polyakov i dr. // Vestnik nauchnyh konferencij. 2016. No. 4–2. S. 26–34. (In Russian)

8. Ukazaniya po proektirovaniyu mostov dlya golovnogo uchastka Leningrad — Moskva vysokoskorostnoj passazhirskoj magistrali “Centr — Yug”. L., 1990. 29 s. (In Russian)

9. Bogdanov G. I., Smirnov V. N. Iz istorii razrabotki proekta special’nyh tekhnicheskikh uslovij dlya proektirovaniya mostov na VSM-2 Moskva — Kazan’ // Novye tekhnologii v mostostroenii (ot proshlogo k budushchemu): sb. trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii 2015 goda, Sankt-Peterburg, 21–22 aprelya 2015 goda. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2015. S. 57–67. (In Russian)

10. Special’nye tekhnicheskie usloviya “Soorzheniya iskusstvennogo uchastka Moskva — Kazan’ vysokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva — Kazan’ — Ekaterinburg. Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel’stvu”. SPb., 2016. (In Russian)

11. Metodika rascheta aerodinamicheskogo vozdejstviya ot vysokoskorostnyh poezdov pri skorostyah dvizheniya 400 km/ch i vetra na konstrukcii proletnyh stroenij mostovyh sooruzhenij, a takzhe na konstrukcii ob’ektov infrastruktury, raspolozhennyh v neposredstvennoj blizosti ot zheleznodorozhnogo puti (dlya opytnogo primeneniya na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah). M., 2016. (In Russian)

12. Kompleksnye izmereniya dinamicheskogo i aerodinamicheskogo vozdejstvij vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava na mostovye sooruzheniya / Labutin N. A., Lang A. V., Lukovnikov E. E. i dr. // Transport: problemy, idei, perspektivy: sb. trudov LXXXII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh, v dvuh tomah, Sankt-Peterburg, 18–25 aprelya 2022 goda. T. 1. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej

soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2022. S. 34–38. (In Russian)

13. Labutin N. A., D’yachenko L. K., Lang A. V. Eksperimental’nye izmereniya aerodinamiki podvizhnogo sostava // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2022. No. 3 (62). S. 40–48. (In Russian)

14. Ajrapetov A. B., Katunin A. V. Issledovanie kartiny aerodinamicheskogo vzaimodejstviya skorostnogo poezda, dvizhushchegosya pod konstrukciej avtomobil’nogo puteprovoda na ustanovke pryamogo dvizheniya // Materialy XXVII nauchno-tekhnicheskoy konferencii po aerodinamike, Zhukovskij, Moskovskaya oblast’, 21–22 aprelya 2016 goda / Central’nyj aerogidrodinamicheskij institut imeni prof. N. E. Zhukovskogo (CAGI). Zhukovskij: Central’nyj aerogidrodinamicheskij institut imeni prof. N. E. Zhukovskogo (CAGI). 2016. S. 23–24. (In Russian)

15. Belostockij A. M., Akimov P. A., Afanas’eva I. N. Vychislitel’naya aerodinamika v zadachah stroitel’stva : ucheb. posobie. M.: ASV, 2017. 720 s. (In Russian)

16. Labutin N. A. Razrabotka chislennoj modeli aerodinamicheskogo vzaimodejstviya vysokoskorostnogo poezda, vozduшной sredy i ob’ektov infrastruktury // Mir transporta. 2022. T. 20, no. 4 (101). S. 6–16. (In Russian)

17. Labutin N. A., Benin A. V., Diachenko L. K. Experimental verification of a simulation model of high-speed train aerodynamic impact on railway infrastructure. Civil Engineering Conference (CEC 2022) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2022. No. 1252. P. 1–8.

Received: 15.11.2023

Accepted: 15.01.2024

#### Author’s information:

Nikita A. LABUTIN — Postgraduate Student, engineer; labutin@pgups.ru

Leonid K. DIACHENKO — PhD in Engineering, Chief Executive Officer “Engineering bureau of structures” LLC.; lkdiachenko@ebs-spb.tech

Egor E. LUKOVNIKOV — Postgraduate Student; lee0202@vk.com