

УДК 621.336.7

Математическое моделирование формирования «поршневого эффекта» в тоннельных сооружениях при движении железнодорожного подвижного состава

А. А. Воробьев, Н. В. Богданов

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

Для цитирования: Воробьев А. А., Богданов Н. В. Математическое моделирование формирования «поршневого эффекта» в тоннельных сооружениях при движении железнодорожного подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 121–133. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-121-133

Аннотация

Цель: Исследование формирования возмущенного состояния воздушной среды в условиях аэродинамического взаимодействия подвижного состава с транспортной инфраструктурой. **Методы:** Представлены описание математических моделей и способы их реализации в трехмерной постановке в программном комплексе Solid Works Flow Simulation. Для решения поставленных задач использован метод Frozen Rotor, основанный на методе конечных элементов и объемов. **Результаты:** Приведены результаты исследований скоростей движения воздушных масс вблизи порталной зоны тоннеля, полученные с помощью разработанных математических моделей для случаев входа подвижного состава в тоннель и выхода из него. Выполнена валидация результатов натурных исследований и данных, полученных с помощью компьютерного моделирования. **Практическая значимость:** Проведены натурные исследования по перемещению воздушных масс при движении поезда в тоннеле. Исследованы процессы аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями тоннелей с использованием методов численного моделирования. Выявлена сложная структура образования возмущенных воздушных масс в зазоре между корпусом поезда и обделкой тоннеля, которая приводит к повышенному сопротивлению движения поезда в тоннеле, что влечет за собой снижение энергоэффективности.

Ключевые слова: Аэроупругое взаимодействие, аэродинамические факторы, высокоскоростной подвижной состав, эксперимент, «поршневой эффект», скорость воздушных масс, структура возмущенной воздушной среды, тоннельные сооружения.

Введение

Создание транспортных коммуникаций значительной протяженности, оптимизированных по критерию эффективности энергопотребления, в настоящее время является важнейшей задачей развития железнодорожного транспорта [1–3]. Основным ограничивающим фактором организации высокоскоростных магистралей является необходимость преодоления контурных пре-

пятствий местности, который решается устройством тоннельных сооружений, позволяющих значительно сокращать протяженность трасс, обеспечивать безопасность и бесперебойность движения транспорта в любых климатических условиях с обеспечением необходимого скоростного режима. Особенно это актуально для крупных городских агломераций с перегруженной логистикой наземного транспорта.

Аэродинамическое взаимодействие подвижного состава с воздушной средой в условиях движения в тоннельных сооружениях

Задача исследования аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с транспортной инфраструктурой особенно актуальна для движения транспорта по протяженным подземным сооружениям — тоннелям [4], ограниченность свободного пространства ставит вязкое сопротивление воздушной в лидирующие позиции определяющих факторов энергоэффективности и безопасности.

Кроме того, возмущенные воздушные массы могут оказывать негативное воздействие на пассажиров, находящихся как в салоне транспортного средства, так и вне его, в непосредственной близости от движущегося поезда. При высокоскоростном режиме движения поезда в ограниченном пространстве тоннеля могут возникать значительные перепады давления, величина которых может превышать допустимые пределы (перепад давления в тоннеле не должен превышать 10 кПа) [5–7], ухудшающие самочувствие пассажиров и поездной бригады.

Особое внимание при прохождении поездом тоннеля стоит уделить возникновению «поршневого эффекта»: вытеснение воздушных масс корпусом подвижного состава при его поступательном движении. Возникновение «поршневого эффекта» становится причиной возникновения значительного сопротивления движению и ведет к росту энергозатрат. Этот процесс описывается квадратичной зависимостью:

$$E = \frac{\rho v^2}{2},$$

где E — кинетическая энергия;

ρ — плотность среды;

v — скорость движения подвижного состава.

Также при выполнении расчетов сил сопротивления движению следует учитывать разрежение воздуха, образующееся за последним вагоном подвижного состава. Возникающие при этом силы также направлены против движения поезда и приводят к повышенному расходу энергии.

Таким образом, рассмотренные выше негативные явления значительно снижают эффективность эксплуатации высокоскоростного подвижного состава в тоннельных сооружениях.

Наблюдения показывают, что наибольшее сопротивление движению поезда возникает на порталном участке при входе поезда в тоннель и на выходе из него (соответственно, на конфузоре и диффузоре участка). В соответствии с законом Бернулли снижение сечения вызывает резкое увеличение скорости движения потока воздуха. Возрастание скорости, в свою очередь, ведет к увеличению силового воздействия воздушных масс на подвижной состав и элементы железнодорожной инфраструктуры. Соответственно, при выходе из тоннеля наблюдается резкий выброс уплотненных воздушных масс. Подобный эффект наблюдается и в метрополитенах [8, 9].

Физика данного процесса определяется закономерностью формирования уплотненных воздушных масс при движении высокоскоростного подвижного состава на конфузор-диффузорных участках тоннельных сооружений.

Возникновение сильного сопротивления движению поезда характерно для тоннелей перевального типа протяженностью 10–15 км. Однако подобные тоннели возведены в горной местности на юге и в дальневосточной части России, что представляет определенные трудности для проведения практических исследований.

Адекватная картины процесса формирования структуры воздушной среды в момент прохождения поезда порталного сооружения может быть получена путем синхронного замера (опроса)

датчиков, расположенных на поверхности обтекателя транспортного средства, и обделки тоннеля. Однако проведение натурного эксперимента оказывается крайне энергоемким и затратным мероприятием, сопряженным с рядом ограничений безопасности на транспорте.

Наиболее целесообразным в данной ситуации представляется применение методов численного моделирования. В частности, предлагается использовать средства вычислительной гидродинамики, разработанные CFD-модели, в среде *FlowSimulation* программного комплекса *SolidWorks*.

Поскольку формирование возмущенной среды является многофакторным процессом, в котором учитывается многоаспектная физика взаимодействия сложных вихревых образований, индуцированных подвижным составом, в целях упрощения разработанная модель использует в качестве граничных условий данные, полученные в ходе натурного эксперимента, проведенного в метрополитене [10].

Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования по перемещению воздушных масс были проведены на станции «Обводный канал» ГУП «Петербургский метрополитен». Станция «Обводный канал» входит в состав Фрунзенско-Приморской линии. По своей конструкции относится к станциям пилонного типа глубокого заложения (располагается на глубине 61 м под землей). Длина платформы составляет 165 м.

В обеспечении естественной вентиляции подземных объектов метрополитена особую роль играет «поршневой эффект», вызываемый проходящими в тоннеле поездами. «Поршневой эффект» в тоннеле метрополитена, в отличие от перевальных тоннелей (служащих для преодоления значительных высотных препятствий), помогает создавать достаточную для проветривания

тоннеля скорость движения воздушных масс. Поэтому важно этот процесс контролировать, чтобы скорость движения воздушных масс не выходила за пределы установленных нормативных значений и не создавала угрозу безопасности пассажиров.

В качестве измерительного оборудования использовался электронный анемометр, который располагался в непосредственной близости от пути следования поезда.

Измерения проводились в характерных точках станции согласно схеме, представленной на рис. 1. Высота расположения воздухозаборника оборудования оставляла 1,5–1,7 м над уровнем платформы. Удаление точки замера от порталной части тоннеля варьировалось в диапазоне от 4 до 5 м.

Контрольные точки измерений располагались на участках порталного сооружения тоннеля:

1. Точка «1» — прибытие на станцию поезда, следующего в центр города.
2. Точка «2» — отправление поезда, следующего в центр города.
3. Точка «3» — прибытие на станцию поезда, следующего из центра города.
4. Точка «4» — отправление поезда, следующего из центра города.

Измерения проводились при нормальных климатических условиях: температура — 22–24 °С; относительная влажность воздуха — 60 %; атмосферное давление — 752 мм рт. ст.

В каждой точке было выполнено по 5 измерений. Показания скорости воздушного потока в зависимости от приближения поезда представлены на рис. 2 и 3. Скорость движения подвижного состава в момент выхода из тоннеля составляла 60–70 км/ч.

При приближении поезда к станции наблюдается плавное увеличение скорости движения воздушных масс. Скорость достигает своих пиковых значений, когда поезд пересекает границу пор-

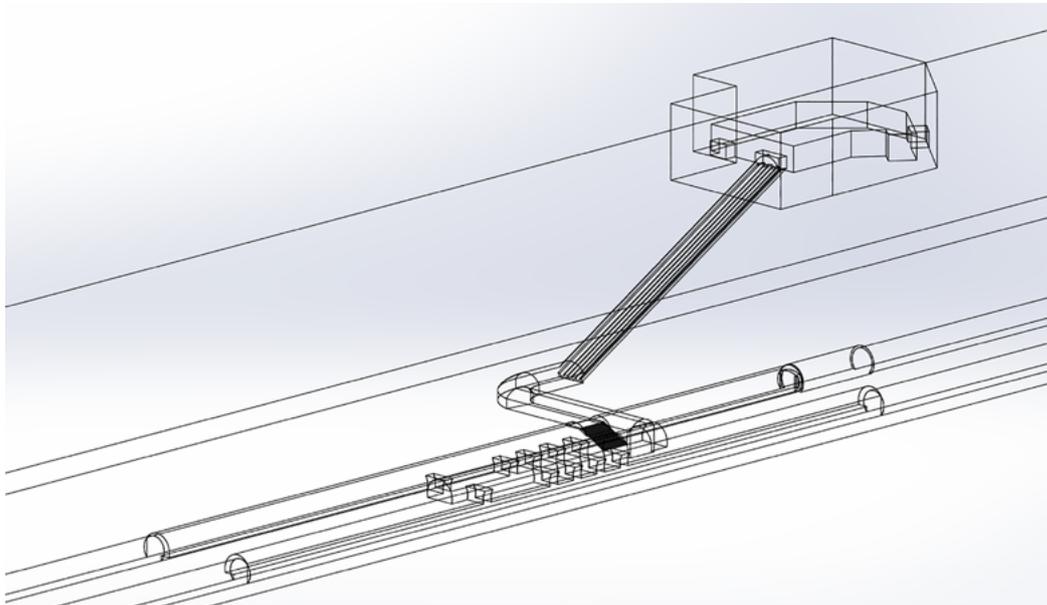
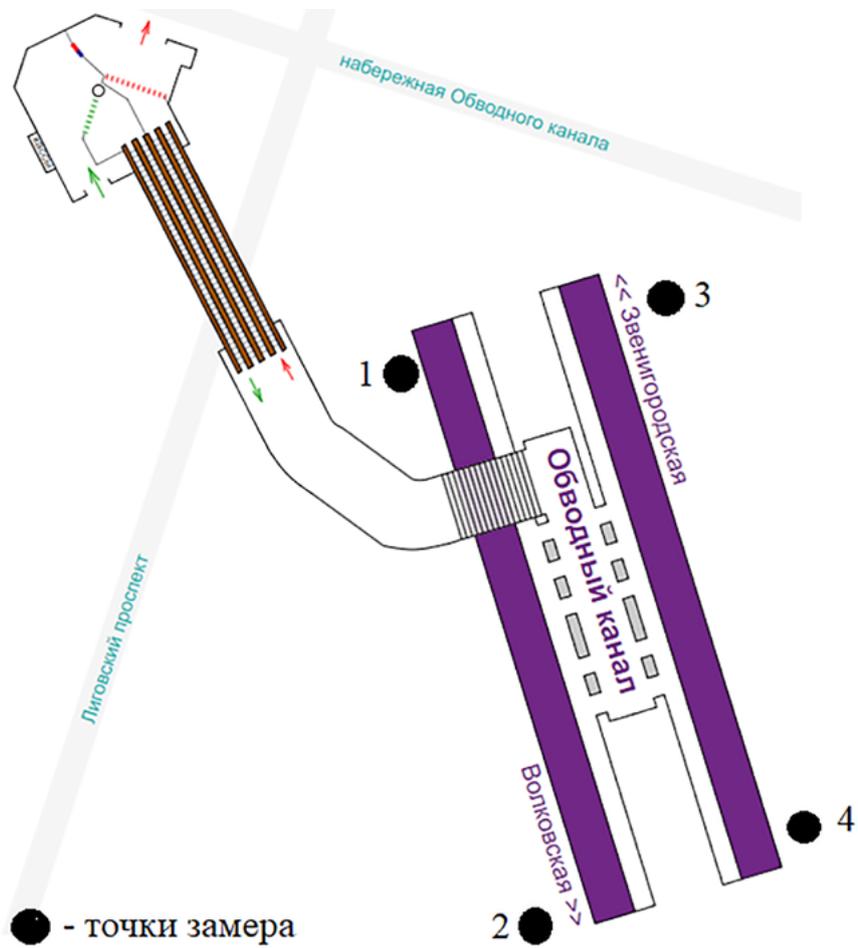


Рис. 1. План и пространственная модель станции «Обводный канал» метрополитена г. Санкт-Петербурга

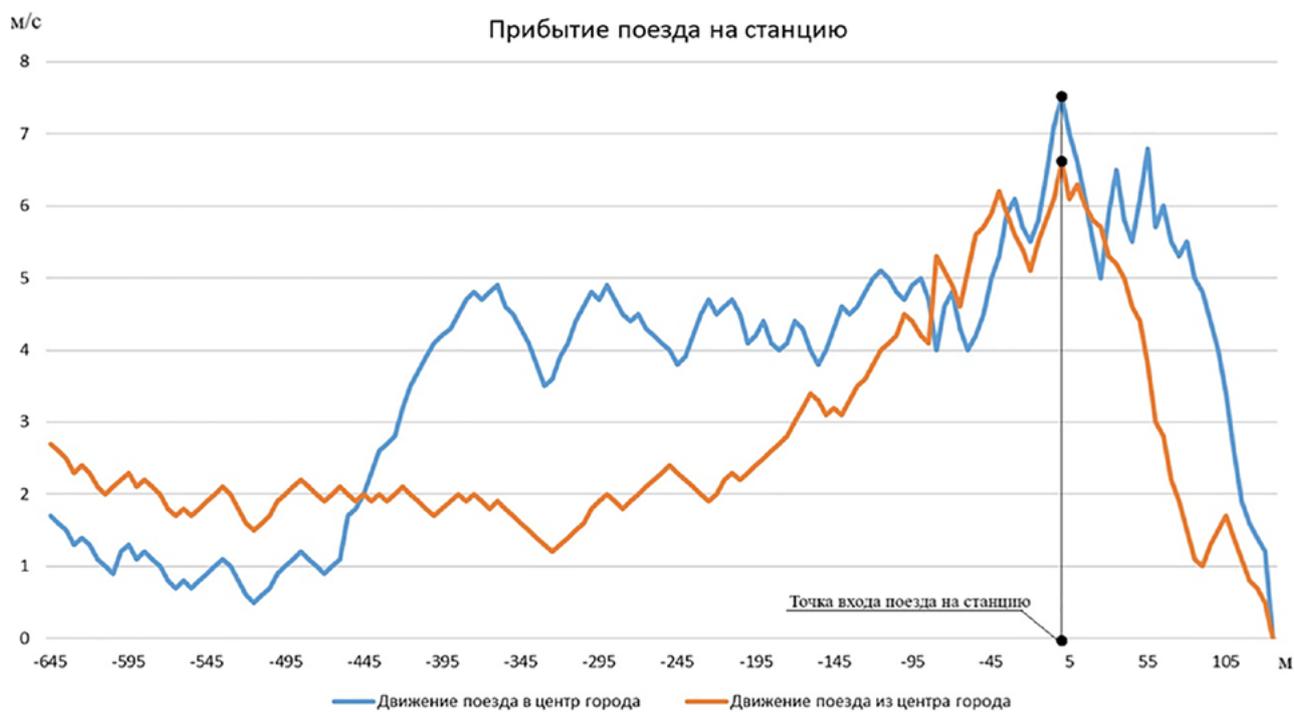


Рис. 2. График изменения скорости движения воздушного потока в точках измерения 1 и 4 в момент прибытия поезда на станцию

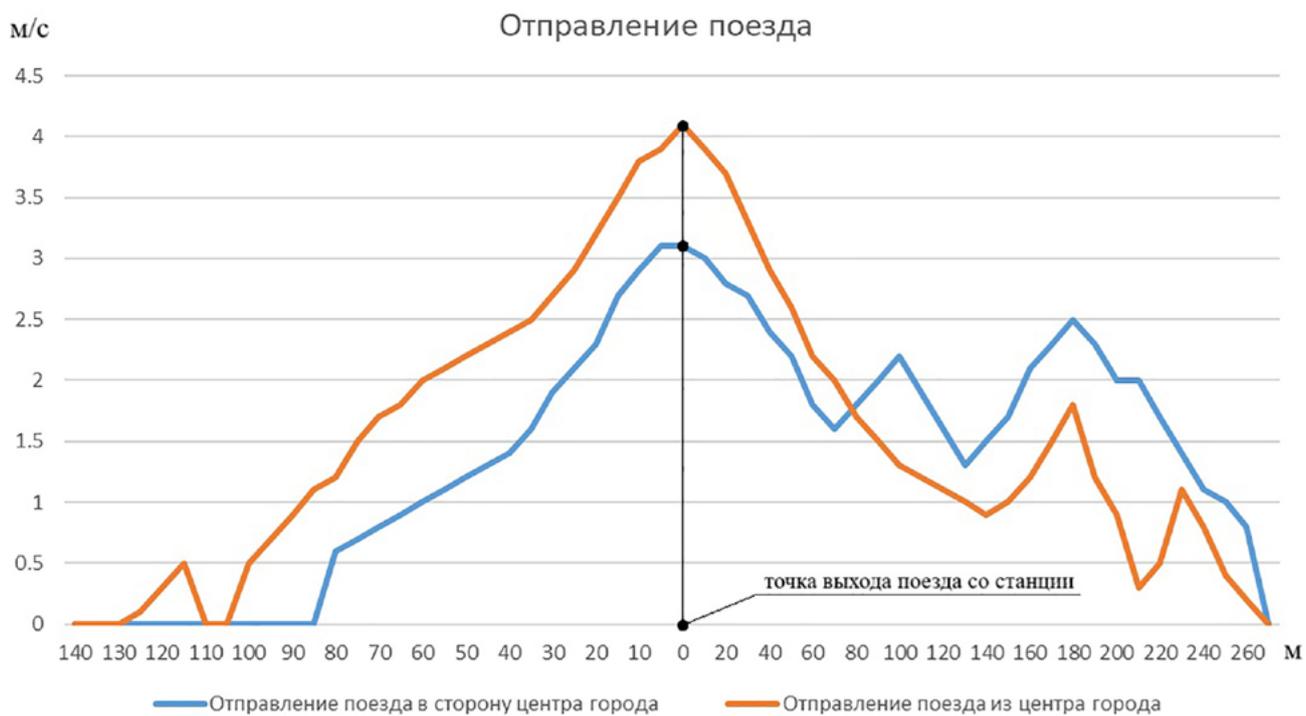


Рис. 3. Скорости движения воздушного потока в момент отправления поезда

1. Подготовка геометрической модели с последующим построением структуры конечных элементов.

2. Выбор начальных и граничных условий, модели турбулентности и, собственно, сам расчет.

3. Анализ результатов, построение эпюр (картин распределения) и графиков давления и скоростей воздушных масс.

В качестве программного комплекса, который способен выполнить поставленные задачи по анализу аэроупругого взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями при стационарной постановке задачи, был выбран программный комплекс *SolidWorks* [14].

В качестве подвижного состава была выбрана распространенная модель электропоезда 81-717/714 (рис. 4)

Принят состав семивагонной схемы, которая на данный момент используется на Фрунзенско-Приморской линии Санкт-Петербургского метрополитена. С целью повышения эффективности компьютерных вычислений модель была редуцирована: был исключен ряд деталей, не влияющих на результат моделирования.

Модель станции «Обводный канал» разрабатывалась согласно представленной выше схеме (рис. 2) с соблюдением основных геометрических параметров. Из расчетов были также исключены элементы железнодорожного пути и оборудование тоннельных помещений.

Анализ аэроупругого взаимодействия на основе численного моделирования с применением метода *Frozen Rotor*

Широкое применение при исследовании функционирования гидравлических систем, в основе которых имеются подвижные и неподвижные элементы, получил метод под названием *Frozen Rotor*. Суть метода заключается в разделении конструкции на две основные составляющие: статор (неподвижная часть) и ротор (подвижная часть).

Данный метод можно адаптировать для решения аэродинамических задач, в частности для расчета движения воздушных масс в зазоре между поездом и обделкой тоннеля. В этом случае подвижной состав является ротором (подвижной частью), а тоннель статором (неподвижной частью). Но так как данный метод предназначен для исследования вращательной системы, принимается допущение о том, что поезд движется по окружности очень большого диаметра, а соответствующие силы и импульсы прикладываются к воздушному потоку. Метод предполагает исследование движения текучей среды в конкретный отрезок времени, соответственно, в этом случае поезд будет двигаться не по окружности, а по прямой (хорде), что будет соответствовать движению в реальности. При этом происходит фиксация поезда в конкретном положении, но поток воздуха продолжает перемещение. Это позволяет исследовать структуру текучей среды для выбранного положения подвижного состава (ротора) относительно тоннельного сооружения (статора) [12–16].

Преимущество данного метода заключается в высокой эффективности и возможности исследовать аэродинамические процессы в различных точках движения поезда.

При расчете применялась распространенная k - ϵ модель турбулентности с построением сеточной структуры, размеры ячеек которой составили 0,25–0,5 м. В качестве граничных условий применены следующие параметры среды: давление — 101 395 Па, температура — 22 °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).

Моделирование производилось в программном комплексе *Solid Works* с использованием модуля *FlowSimulation*. Движение железнодорожного состава выполнено с применением функции *motionrealwall* (движущаяся реальная стена).

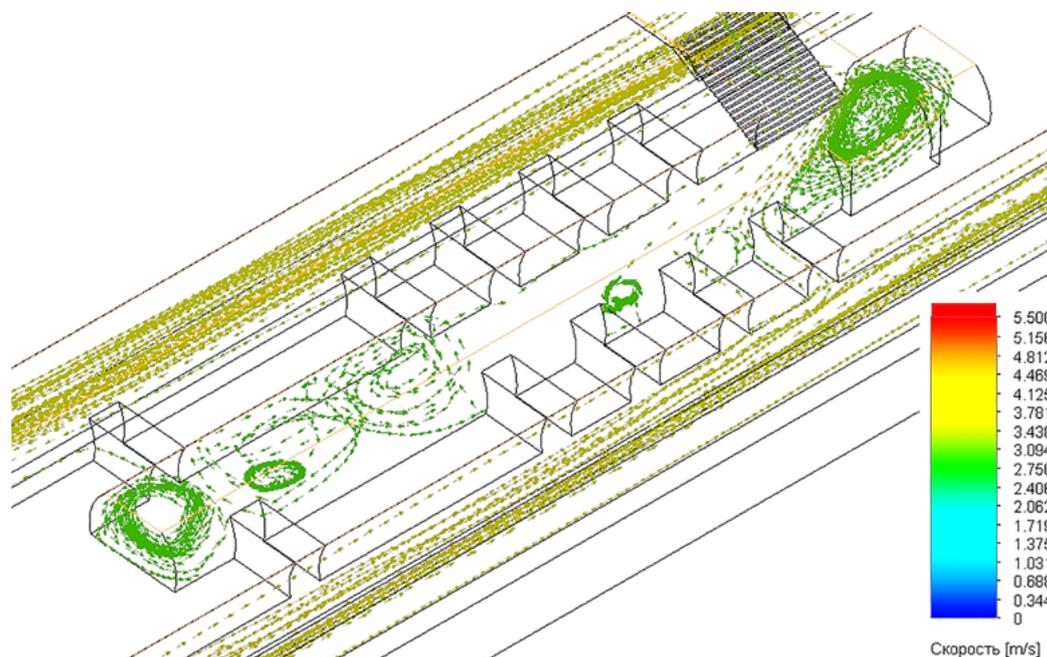


Рис. 5. Эпюра траекторий движения воздушных масс в вестибюле станции

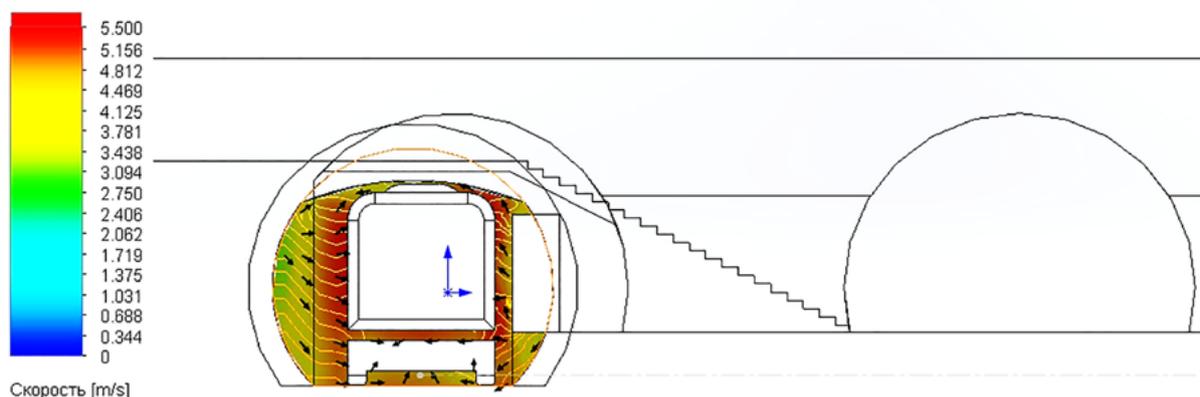


Рис. 6. Эпюра распределения скоростей текучей среды (прибытие поезда) в поперечной плоскости

В качестве примера рассматривался процесс движения состава в момент прибытия на станцию «Обводный канал». Результаты расчетов, полученные данным методом, представлены на рис. 5–9.

При входе поезда на станцию наблюдается увеличение скорости движения воздушных масс в вестибюле станции. Воздушные массы приобретают вихреобразную структуру высокой интенсивности. Особенно это проявляется в пилонной части станции и в зоне наклонного хода (рис. 6).

В зоне порталной части тоннеля в момент, когда головная часть первого вагона входит на станцию, наблюдается интенсивный поток воздушных масс до 5 м/с (рис. 7).

Наиболее сложным участком является порталная часть тоннеля. В этой области образуются интенсивные вихревые образования и высокая скорость движения воздушных масс. Это связано с резким изменением поперечного сечения тоннельного сооружения.

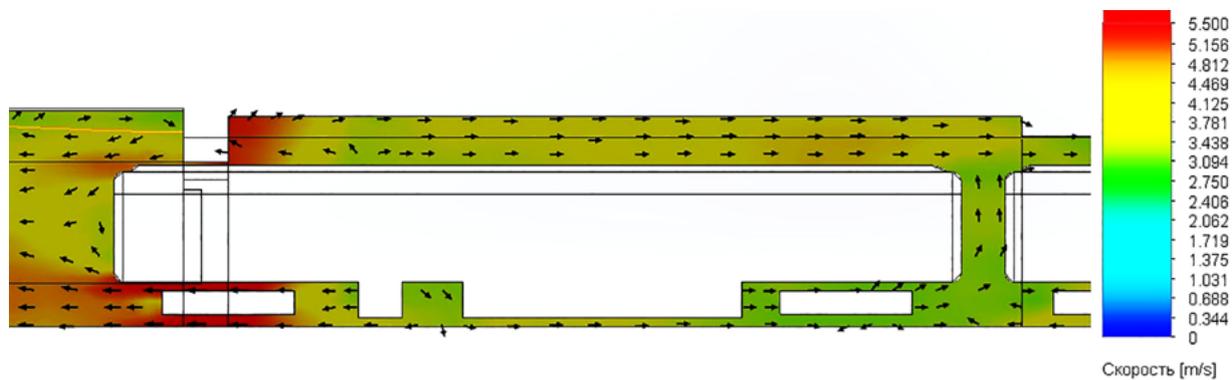


Рис. 7. Эпюра распределения скоростей текучей среды (прибытие поезда) в продольной плоскости

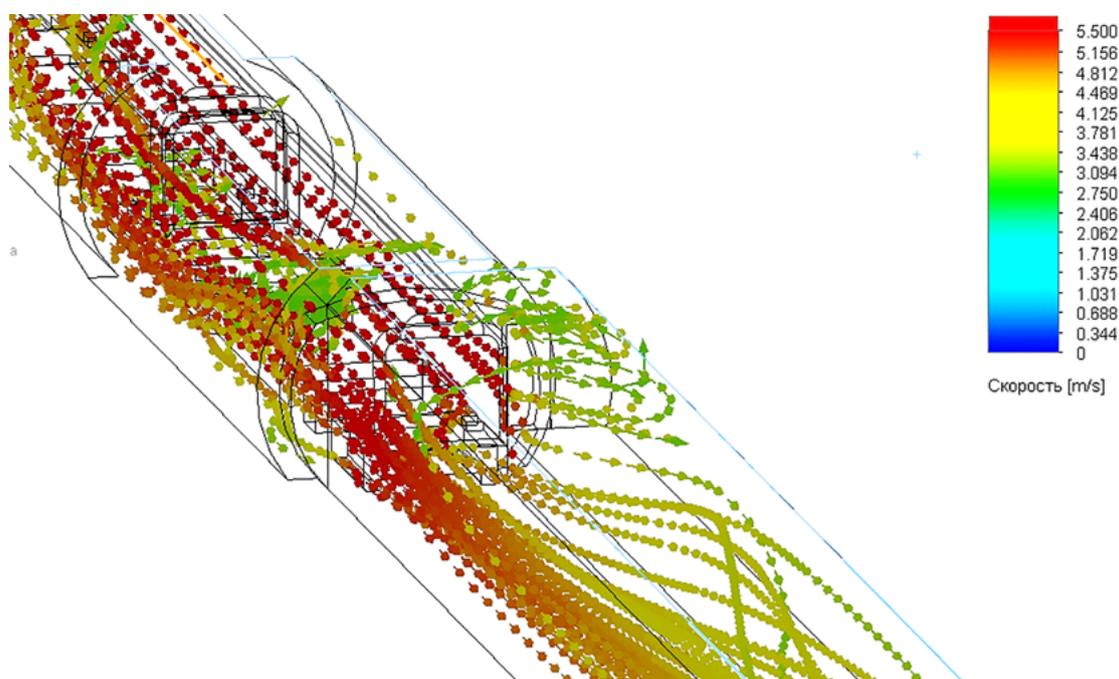


Рис. 8. Эпюра распределения вихревых образований в момент входа состава на станцию

При этом происходит изменение структуры воздушного потока в области портала, воздушные массы уплотняются, наблюдается формирование вихревой структуры. Помимо прочего, увеличивается скорость течения воздуха в подвагонном пространстве (рис. 8).

На эпюрах отчетливо видна высокая скорость движения воздушных масс (до 5,5 м/с), а также неоднородность воздушных масс. Поезд, прибывающий на станцию, с большой силой выталкивает из тоннеля порцию воздуха, которая посте-

пенно набирает скорость и в момент прибытия волнами врывается на платформу, где располагаются пассажиры. Возникающие вихри — очень плотные и препятствуют движению другого воздуха. Взаимодействие вихрей воздуха с движущимся подвижным составом оказывает негативное влияние на тягу. Вихри заполняют все свободное пространство вокруг подвижного состава (рис. 9).

Таким образом, «поршневой эффект» влияет на структуру распределения воздушных потоков

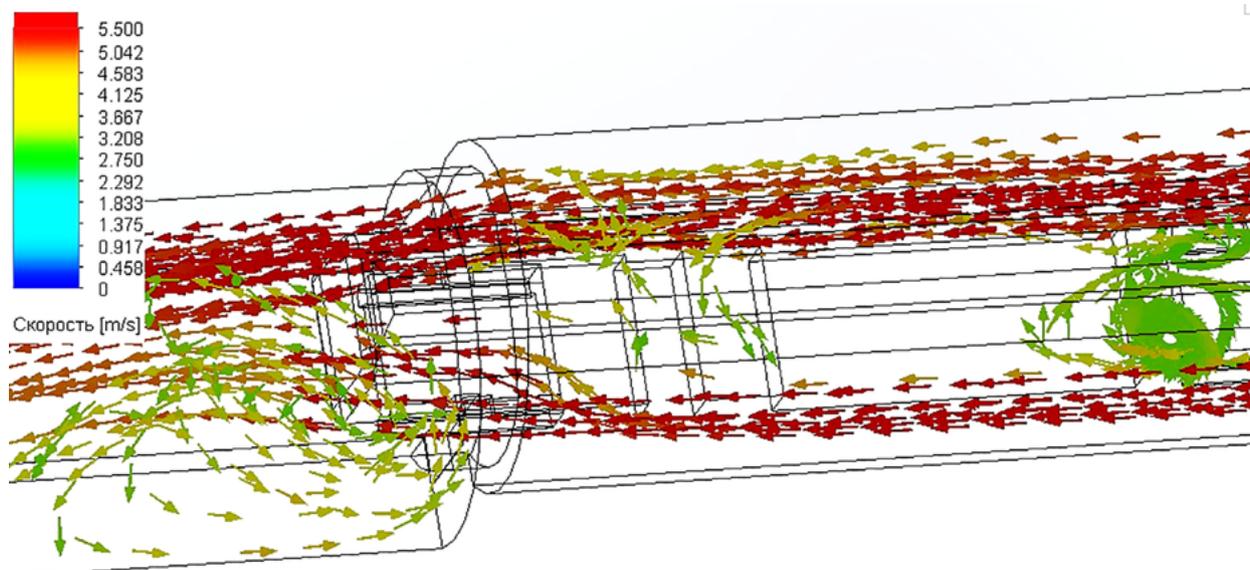


Рис. 9. Эпюра распределения вихревых образований в момент входа состава на станцию

в тоннельных сооружениях, изменяя скорость текучей среды. Образование уплотненных воздушных масс перед составом оказывает дополнительное сопротивление движению поезда, особенно актуально это становится в случае движения высокоскоростного подвижного состава. При этом принудительное перемещение воздуха оказывает положительный эффект на продувку тоннельных сооружений в метрополитене, что улучшает показатели воздухообмена [17].

Заключение

Метод *Frozen Rotor* является современным и удобным методом расчета движения воздушных масс. При сохранении относительной точности сокращается время вычислений. Данный метод отлично подходит для исследования стационарных процессов с простой структурой текучей среды. При этом данный метод не дает возможности рассмотреть движение воздушных масс в динамике. Полученные результаты являются фрагментом сложного процесса, в то время как возникновение «поршневого эффекта» в тоннеле претерпевает изменения на пути движения поезда от станции к станции.

Значения скорости воздушных масс, полученные с использованием методов численного моделирования и метода *Frozen Rotor*, отличаются от тех, что были получены при проведении натурного эксперимента. Это связано с тем, что метод *Frozen Rotor* позволяет оценить воздушные потоки только в конкретный момент времени. По этой причине в настоящее время нет возможности проанализировать «поршневой» эффект в полной мере и отследить его развитие. Кроме того, данный метод не позволяет обнаружить эффект противотока воздуха, который возникает при покидании поездом станции. Последний эффект также представляет интерес для исследования, так как может влиять на энергоэффективность и безопасность пассажиров.

«Поршневой эффект» и эффект противотока воздуха подробнее можно исследовать с помощью более продвинутого и более сложного метода — «деформированные сетки», основанного на создании сеточного пространства, которое может адаптироваться и менять свое положение в зависимости от изменения геометрии области. Главная особенность и преимущество данного метода, в отличие от метода *Frozen Rotor*, заключается в том, что моделирование происходит не

в стационарном режиме, а в динамическом, что дает возможность учесть турбулентные эффекты (вихри, обратные потоки), которые возникают при движении поезда в тоннеле и на станции.

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

Список источников

1. Стратегия развития до 2030 года. — URL: <https://sr2021.rzd.ru/ru/about-company/development-strategy> (дата обращения: 01.11.2024).
2. Ледаев А. П. Особенности проектирования тоннелей на высокоскоростных магистралях / А. П. Ледаев, В. Н. Кавказский, Р. О. Креер // Транспорт Урала. — 2015. — № 4(47). — С. 3–9. — DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-3-9.
3. Воробьев А. А. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений / А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, А. С. Ватаев и др. // Известия ПГУПС. — 2022. — Т. 19. — № 3. — С. 590–599.
4. Кияница Л. А. Исследование динамики давлений на поверхности вагонов поезда в двухпутном тоннеле метрополитена / Л. А. Кияница // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 11. — С. 400–407.
5. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные.
6. 779-11R. Determination of railway tunnel cross sectional areas on the basis of aerodynamic considerations.
7. Нормативные документы. Специальные технические условия. Свод правил. Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий.
8. Каримов Д. Д. Особенности формирования структуры воздушных масс в тоннеле при движении поезда / Д. Д. Каримов, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев и др. // Транспорт БРИКС. — 2023. — Т. 2. — Вып. 2. — Ст. 6. — DOI: 10.46684/2023.2.6.
9. Лугин И. В. Исследование аэродинамических процессов при движении поезда в протяженных железнодорожных тоннелях / И. В. Лугин, Е. Л. Алферова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2018. — Т. 5. — С. 155–160.
10. Богданов Н. В. Обзор методов CFD-моделирования аэродинамических процессов при движении подвижного состава по протяженным подземным сооружениям / Н. В. Богданов, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин и др. // Системы автоматизированного проектирования на транспорте. — 2023. — С. 28–34. — DOI: 56575829.
11. СанПиН 32-02—2003. Метрополитены.
12. Богданов Н. В. Использование численного моделирования при анализе аэроупругого взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями / Н. В. Богданов, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — № 1. — С. 65–73. — DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73.
13. Воробьев А. А. Управление аэродинамическим взаимодействием высокоскоростного поезда с элементами искусственных сооружений тоннельного типа / А. А. Воробьев, Д. Д. Каримов, К. А. Сотников и др. // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2024. — № 1(110). — С. 62–68.
14. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 64 с.
15. Ватаев А. С. Цифровое моделирование аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей / А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 104–123. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123.
16. 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 (научно-технический журнал). 2016. № 6. С. 5–14.
17. Красюк А. М. Исследование воздухораспределения в протяженных транспортных тоннелях БАМ / А. М. Красюк, И. В. Лугин, Е. Л. Алферова // Интерэкспо

ГЕО-Сибирь. — 2019. — Т. 2. — № 4. — С. 114–121. —
DOI: 10.33764/2618-981X-2019-2-4-114-121.

Дата поступления: 08.01.2025

Решение о публикации: 10.02.2025

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук,
проф.; nttk@pgups.ru

БОГДАНОВ Никита Вадимович — магистр, аспирант;
nttk@pgups.ru

Modelling the “Piston Effect” Caused by a Train Running in the Tunnel

A. A. Vorobev, N. V. Bogdanov

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

For citation: Vorobev A. A., Bogdanov N.V. Modelling the “Piston Effect” Caused by a Train Running in the Tunnel // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 121–133. (In Russian)
DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-121-133

Summary

Purpose: To investigate the formation of air turbulence and aerodynamic forces influencing high-speed trains passing through a tunnel. **Methods:** Implementation of three-dimensional numerical models in the software complex “Solid Works Flow Simulation” is presented. To solve the tasks, the Frozen Rotor method was used based on the finite element and volume method. **Results:** The study results on the air mass velocities near the tunnel portal zone using the developed numerical models for the train entering into and exiting the tunnel are presented. The results of field studies and data obtained using computer modelling have been validated. **Practical significance:** Field studies were carried out on the air mass movement during the train run through the tunnel. The aeroelastic interaction of rolling stock with the tunnel portal structures using numerical models have been investigated. The complexity of turbulent air mass formation in the gap between the train body and the tunnel lining resulting in increased air resistance to train movement in the tunnel and reduced energy efficiency have been shown.

Keywords: Aeroelastic interaction, aerodynamic factors, high-speed rolling stock, experiment, “piston effect”, air mass velocity, turbulent air structure, tunnel structures.

References

1. *Strategiya razvitiya do 2030 goda* [Development strategy until 2030]. Available at: <https://sr2021.rzd.ru/ru/about-company/development-strategy> (accessed: November 01, 2024). (In Russian)

2. Ledyayev A. P., Kavkazsky V. N., Kreer R. O. Osobennosti proektirovaniya tonneley na vysokoskorostnykh magistralyakh [Features of tunnel design on high-speed highways]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2015, Iss. 4(47), pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-3-9. (In Russian)

3. Vorobyov A. A., Vatulin Ya. S., Vataev A. S. et al. K voprosu snizheniya negativnogo effekta vozdeystviya aerouprugogo vzaimodeystviya vysokoskorostnogo podvizh-

nogo sostava s elementami tonnel'nykh sooruzheniy [On the issue of reducing the negative effect of the aeroelastic interaction of high-speed rolling stock with elements of tunnel structures]. *Izvestia PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 590–599. (In Russian)

4. Kiyantsa L. A. Issledovanie dinamiki davleniy na poverkhnosti vagonov poezda v dvukhputnom tonnele metro politena [Study of pressure dynamics on the surface of train cars in a double-track metro tunnel]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2016, Iss. 11, pp. 400–407. (In Russian)

5. SP 122.13330.2012. *Tonneli zheleznodorozhnye i avtodorozhnye* [SP 122.13330.2012. Railway and road tunnels]. (In Russian)
6. 779-11R. Determination of railway tunnel cross sectional areas on the basis of aerodynamic considerations.
7. *Normativnye dokumenty. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya. Svod pravil. Sooruzheniya iskusstvennye vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh liniy* [Regulatory documents. Project Specific Technical Specifications. Code of practice. Artificial high-speed railway lines]. (In Russian)
8. Karimov D. D., Vatulin Y. S., Vorobyov A. A. et al. Osobennosti formirovaniya struktury vozdukhnykh mass v tonnele pri dvizhenii poezda [Peculiarities of the formation of the structure of air masses in the tunnel during train movement]. *Transport BRIKS* [BRICS transport]. 2023, vol. 2, Iss. 2, Art. 6. DOI: 10.46684/2023.2.6. (In Russian)
9. Lugin I. V., Alferova E. L. Issledovanie aerodinamicheskikh protsessov pri dvizhenii poezda v protyazhennykh zheleznodorozhnykh tonnelyakh [Study of aerodynamic processes during train movement in long railway tunnels]. *Interekspo GEO-Sibir'* [Interexpo GEO-Siberia]. 2018, vol. 5, pp. 155–160. (In Russian)
10. Bogdanov N. V., Vataev A. S., Vatulin Y. S. et al. Obzor metodov CFD-modelirovaniya aerodinamicheskikh protsessov pri dvizhenii podvizhnogo sostava po protyazhennym podzemnym sooruzheniyam [Review of methods for CFD-modeling of aerodynamic processes when rolling stock moves through extended underground structures]. *Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte* [Computer-aided design systems for transport]. 2023, pp. 28–34. DOI: 56575829. (In Russian)
11. *SanPiN 32-02—2003. Metropoliteny* [SanPiN 32-02—2003. Subways]. (In Russian)
12. Bogdanov N. V., Vatulin Y. S., Vorobyov A. A. et al. Ispol'zovanie chislennogo modelirovaniya pri analize aerouprugogo vzaimodeystviya podvizhnogo sostava s tonnel'nymi sooruzheniyami [The use of numerical modeling in the analysis of aeroelastic interaction of rolling stock with tunnel structures]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2024, Iss. 1, pp. 65–73. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73. (In Russian)
13. Vorobyov A. A., Karimov D. D., Sotnikov K. A. et al. Upravlenie aerodinamicheskimi vzaimodeystviyami vysokoskorostnogo poezda s elementami iskusstvennykh sooruzheniy tonnel'nogo tipa [Control of aerodynamic interaction of a high-speed train with elements of tunnel-type artificial structures]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economics]. 2024, Iss. 1(110), pp. 62–68. (In Russian)
14. Alyamovsky A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 464 p. (In Russian)
15. Vataev A. S., Vatulin Ya. S., Vorobyov A. A. et al. Tsifrovoe modelirovanie aerouprugogo vzaimodeystviya podvizhnogo sostava s portal'nymi sooruzheniyami pereval'nykh tonneley [Digital modeling of aeroelastic interaction of rolling stock with portal structures of transit tunnels]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2022, Iss. 1, pp. 104–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123. (In Russian)
16. Alferova E. L., Lugin I. V., Kiyanitsa L. A. Modelirovanie vozmushcheniy vozdushnogo potoka pri dvizhenii poezdov v dvukhputnom tonnele metropolitena [Modeling of air flow disturbances during train movement in a double-track metro tunnel]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mountain Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2016, Iss. 6, pp. 5–14. (In Russian)
17. Krasnyuk A. M., Lugin I. V., Alferova E. L. Issledovanie vozdukhoraspredeleniya v protyazhennykh transportnykh tonnelyakh BAM [Study of air distribution in long transport tunnels BAM]. *Interekspo GEO-Sibir'* [Interexpo GEO-Siberia]. 2019, vol. 2, Iss. 4, pp. 114–121. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-2-4-114-121. (In Russian)

Received: January 08, 2025

Accepted: February 10, 2025

Author's information:

Alexander A. VOROBIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; nttk@pgups.ru

Nikita V. BOGDANOV — Master's Degree, Postgraduate Student; nttk@pgups.ru