

УДК 624.19:625.1-697.9

Численное моделирование аэродинамических процессов движения воздушных масс в тоннелях метрополитена с учетом «поршневого» воздействия подвижного состава

Д. Д. угли Каримов

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

Для цитирования: Каримов Д. Д. угли. Численное моделирование аэродинамических процессов движения воздушных масс в тоннелях метрополитена с учетом «поршневого» воздействия подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 17–27. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-17-27

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос, является ли верификация численной модели воздухообмена при движении поезда в тоннеле метрополитена, учитывающей процесс взаимодействия штатной вентиляции с поршневым эффектом вытесняемой воздушной среды, корпусом движущегося состава. **Методы:** Сканирование и обработка данных. В качестве оборудования использовалась трубка Пито напорная цилиндрическая PFM 2 для измерения дифференциального давления и измерения скорости потока воздуха, объемного потока и температуры. **Результаты:** Установлена динамическая структура возмущенной текучей среды в момент прибытия состава и его отправления. **Практическая значимость:** Определены факторы конструктивных решений порталной части тоннеля, влияющие на процесс воздухообмена при совместном действии вентиляции и поршневого эффекта движущихся поездов.

Ключевые слова: Поршневой эффект, трубка Пито напорная цилиндрическая PFM, шкафы СЦБ, CFD-моделирование, поле давления, анемометр, температура воздуха.

В работе представлены результаты математического CFD-моделирования аэродинамических процессов формирования «поршневого» эффекта, образующегося при движении поезда в тоннеле метрополитена. Определена структура и параметры динамики движения возмущенной воздушной среды при проходе поезда в районе рамповых и порталных участков при различных схемах воздухообмена системы вентиляции.

В процессе движения поездов в тоннелях метрополитена возникает сложный режим воздухообмена по длине состава. Под воздействием движущихся корпусных элементов поезда происходит вытеснение объемов воздушных масс с

образованием локальных фронтов сжатого и разреженного воздуха. При условии постоянного значения коэффициента блокирования тоннеля, формы и шероховатости поверхности обделки, параметры сжатого и разреженного объемов можно считать относительно постоянными. Поэтому наибольший интерес вызывает участок движения состава в районе конфузурных участков порталной части тоннеля. Процесс еще более усложняется при взаимодействии с активно действующей вентиляцией.

Непосредственный мониторинг аэродинамических процессов сопряжен с рядом сложностей организационно-технического характера,

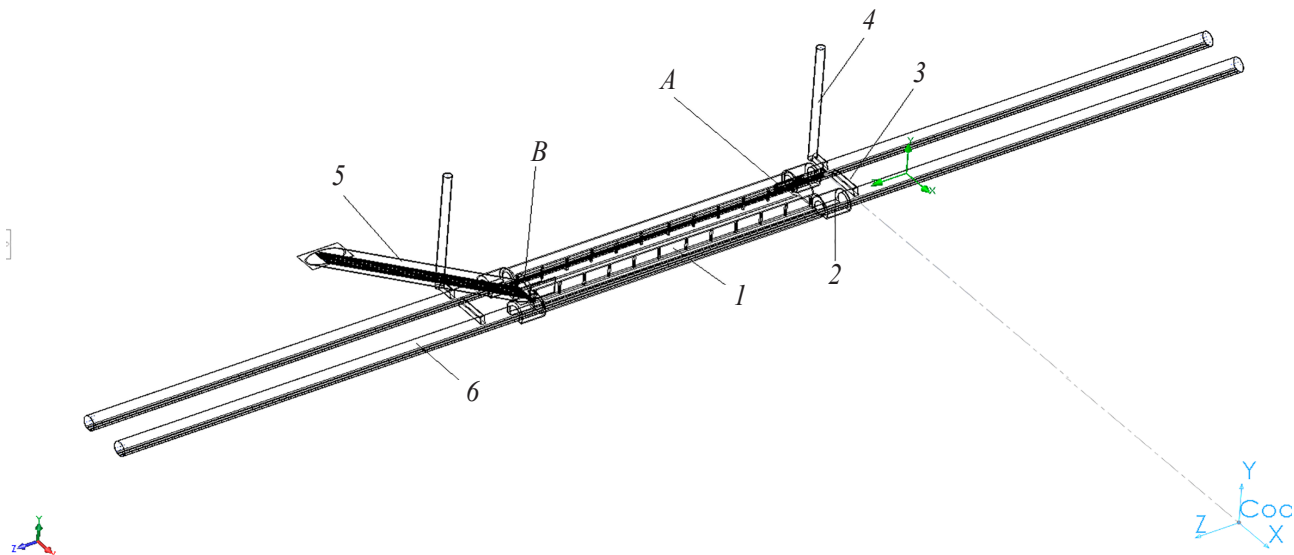


Рис. 1. Элементы станционного узла [1–5]:

1 — рамповый участок, 2 — порталы, 3 — штольня, 4 — станционная камера тоннельной вентиляции, 5 — порталный участок, эскалаторный тоннель, 6 — путевой тоннель;
A, B — точки съема информации аэродинамической нагрузки



Рис. 2. Трубка Пито напорная цилиндрическая PFM 2

в связи с чем рассматривается вариант гибридной модели на основе CFD-модели, построенной в среде FlowSimulation программного комплекса Solid-Works, с использованием уточняющих характеристик, полученных в натурном эксперименте. С этой целью разработана модель типового станционного комплекса глубокого заложения, оснащенная двумя вентиляционными стволами 4 (рис. 1) реверсивной precisely-аспирационной установки. За прототип поезда принята модель 81-740/741

«Русич» производства ОАО «Метровагонмаш».

Информационная модель сложного объекта чаще всего выполняется с определенным упрощением — редуцированием (процедура сниже-

ния размерности решаемой задачи в соответствии с ресурсами существующих технических средств). В частности, редуцирование предполагает изъятие из описания реального прототипа определенных, несущественных компонентов, не оказывающих значительного влияния на основные функции изучаемого объекта.

Установлены следующие допущения: из расчета исключены элементы железнодорожного пути, помещения тягово-понижительной электроподстанции, шкафы СЦБ, подплатформенное пространство со служебными помещениями, вентиляторные устройства представлены виртуальными объектами.

В качестве оборудования использовалась трубка Пито напорная цилиндрическая PFM 2 (рис. 2) — для измерения дифференциального давления и измерения скорости потока воздуха, объемного потока и температуры.

Устройство воспринимает полное давление текучей среды отверстием в торце изогнутой трубки, статическое давление — отверстиями в

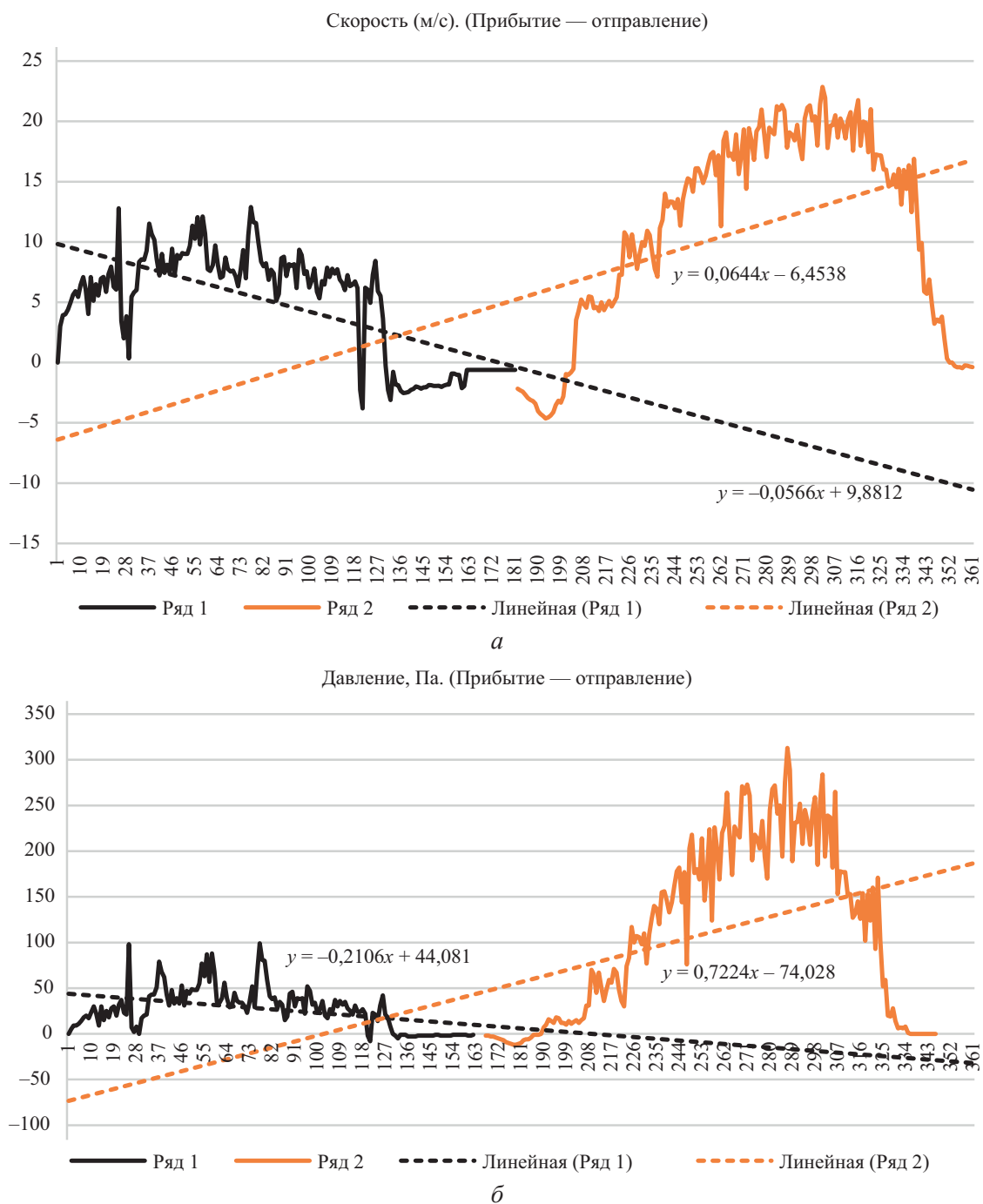


Рис. 3. Показания скорости *a* и избыточного давления *б* воздушного потока, инициированного поездом: торможение состава 40–0 км/ч — черный; разгон состава 0–60 км/ч — красный

стенке внешней трубки. Анемометр имеет встроенный блок автономной памяти на 99 значений для каждого параметра, и USB-адаптер для соединения с компьютером.

Натурный эксперимент по определению динамических параметров воздушной среды

выполнялся в рекреации посадочного вестибюля станции «Ленинский проспект» в крайних точках платформы: точка *A* (рис. 1) — прибытие поезда, точка *B* — отправление. Высота положения воздухозаборная оборудования — 1,2 м над уровнем ramпы.

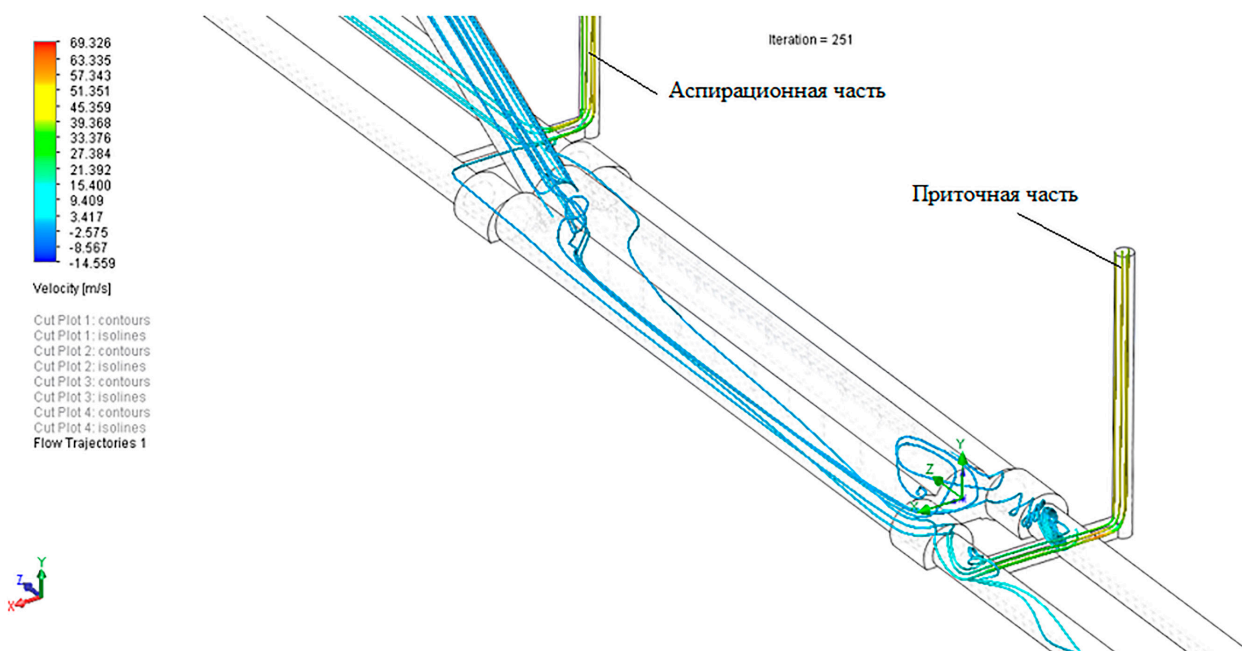


Рис. 4. Эпюра траекторий движения воздушных потоков от нагнетающего вентилятора до аспирационного

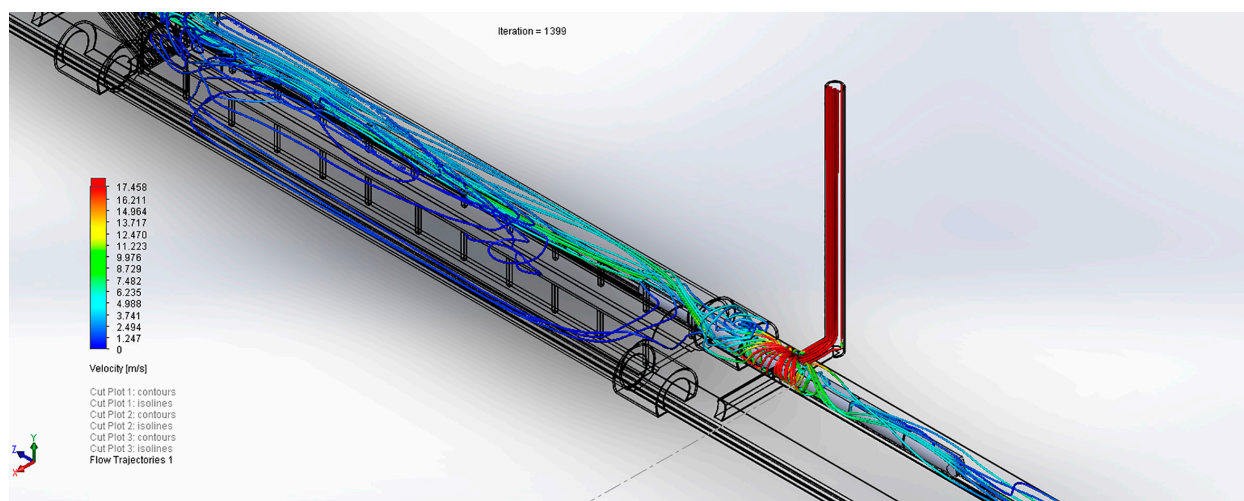


Рис. 5. Эпюра траекторий движения воздушных потоков с учетом поршневого действия поезда и работы вентиляции

CFD-моделирование газодинамических процессов в характерных участках станционного комплекса метрополитена

Для оценки поршневого действия поезда в начале выполняется CFD-моделирование состояния среды при работе только станционного вентиляционного оборудования (рис. 4).

В качестве граничных условий на торцевых сечениях тоннелей и эскалаторного наклонного хода применены следующие параметры среды: давление — 101 395 Па, температура — 20 °С, начальная скорость воздушной среды — 0 м/с. Параметры приточно-аспирационной вентиляции: давление в приточной зоне — 105–725 Па,

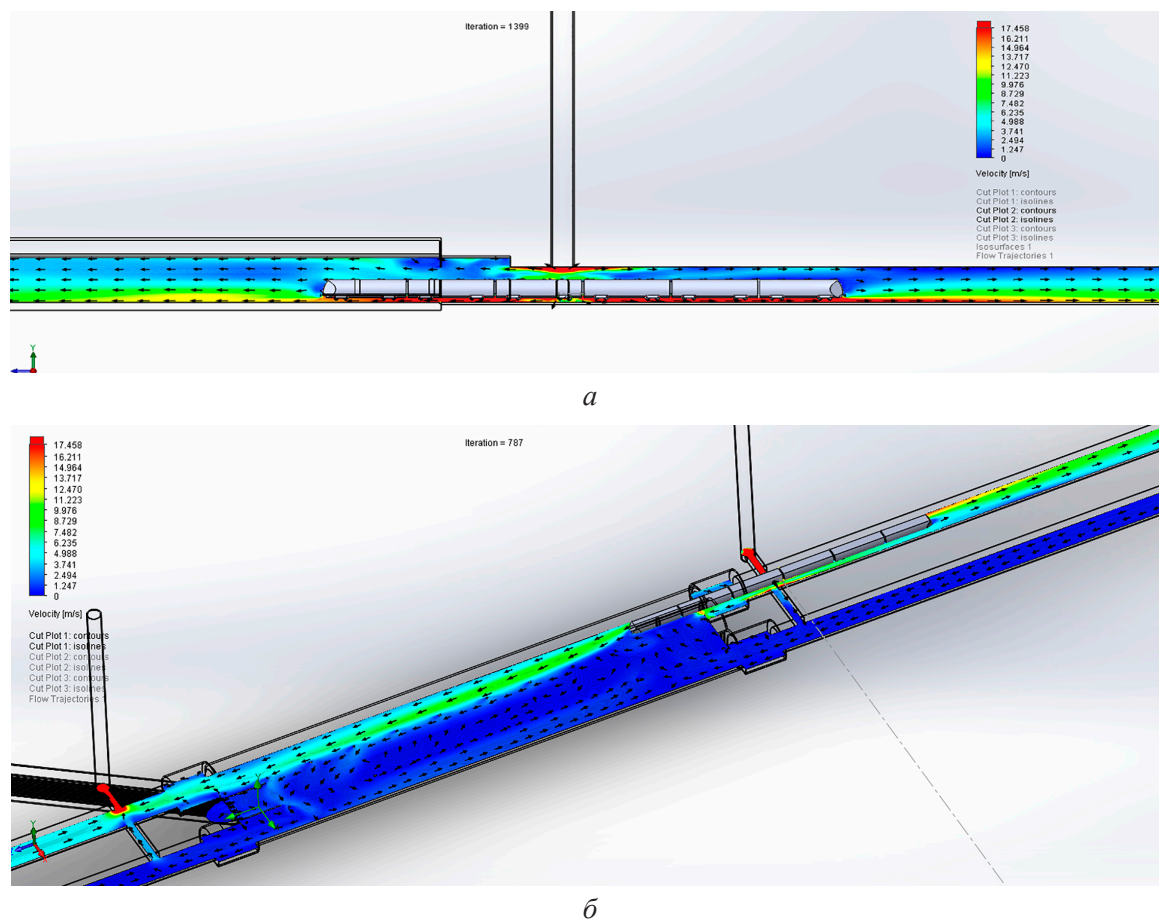


Рис. 6. Эпюра распределения скоростей текучей среды (прибытие поезда): сечение по оси симметрии поезда в вертикальной плоскости *a*; сечение в горизонтальной плоскости *б*

аспирационной — 97 925 Па, температура среды — 20 °С.

По результатам численного моделирования установлено, что наиболее интенсивные вихревые образования формируются непосредственно на порталных участках сопряжения тоннелей со станционным залом, где конструкция тоннеля образует резкое изменение поперечного сечения — конфузур. Скорость потока находится в пределах 2–9 м/с.

Численное моделирование процесса воздухообмена с учетом движения состава выполнена с применением функции *motionrealwall* (движущаяся реальная стена) модуля *FlowSimulation*, реализующей принцип вытеснения объемов

воздушной среды корпусом подвижного состава. В условиях сопротивления зазора (поезд — тоннель) объемы уплотненной воздушной среды смещаются обтекателем со скоростью движения поезда, создавая таким образом «поршневой» эффект.

В модели дополнительно к существующим граничным условиям (вентиляция) добавлены опции *realwall*, *wallmotion*: режим торможения состава — 40–0 км/ч; режим разгона состава — 0–60 км/ч. Рассматривается момент выхода поезда из портала тоннеля.

На рис. 5 представлена эпюра траекторий движения воздушных потоков при работе станционного вентиляционного оборудования с учетом поршневого действия поезда.

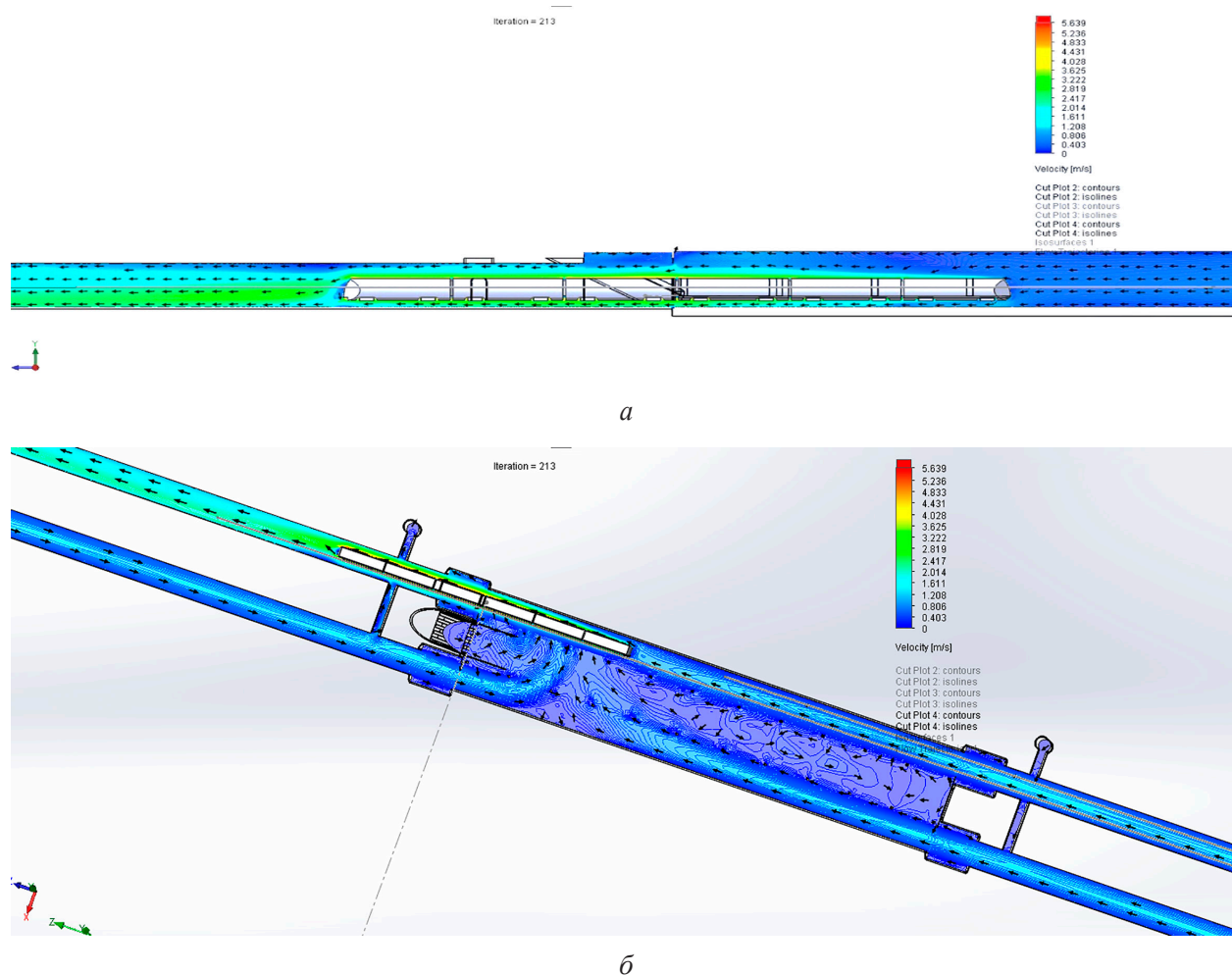


Рис. 7. Эпюра распределения скоростей текучей среды (отправление поезда): сечение по оси симметрии поезда в вертикальной плоскости *a*; сечение в горизонтальной плоскости *б*

Согласно эпюре траекторий перемещение основных объемов воздушной среды происходит в пределах объема путевой части тоннеля с частичным выходом на рамповую часть. Максимальная турбулентность наблюдается в пределах порталной части тоннеля.

Эпюра распределения скоростей текучей среды (рис. 6, 7), построенная по оси симметрии поезда, отражает структуру распределения скоростей в перемещаемом объеме уплотненной воздушной среды «поршневого» эффекта [6, 7].

На эпюре четко просматривается «факел» поршневого эффекта, образующийся перед поездом, и его частичная деформация за счет взаимодействия с тоннельной вентиляцией.

На эпюре представлен процесс увеличения поездом обширных объемов воздушных масс в процессе отправления со станции и входа в тоннель, а также образование поршневого эффекта перед головным вагоном.

Параметры изменения состояния воздушной среды определялись по линии, построенной параллельно движению состава в плоскости, расположенной на дистанции 1,2 м над уровнем рампы вестибюля. Таким образом, моделируется процесс получения данных при проходящем поезде (рис. 8).

Валидация разработанной модели выполнена согласно теории вероятности и математической статистике [8, 9] по обработке результатов пря-

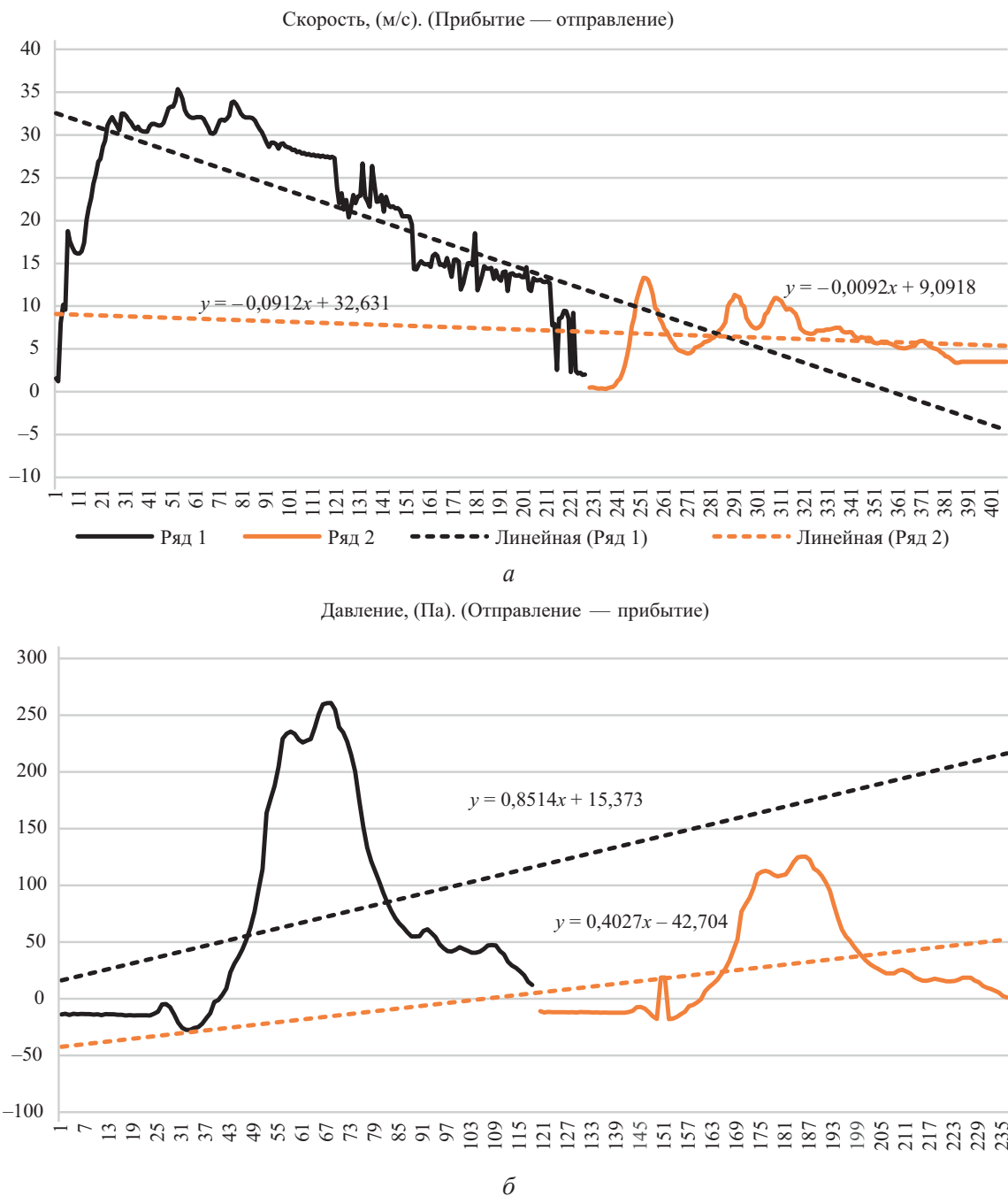


Рис. 8. Результаты численного эксперимента скорости *a* и избыточного давления *б*: торможение состава 40–0 км/ч — черный; разгон состава 0–60 км/ч — красный

мых измерений. Данные по однофакторному анализу приведены в табл. 1 — прибытие состава и табл. 2 — отправление состава.

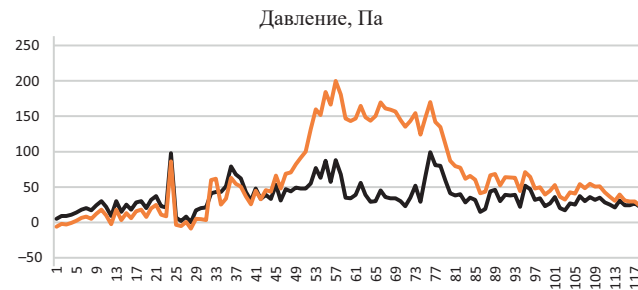
По критерию скорости текучей среды фактическое значение отношения Фишера (12,15) больше критического (3,86), с вероятностью 95 % отклоняется нулевая гипотеза о равенстве

средних данных реального объекта и модели, то есть модель с достаточной точностью описывает поведение реального процесса. По критерию давления текучей среды условие не выполняется.

По критерию скорости текучей среды фактическое значение отношения Фишера (1153,26) больше критического (3,870682), с вероятностью

ТАБЛИЦА 1. Однофакторный анализ результатов измерений

Режим «Прибытие состава» (черный цвет — объект, красный цвет — модель)

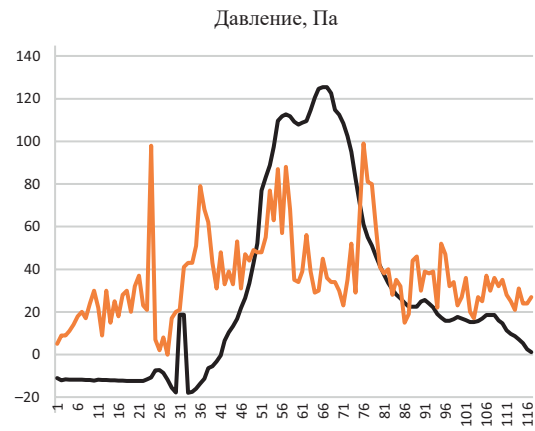
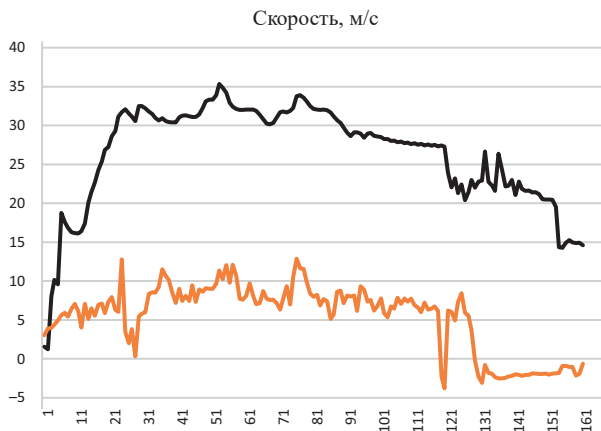


Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	171,92	1	171,92	12,15	0,00055	3,867
Внутри групп	5064,0	358	14,145			
Итого	5235,9	359				

Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	DF	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	3224,124	1	3224,124	2,7373	0,0993	3,881
Внутри групп	275 615,9	234	1177,8			
Итого	278 840	235				

ТАБЛИЦА 2. Однофакторный анализ результатов измерений

Режим «Отправление состава» (черный цвет — модель, красный цвет — объект)



Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	35 535,18	1	35 535,18	1153,26	4E-108	3,870682
Внутри групп	9860,02	320	30,81257			
Итого	45 395,2	321				

Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	3010,304	1	3010,304	2,55043	0,111625	3,881853
Внутри групп	273 832,4	232	1180,312			
Итого	276 842,7	233				

95 % отклоняется нулевая гипотеза о равенстве средних данных реального объекта и модели, то есть модель с достаточной точностью описывает поведение реального процесса. По критерию давления текучей среды условие не выполняется.

Невыполнение условия превышения отношения Фишера по критерию давления объясняется неполными сведениями натурального эксперимента: отсутствует компонента статического давления (трубка Пито не измеряет статическое давление).

Эффект от поршневого действия поезда значительно изменяет структуру распределения воздухообмена в помещениях метрополитена: изменяются объемы, давления, скорости течения воздушных масс по модифицированным трассам. К негативным свойствам данного явления следует отнести определенное повышение энергопотребления за счет увеличения аэродинамического сопротивления передвижению состава, в то же время периодическое преобладание импульсной продувки тоннелей за счет «поршневого» эффекта можно считать положительным свойством для улучшения показателей воздухообмена.

Выводы

1. Разработана математическая модель совместной работы станционной системы вентиляции и «поршневого» эффекта движущихся поездов.
2. Выполнена валидация модели на основе данных, полученных в ходе натурального эксперимента.
3. Установлена динамическая структура возмущенной текучей среды в момент прибытия состава и его отправления.
4. Определены факторы конструктивных решений порталной части тоннеля, влияющие на процесс воздухообмена при совместном действии вентиляции и поршневого эффекта движущихся поездов.
5. Путем анализа результатов численного CFD-моделирования получены параметры поршневого действия поезда: поле давления, скорости перед и за поездом.
6. Установлено, что эффективная длина «поршневого» эффекта, способного создавать дискомфорт для пассажиров, находящихся на перроне станции, составляет 20–25 м, скорость движения воздушных масс при этом достигает 15 м/с.

Библиографический список

1. Бамтоннельпроект. Объекты. — URL: <http://www.btpnsk.ru/objects>.
2. Гендлер С. Г. Исследование вентиляционного и теплового режимов Лысогорского железнодорожного тоннеля / С. Г. Гендлер, В. В. Смирняков, А. Н. Соловьев // ГИАБ. — 2006. — № 3. — С. 133–145.
3. Гендлер С. Г. Выбор рациональной схемы проветривания Кузнецовского железнодорожного тоннеля / С. Г. Гендлер, В. А. Плескунов // ГИАБ. — 2009. — Отдельный выпуск № 13: Аэрология. — С. 81–89.
4. Гендлер С. Г. Проблемы проветривания транспортных тоннелей / С. Г. Гендлер // ГИАБ. Тематическое приложение «Безопасность». — 2005. — С. 281–295.
5. Проектная документация. Строительство нового Байкальского тоннеля на перегоне Дельбичинда — Дабан Восточно-Сибирской железной дороги. Раздел 3. Технологические и конструктивные решения линейного объекта. Искусственные сооружения. — ОАО «СтройТрест». — 2014.
6. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 562 с.
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 464 с.
8. Бурнаева Э. Г. Статистический пакет анализа данных в Excel 2013: учебное пособие / Э. Г. Бурнаева, С. Н. Леора. — СПб.: СПбГУ, 2020. — 40 с.
9. Бараз В. Р. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учебное пособие / В. Р. Бараз, В. Ф. Пегашкин; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). — 2-е изд., перераб. и доп. — Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014 — 181 с.

Дата поступления: 02.02.2022

Решение о публикации: 21.02.2022

Контактная информация:

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

Numerical Simulation of Aerodynamic Processes of Air Mass Movement in Underground Tunnels Taking into Account Piston Impact of Rolling Stock

D. D. ugli Karimov

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

For citation: Karimov D. D. ugli. Numerical Simulation of Aerodynamic Processes of Air Mass Movement in Underground Tunnels Taking into Account Piston Impact of Rolling Stock // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 17–27. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-17-27

Summary

Purpose: To consider the issue on verification of numerical model of air exchange during the movement of a train in a subway tunnel, taking into account the process of interaction of regular ventilation with the piston effect of the displaced air by the body of the moving train. **Methods:** Data scanning and processing. The equipment used was a pressure cylindrical Pitot tube PFM 2 for measuring differential pressure and air flow velocity, volumetric flow and temperature. **Results:** The dynamic structure of disturbed fluid media at the time of rolling stock arrival and departure has been established. **Practical importance:** Factors of design solutions of tunnel portal part affecting the process of air exchange at the combined work of ventilation and piston effect of moving trains have been determined.

Keywords: Piston effect, Pitot cylindrical pressure tube PFM, SCB cabinets, CFD modeling, pressure field, anemometer, air temperature.

References

1. *Bamtonnel'proekt. Ob'ekty* [Bamtunnel project. Objects]. Available at: <http://www.btpnsk.ru/objects>. (in Russian)
2. Gendler S. G. Issledovanie ventilyatsionnogo i teplovogo rezhimov Lysogorskogo zheleznodorozhnogo tonnelya [Study of the ventilation and thermal regimes of the Lysogorsk railway tunnel]. *GIAB* [GIAB]. 2006, I. 3, pp. 133–145. (in Russian)
3. Gendler S. G. Vyor ratsional'noy skhemy provetrivaniya Kuznetsovskogo zheleznodorozhnogo tonnelya [The choice of a rational ventilation scheme for the Kuznetsovsky railway tunnel]. *GIAB* [GIAB]. 2009, pp. 81–89. (in Russian)
4. Gendler S. G. Problemy provetrivaniya transportnykh tonney [Problems of ventilation of transport tunnels]. *GIAB. Tematicheskoe prilozhenie "Bezopasnost"* [GIAB. Thematic application "Security"]. 2005, pp. 281–295. (in Russian)
5. *Proektnaya dokumentatsiya. Stroitel'stvo novogo Baykal'skogo tonnelya na peregone Del'bichinda — Daban Vostochno-Sibirskoy zheleznoy dorogi. Razdel 3. Tekhnologicheskie i konstruktivnye resheniya lineynogo ob'ekta. Iskusstvennye sooruzheniya* [Design documentation. Construction of a new Baikal tunnel on the Delbichinda-Daban section of the East Siberian Railway. Section 3. Technological and design solutions for a linear facility. Artificial constructions]. "StroyTrest" Publ. 2014. (in Russian)
6. Alyamovskiy A. A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2015. 562 p. (in Russian)
7. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 464 p. (in Russian)

8. Burnaeva E. G. *Statisticheskii paket analiza dannykh v Excel 2013* [Statistical data analysis package in Excel 2013]. St. Petersburg: SPbGU Publ., 2020. 40 p. (in Russian)

9. Baraz V. R. Ispol'zovanie MS Excel dlya analiza statisticheskikh dannykh [Excel to analyze statistical data]. *M-vo obrazovaniya i nauki RF; FGAOU VPO "UrFU im. pervogo Prezidenta Rossii B. N. El'sina", Nizhnetagil. tekhn. in-t (filial)* [Ministry of Education and Science of the Russian Federation; FGAOU VPO "UrFU im. the first President of Russia

B. N. Yeltsin", Nizhny Tagil. tech. in-t (branch)]. Nizhny Tagil: NTI (filial) UrFU Publ., 2014. 181 p. (in Russian)

Received: February 2, 2022

Accepted: February 21, 2022

Author's information:

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