

UDC 711  
IRSTI 67.07.11  
RESEARCH ARTICLE

## DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT AIR DEDUSTING

T.I. Irgibayev<sup>1,\*</sup> , L.A. Kiyanitsa<sup>2</sup> , I.V. Lugin<sup>2</sup> , A.M. Krasyuk<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Non-profit Joint Stock Company Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, 050013, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Mining named after N.A. Chinakala of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia

---

**Abstract.** *Among the sources of internal pollution one can point to dust, breath products of passengers, various emissions from finishing materials of trains and metro stations, etc. This problem is usually solved in two ways: wet cleaning of tunnels and stations and using powerful tunnel vacuum cleaners. Both of these methods have common disadvantages. Firstly, dust removal can only be carried out at night, when there are no trains on the line. Secondly, the dust removal installations themselves are expensive and are effective only at low speeds of dust movement through the tunnel. All metros in the world have a problem with dust removal. Research methods include analytical and computational studies of air distribution in the metro ventilation network using mathematical modeling methods using graph theory and flow algorithms, as well as experimental studies of air flow parameters in natural conditions of the Almaty metro. This article proposes an innovative method for dust removal of tunnel air based on the use of piston action of trains and labyrinth filters installed in station ventilation joints. The parameters of the calculation model of the metro line are substantiated on the basis of a decomposition approach to the mathematical modeling of aerodynamic processes by moving from a linear model of the metro line to a periodic open-loop model. Computational aerodynamics methods were used to determine the patterns of changes in air speed through the ventilation vent and the available pressure drop depending on the speed and mode of trains passing through the station.*

**Keywords:** *metro, ventilation, dust, numerical simulation, piston effect, air distribution, ventilation failure.*

---

**\*Corresponding author**

**Tuleukhan Irgibayev**, e-mail: [tuleukhan@mail.ru](mailto:tuleukhan@mail.ru)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-07>

Received 03 November 2023; Revised 20 November 2023; Accepted 01 December 2023

## МЕТРОПОЛИТЕНДЕРДЕ АУАНЫ ШАҢСЫЗДАНДЫРУДЫҢ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Т.И. Иргибаяв<sup>1,\*</sup> , Л.А. Кияница<sup>2</sup> , И.В. Лугин<sup>2</sup> , А.М. Красюк<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,  
050013, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Н.А. Чинакала атындағы тау-кен ісі институты СБ РФА,  
630091, Новосибирск, Ресей

---

**Аңдатпа.** *Ішкі ластану көздерінің арасында шаңды, жолаушылардың тыныс алу өнімдерін, метрополитен құрамдары мен станцияларының әрлеу материалдарынан әртүрлі бөліктерді және т.б. көрсетуге болады. Бұл мәселе әдетте екі тәсілмен шешіледі: тоннельдер мен станцияларды ылғалды жинау және күшті туннельді шаңсорғыштардың көмегімен. Бұл тәсілдердің екеуінде де ортақ кемшіліктер бар. Біріншіден, шаң-тозаң шығару желіде пойыз жоқ түнгі уақытта ғана жүзеге асырылуы мүмкін. Екіншіден, шаң-тозаң шығару қондырғыларының өзі қымбат, тоннель бойымен шаң жылдамдығы аз болғанда ғана тиімді. Әлемнің барлық метрополитендерінде шаң-тозаң шығару проблемасы бар. Зерттеу әдістері графтар теориясын және ағынды алгоритмдерді қолдана отырып, математикалық модельдеу әдістерімен метрополитеннің желілік желісінде ауа таратуды талдамалық және есептеу зерттеулерін, сондай-ақ Алматы метрополитенінің табиғи жағдайында ауа ағыны параметрлерін эксперименттік зерттеуді қамтиды. Мақалада пойыздардың поршеньдік әрекетін және станцияның желдеткіш тораптарында орнатылған лабиринтті сүзгілерді қолдануға негізделген туннель ауасын шаңнан тазартудың инновациялық әдісі ұсынылған. Метрополитен желісінің есептеу моделінің параметрлері метрополитен желісінің сызықтық моделінен периодты ашық контурлы модельге көшу арқылы аэродинамикалық процестерді математикалық модельдеудің декомпозициялық тәсіліне негізделген. Желдеткіш саңылау арқылы ауа жылдамдығының өзгеру заңдылықтарын және станция арқылы өтетін пойыздардың жылдамдығы мен режиміне байланысты қол жетімді қысымның төмендеуін анықтау үшін есептік аэродинамика әдістері қолданылды.*

**Түйін сөздер:** *метрополитен, желдету, шаң, сандық модельдеу, поршеньдік эффект, ауаның таралуы, желдету кептелісі.*

---

**\*Автор-корреспондент**

Түлеухан Иргибаяв, e-mail: [tuleukhan@mail.ru](mailto:tuleukhan@mail.ru)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-07>

Алынды 03 қараша 2023; Қайта қаралды 20 қараша 2023; Қабылданды 01 желтоқсан 2023

УДК 711  
МРНТИ 67.07.11  
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВОЗДУХА В МЕТРОПОЛИТЕНАХ

Т.И. Иргибаяв<sup>1,\*</sup> , Л.А. Кияница<sup>2</sup> , И.В. Лугин<sup>2</sup> , А.М. Красюк<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>НАО Казахский национальный исследовательский технический университет  
им. К.И. Сатпаева, 050013, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Россия

---

**Аннотация.** Среди источников внутреннего загрязнения можно указать на пыль, продукты дыхания пассажиров, различные выделения от материалов отделки составов и станций метрополитена и т.п. Эта проблема обычно решается двумя способами: влажной уборкой тоннелей и станций и с помощью мощных тоннельных пылесосов. Оба эти способа имеют общие недостатки. Во-первых, пылеудаление может осуществляться только в ночное время, когда нет поездов на линии. Во-вторых, сами установки пылеудаления дорогостоящие, эффективны только при малой скорости перемещения пыли по тоннелю. Во всех метрополитенах мира существует проблема пылеудаления. Методы исследования включают проведение аналитических и вычислительных исследований воздухораспределения в вентиляционной сети метрополитена методами математического моделирования с применением теории графов и потоковых алгоритмов, а также экспериментальные исследования параметров воздушного потока в натуральных условиях Алматинского метрополитена. В данной статье предложен инновационный способ обеспыливания тоннельного воздуха на основе использования поршневого действия поездов и лабиринтных фильтров, установленных в пристанционных вентиляционных сбойках. Обоснованы параметры расчетной модели линии метрополитена на основе декомпозиционного подхода к математическому моделированию аэродинамических процессов путем перехода от линейной модели линии метрополитена к периодической разомкнутой модели. Методами вычислительной аэродинамики определены закономерности изменения скорости воздуха через вентсбойку и располагаемый перепад давления в зависимости от скорости движения и режима следования поездов через станцию.

**Ключевые слова:** метрополитен, вентиляция, пыль, численное моделирование, поршневой эффект, воздухораспределение, вентиляционная сбойка.

---

\*Автор-корреспондент

Тулехан Иргибаяв, e-mail: [tuleukhan@mail.ru](mailto:tuleukhan@mail.ru)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-07>

Поступила 03 ноября 2023; Пересмотрено 20 ноября 2023; Принято 01 декабря 2023

## 1 ВВЕДЕНИЕ

В подземных помещениях метрополитенов скапливается пыль. Существует несколько ее источников: мелкодисперсная пыль вследствие истирания тормозных колодок метропоездов; заносится на платформы станций с обувью пассажиров, за счет выветривания железобетонных тубингов тоннелей и т.п.

Поездки на метро могут быть вредны для здоровья, утверждают британские ученые из университета Саутгемптона (Великобритания). Эксперты обнаружили, что мелкие частицы пыли, присутствующие в воздухе «подземки», отличаются по своему составу от пыли в других местах. Они оказались богаты металлами, особенно железом и медью. Вывод ученых основан на анализе частиц пыли, собранной на одной из станций метро в Европе. В ходе работы специалисты установили, что они способны проникать в организм, в том числе в легкие, печень и мозг. Ученые выяснили, что пыль способна генерировать реактивные молекулы, которые имеют основополагающее значение в создании токсического эффекта. Причем опасность этого воздействия возрастает с уменьшением размера частиц.

Следует отметить, что в настоящее время в метрополитенах стран СНГ, например, на Московском метрополитене для защиты техногенной атмосферы метрополитена от пыли применяют различные фильтры, способствующие эффективной очистке воздуха в вагонах метрополитена. Однако специалисты данного предприятия ограничились установкой очистительных систем в вагонах метрополитена. Решена только лишь локальная проблема, тогда как значительное количество пыли разносится по станциям метро.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### 2.1 Существующие методы обеспыливания воздуха в метрополитенах

К метрополитенам, как к элементу транспортной инфраструктуры и месту пребывания людей, предъявляются требования по обеспечению рекомендуемых уровней содержания мелкодисперсных частиц в воздухе. Так, согласно (WHO, 2021), рекомендуемые значения находятся на уровне: для PM<sub>2.5</sub> среднегодовая концентрация 10 мкг/м<sup>3</sup>, среднесуточная 25 мкг/м<sup>3</sup>; для PM<sub>10</sub>, 25 и 50 мкг/м<sup>3</sup> соответственно. Результаты исследований (Sazanova, 2016; Ji et al., 2021; Roy et al., 2019; Font et al., 2019; Park et al., 2012; Mugica-Alvarez et al., 2012; Kappelt et al., 2022; Hugo Russel et al., 2022) показывают, что фактические концентрации мелкодисперсной пыли в метрополитенах значительно превышают эти рекомендации.

В качестве мер борьбы с мелкодисперсной пылью в условиях метрополитенов известно несколько решений, например, использование воздушных завес специальной конструкции, которые позволяют снизить поступление частиц пыли во внутренние сооружения метрополитена примерно на 40% (Chen et al., 2021). Для борьбы с локальными источниками пыли на пассажирской платформе используются, например, магнитные гибридные фильтры (Son et al., 2019), эффективность которых может достигать 47,2%. В работе (Juraeva M. et al., 2016) предлагается по длине перегонных тоннелей делать циркуляционные байпасы, оборудованные фильтром и вентилятором, с движением воздуха в этих байпасах по направлению движения поездов. Однако такое решение требует установки дополнительных вентиляторов, что снижает энергоэффективность системы пылеулавливания. В авторском свидетельстве (11) предложен способ сухой очистки стенок тоннеля от пыли при помощи расположенного на подвижной платформе компрессора с форсунками, который по пути следования сбивает пыли со стенок тоннелей, и тут же засасывает воздух в ковш, работающий под разрежением. Также известно, что эффективность пылеулавливания можно значительно повысить, используя мокрый способ пылеулавливания – орошая воздух водой, что широко применяется в горном деле (Arhipov, 2014).

В целом, все рассмотренные выше способы борьбы с пылью имеют частный, локальный характер и применяются несистемно. Однако учитывая, что в метрополитене несколько источников генерации пыли – колесные пары и тормозные колодки поездов, эрозия бетонной обделки (тюбингов), одежда и обувь персонала и пассажиров, то должны быть применены комплексные системы пылеочистки и воздухоподготовки, обеспечивающие эффективное удаление пыли от всех указанных выше источников.

В связи с вышесказанным, исследование процессов и разработка энергоэффективных методов пылеулавливания в метрополитенах является весьма актуальной. Для достижения цели исследования, необходимо:

1. Предложить способ очистки воздуха метрополитена от пыли.

2. Разработать расчетную компьютерную модель линии метрополитена, провести ее валидацию и определить параметры воздушного потока – скорость, расход воздуха, перепад давления через вентиляционную сбойку для использования их в качестве граничных условий при моделировании пылеулавливания в фильтрах. Провести валидацию полученных данных.

3. Определить наиболее рациональную конструкцию фильтров для очистки воздуха в метрополитенах.

В качестве исходных данных для моделирования аэродинамики запыленного воздушного потока в фильтроэлементах, использованы результаты исследования пыли, проведенного авторами настоящей статьи для условий Новосибирского и Алматинского метрополитенов. Плотность такой пыли составила в среднем 2359-2463 кг/м<sup>3</sup>, что хорошо коррелирует с работами (Huang et al., 2015; Xie et al., 2021).

## 2.2 Способ очистки воздуха в метрополитене от мелкодисперсной пыли

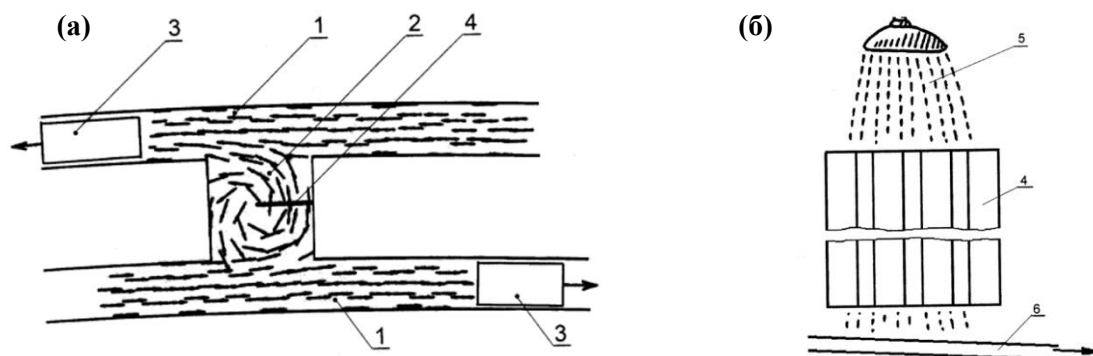
Наиболее подходящим местом для установки фильтрационного оборудования в условиях эксплуатации метрополитенов являются пристанционные противодутьевые вентиляционные сбойки. Они находятся в циркуляционном кольце, включающем также тоннели и платформенные залы станций, и через них перемещается значительное количество воздуха от каждого прохода поездов по тоннелю. При этом расположение в них фильтров не влияет на движение поездов.

Таким образом, можно не использовать дополнительные вентиляторы, а воспользоваться только давлением воздуха, создаваемым движущимися поездами. При этом фильтрационное оборудование должно иметь достаточно малое аэродинамическое сопротивление, чтобы не оказывать влияние на воздухообмен на участке линии метрополитена. Поэтому наиболее подходящими типами фильтров будут являться инерционные и электростатические фильтры.

Такой способ очистки тоннельного воздуха от пыли фильтрами, расположенными в пристанционной вентиляционной сбойке, защищен патентом (Krasnyuk et al., 2022) (Рисунок 1). Тоннельный воздух от поршневого действия поездов проходит через лабиринтные воздушные фильтры, имеющие каналы с цилиндрическими поверхностями стенок, образующие которых направлены вертикально в сторону лотка, устроенного под фильтрами. В верхнюю часть каналов фильтра периодически подают воду для удаления пыли с их поверхностей, а загрязненную воду от фильтра удаляют по лотку в канализацию.

Такое решение исключает необходимость использования фильтрующих элементов (ячейковых, волокнистых, рулонных и т.п.), имеющих высокое аэродинамическое сопротивление (Shtokman, 2007) и исключает необходимость периодической замены запыленных фильтрующих элементов. Аэродинамическое сопротивление лабиринтных воздушных фильтров практически не изменяется в процессе работы. Осажденная пыль легко удаляется из лабиринтного воздушного фильтра путем ее смыва водой с цилиндрических поверхностей стенок каналов и далее по лотку утилизируется в канализацию. При этом не требуется использовать людские ресурсы. Для пылеулавливания не требуются дополнительные затраты энергии, т.к. этот процесс осуществляется за счет поршневого действия поездов, что повышает энергоэффективность всей системы пылеулавливания в целом.





**Рисунок 1** – Способ улавливания пыли в вентиляционной сбойке [Oschepkov & Kiyanitsa, 2021]:

*a* – расположение фильтрационного оборудования в вентиляционной сбойке метрополитена,  
*б* – схема орошения фильтроэлементов. На рисунках 1 – тоннель, 2 – вентиляционная сбойка,  
 3 – поезд, 4 – фильтр, 5 – факел, 6 – лоток для уноса пылеводной эмульсии

В вентиляционных сбойках, помимо фильтров, может размещаться также оборудование для регулирования расхода воздуха (клапаны вентиляционные) и автоматические системы его увлажнения, что также будет способствовать агломерации пыли в более крупные фракции, что будет повышать эффективность их пылеулавливания в инерционных фильтрах. То есть вентиляционная сбойка является важнейшим элементом комплексной системы подготовки воздуха в метрополитенах.

Следует отметить, что основным назначением вентиляционной пристанционной сбойки является снижение эффекта дутья на станции. Фактически, это обводной канал, по которому направляется избыточный поток воздуха от движущихся поездов в обход путей движения пассажиров. Поэтому важно, чтобы фильтрационное оборудование, размещенное в вентиляционной сбойке и являющееся дополнительным аэродинамическим сопротивлением, не влияло на воздухообмен на станции более чем на 5-10%. В работе (Oschepkov & Kiyanitsa, 2021) показано, что изменение расхода воздуха на станции метрополитена при установке фильтрационного оборудования с коэффициентом аэродинамического сопротивления, равным 18, в вентиляционной сбойке не превышает 5%. Поэтому установка фильтров в вентиляционной сбойке допустима и не приводит к повышению скорости воздуха на путях движения пассажиров.

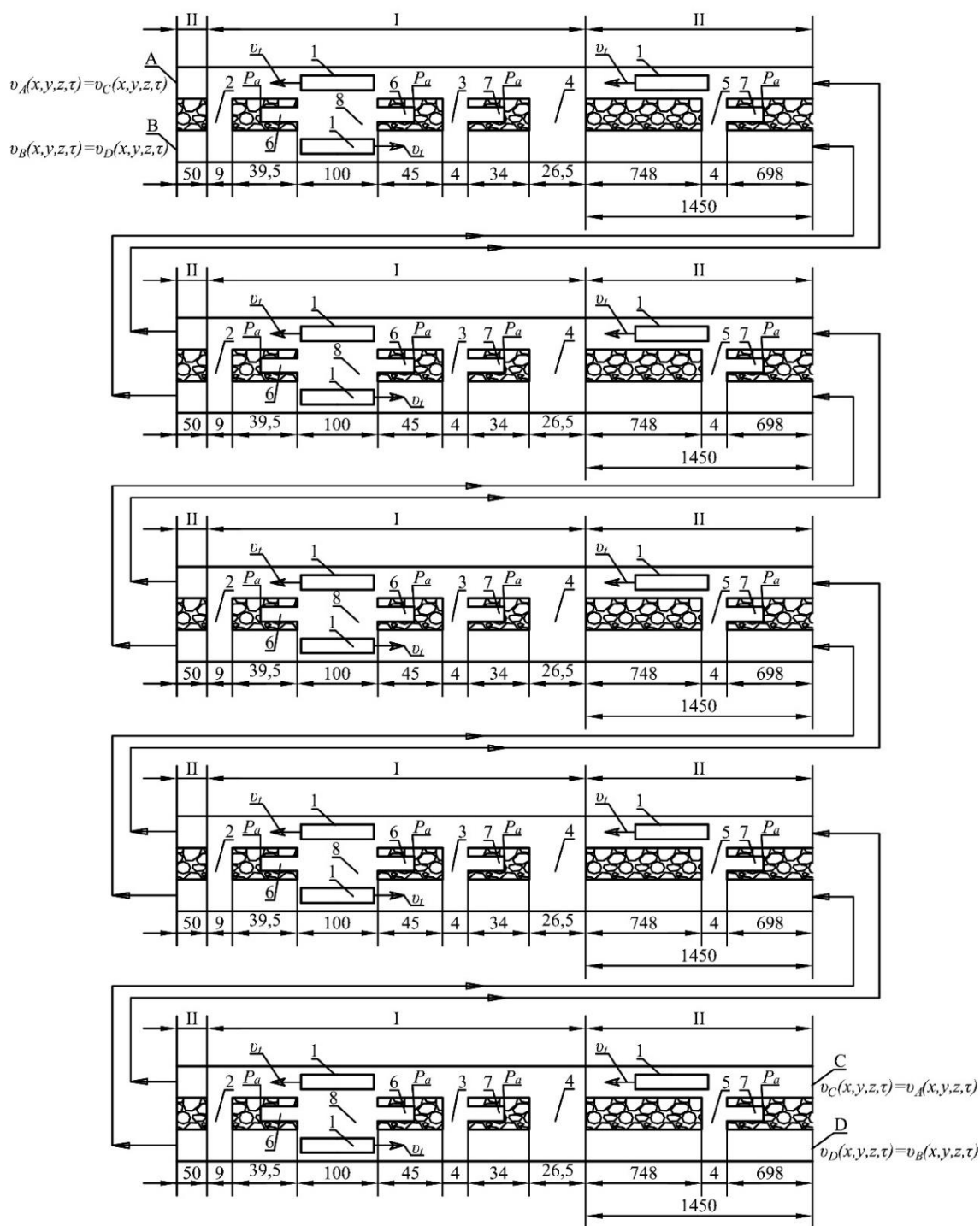
### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ результатов исследований, проведенных авторами настоящей статьи для условий Новосибирского и Алматинского метрополитенов, показывает, что мероприятия по борьбе с пылью должны быть предусмотрены непосредственно вблизи источников генерации пыли и предотвратить распространение пыли воздушными потоками от поршневого действия движущихся поездов. При этом поршневое действие поездов следует использовать для перемещения запыленного воздуха через фильтр.

#### 3.1 Определение скоростей воздуха и перепада давления при прохождении воздушного потока через пристанционную вентиляционную сбойку

Для определения наиболее рациональной конструкции фильтрационного элемента необходимо изучить параметры воздушного потока, проходящего через вентиляционную сбойку от поршневого действия поездов, такие как скорость воздуха и потери давления. Эти значения будут являться граничными условиями при исследовании эффективности работы фильтров различной конструкции. При этом представляет интерес не только средняя по сечению вентсбойки скорость воздуха, но и ее локальные значения в различные моменты времени.

Для определения этих параметров проведен вычислительный эксперимент. Геометрические параметры расчетной модели и граничные условия показаны на **Рисунке 2**.



**Рисунок 2** – Расчетная схема для исследования воздухораспределения от поршневого действия поездов на линии метрополитена – геометрические параметры и граничные условия [материалы авторов].

На рисунке: I – станционный комплекс, II – перегонный тоннель, 1 – поезд, 2 – малая вентсбойка, 3 – станционная венткамера, 4 – большая вентсбойка, 5 – перегонная вентсбойка, 6 – выходы наружу, 7 – перегонная венткамера, 8 – платформа,  $P_a$  – атмосферное давление,  $v_t$  – скорость поезда

Расчетная модель представляет собой линию метрополитена в масштабе 1:1, включающую в себя 5 станционных комплексов. Модель реализована в нестационарной, линейной, периодической постановке – профили скорости  $v_A(x,y,z,t) = v_C(x,y,z,t)$  и  $v_B(x,y,z,t) = v_D(x,y,z,t)$  на

входах и выходах порталов тоннелей (**А, В, С, D Рисунок 2**) расчетной модели совпадают, что позволяет корректно учесть сопротивление оставшегося участка линии метрополитена, не вошедшей в модель. Соединения с дневной поверхностью (вентиляционные камеры, пассажирские пути и т.д.) имеют аэродинамическое сопротивление, равное фактическим значениям для действующего метрополитена. В качестве допущения, для экономии вычислительных ресурсов, задача решена в изотермической постановке (решается уравнение сохранения только механической энергии), и поезда моделируются не твердотельными моделями, а виртуальными (метод «погруженного» тела – «Immersed Solid»). Этот метод значительно упрощает подготовку расчетной модели и ускоряет расчет. К недостаткам можно отнести невозможность определения некоторых параметров на поверхности поезда (например, давление). Но для данной задачи это не требуется.

Численное решение задачи воздухораспределения от поршневого действия поездов на линии метрополитена базируется на решении уравнений сохранения (массы, импульса, механической энергии) совместно с  $k-\varepsilon$  RNG моделью турбулентности методом конечных объемов, реализованном в программном комплексе ANSYS CFX (2016). Шаг по времени равен 0.025 с. Расчетное время включает в себя время прохода десяти поездов от одного портала модели до другого в обоих направлениях.

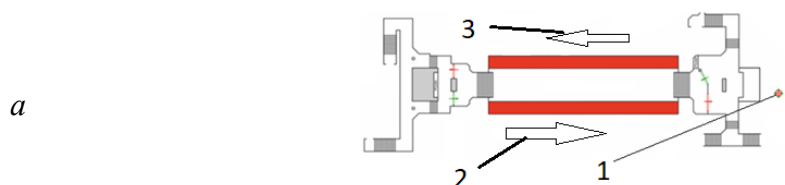
Принятые сочетания максимальной скорости поезда на перегоне и частоты движения поездов приведены в (**Таблице 1**):

**Таблица 1**

Матрица численного эксперимента

Скорость поезда	Частота движения поездов		
	40 пар/час (между поездами 90 с)	24 пар/час (между поездами 150 с)	12 пар/час (между поездами 300 с)
90 км/ч	Да	Да	Да (только для валидации)
70 км/ч	да	Да	Нет

Расчет на частоту движения 12 пар/час проведен для валидации результатов, полученных путем вычислительно эксперимента, с результатами натурных замеров, проведенных в условиях действующего Новосибирского метрополитена на станции метро Студенческая. При проведении натурального эксперимента замерялась скорость воздушного потока термоанемометром ТММ-2-01. Место проведения замеров в вентиляционной сбойке показано на **Рисунке 3а**. Параметры проведения эксперимента: частота движения поездов 12 пар/час, ширина вентиляционной сбойки 20 м, в поперечном сечении находятся расположенные равномерно 3 колонны. Поезда у вентиляционной сбойки соответственно либо разгоняются, либо затормаживаются. Скорость их движения значительно меньше крейсерской и находится в диапазоне 20-30 км/ч. При проведении эксперимента скорость воздуха замерена в течение 2-х циклов прихода и ухода поезда на/со станции. Результаты измерения скорости воздуха в замерной точке 1 вентиляционной сбойки указаны на **Рисунке 3б**.



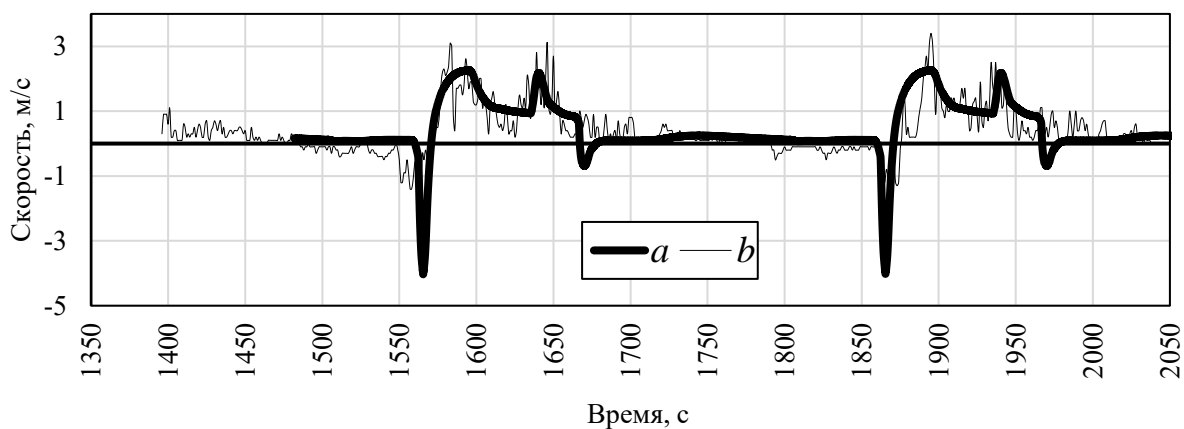


б



**Рисунок 3** – Эксперимент по исследованию скорости и направления движения воздуха в вентиляционной сбойке на станции метро Студенческая Новосибирского метрополитена [материалы авторов].  
*a* – схема станции с указанием места проведения замеров (точка 1),  
*б* – скорость воздуха в замерной точке

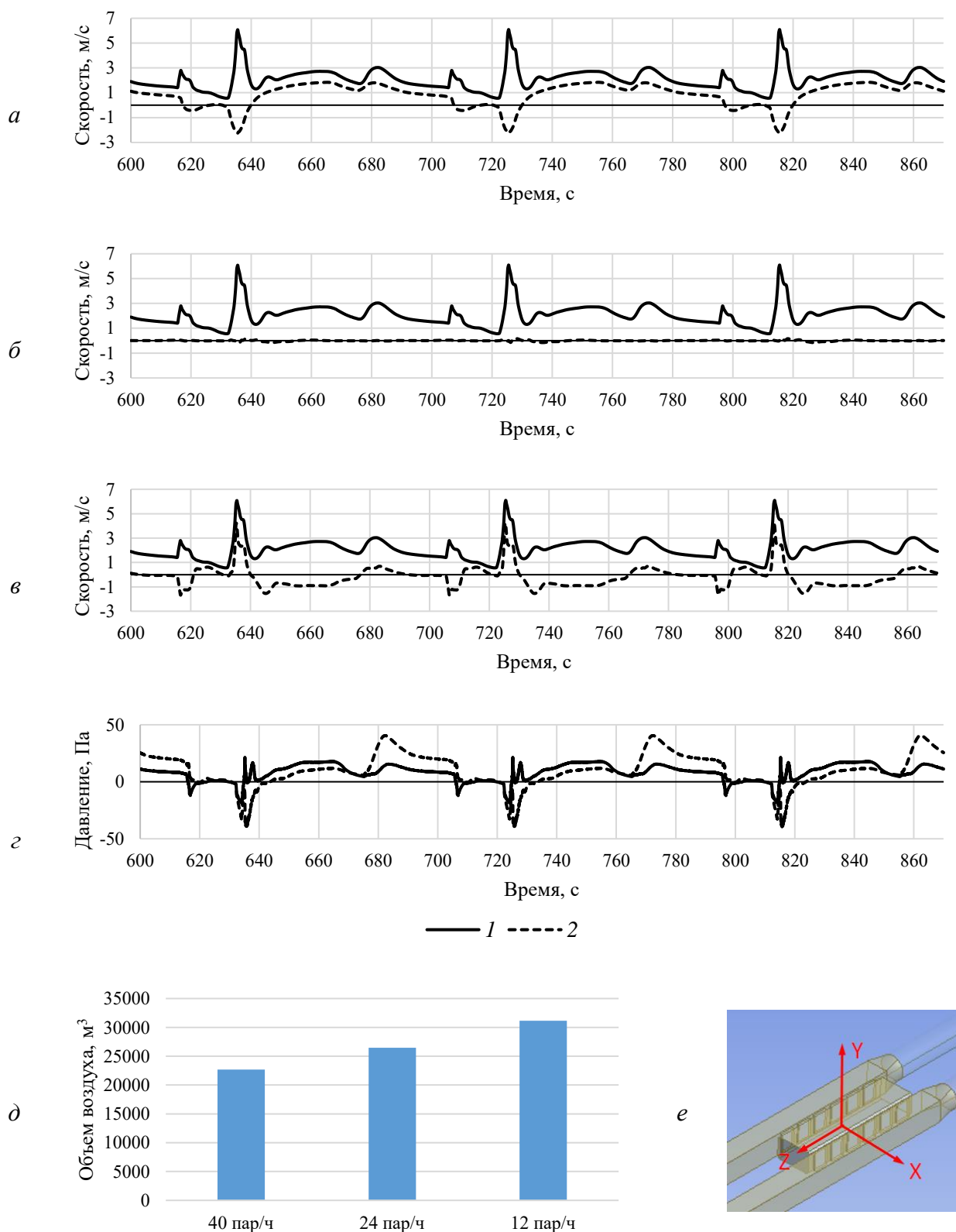
Проведена валидация численной математической модели линии метрополитена путем сравнения результатов, полученных путем численного и натурального эксперимента. Результаты сравнения показаны на **Рисунке 4**. Как видно, скорость воздуха в вентсбойке по результатам численного и натурального эксперимента достаточно хорошо совпадает как качественно, так и количественно. Коэффициент корреляции составил  $k=0,851$ .



**Рисунок 4** - Сравнение скорости воздуха в вентиляционной сбойке, полученной в результате проведения вычислительного и натурального эксперимента [материалы авторов].  
*a* – численный эксперимент, *б* – натуральный эксперимент

#### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

По результатам вычислительного эксперимента определены изменения по времени скорости воздуха в вентиляционной пристанционной сбойке. Результаты для частоты движения поездов 40 пар/час и максимальной (крейсерской) скорости поездов 90 км/час приведены на **Рисунке 5**, что будет являться наиболее экстремальным режимом эксплуатации для фильтрационных устройств, находящихся в вентиляционной сбойке.



**Рисунок 5** - Результаты вычислительного эксперимента для вентиляционной сбойки длиной 26,5 м: частота движения поездов 40 пар/час и максимальная (крейсерская) скорость поезда 90 км/ч [материалы авторов]: *a* – абсолютная величина скорости (1) и проекция скорости на ось X, осредненные по поперечному сечению вентсбойки (2), *б* – проекция скорости на ось Y, осредненная по поперечному сечению вентсбойки (2), *в* – то же, проекция на ось Z (2), *г* – перепад статического (1) и полного (2) давлений на вентиляционной сбойке (1 – статическое давление, 2 – полное давление), *д* – объем воздуха, перемещаемый за один цикл движения поезда, *е* – общий вид моделируемой вентсбойки и положение координатных осей, принятое в численном эксперименте

Как видно из **Рисунка 5а-в**, поле скорости имеет сложную пространственную структуру, характеризующуюся изменением проекций скорости в двух направлениях потока воздуха в вентиляционной сбойке, с изменением направления. При этом по высоте вентсбойки какой-либо заметной стратификации скорости не выявлено, так как проекция скорости на вертикальную ось  $Y$  колеблется около 0 м/с. Выявлено, что располагаемый перепад давлений, соответствующий полученным указанным расходам воздуха, по абсолютной величине не превышает: для статического давления 21 Па, для полного давления – 40 Па. Это позволяет определить требования к фильтрам по максимально допустимому аэродинамическому сопротивлению. На **Рисунке 5д** показаны объемы воздуха, которые проходят за один цикл прихода и ухода поезда на станцию. Этот объем воздуха будет являться, требуемой воздушной нагрузкой на фильтр и составляет для диапазона 12-40 пар/час от 31168 до 22678 м<sup>3</sup>/цикл.

Полученные при моделировании скорости и перепады давления воздуха для различных частот движения и скоростей поездов использованы в качестве исходных данных для определения оптимальной геометрии фильтроэлементов.

## 5 ВЫВОДЫ

Проведено обоснование для разработки энергоэффективной безлюдной технологии обеспыливания воздуха в метрополитене.

В качестве мест установки фильтрационного оборудования предлагаются вентиляционные пристанционные сбойки, т.к. они находятся в т.н. «циркуляционном кольце», что способствует многократному прохождению значительных объемов воздуха через них, и расположение фильтров в них не мешает движению поездов.

Для исследования аэродинамических процессов в метрополитенах разработана компьютерная численная модель, учитывающие поршневое действие от движущихся поездов. Проведена валидация результатов по скорости воздуха, полученных путем численных расчетов, с результатами натурного эксперимента.

Путем численного моделирования определены параметры воздушного потока в вентиляционной сбойке для различных частот движения и скоростей поездов. Полученные результаты будут использованы в качестве исходных данных (граничных условий) для поиска оптимальной геометрии фильтроэлементов.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

## БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан IRN AP09260842 «Исследование, разработка и внедрение инновационной технологии пылеудаления в метрополитене Алматы на основе использования циркуляционных потоков от поршневого действия движущихся поездов».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **World Health Organization.** (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
2. **Sazonova, A. M.** (2016). A study of the dust factor in metro production environments, Occupational health and safety in the transport industry [Issledovanie pyilevogo faktora proizvodstvennoy sredy metropolitena]. *Gigiena i ohrana truda transportnoy otrasli*, 79-85 (in Russ.).
3. **Ji, W., Li, X., & Wang, C.** (2021). Composition and exposure characteristics of PM<sub>2.5</sub> on subway platforms and estimates of exposure reduction by protective masks. *Environmental Research*, 197, 111042. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111042>
4. **Roy, D., Seo, Y.-C., Namgung, H.-G., & Kwon, S.-B.** (2019). Inhalation cancer risk from PM<sub>10</sub> in the metropolitan subway stations in Korea. *Journal of Transport & Health*, 14, 100580. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100580>
5. **Font, O., Moreno, T., Querol, X., Martins, V., Sánchez Rodas, D., de Miguel, E., & Capdevila, M.** (2019). Origin and speciation of major and trace PM elements in the barcelona subway system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72, 17–35. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.03.007>
6. **Park, D., Oh, M., Yoon, Y., Park, E., & Lee, K.** (2012). Source identification of PM<sub>10</sub> pollution in subway passenger cabins using positive matrix factorization. *Atmospheric Environment*, 49, 180–185. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.064>
7. **Mugica-Álvarez, V., Figueroa-Lara, J., Romero-Romo, M., Sepúlveda-Sánchez, J., & López-Moreno, T.** (2012). Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system. *Atmospheric Environment*, 49, 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.038>
8. **Kappelt, N., Russell, H. S., Fessa, D., Van Ryswyk, K., Hertel, O., & Johnson, M. S.** (2023). Particulate air pollution in the Copenhagen metro part 1: Mass concentrations and ventilation. *Environment International*, 171, 107621. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107621>
9. **Chen, T., Cao, S. J., Wang, J., Nizamani, A. G., Feng, Z., & Kumar, P.** (2021). Influences of the optimized air curtain at subway entrance to reduce the ingress of outdoor airborne particles. *Energy and Buildings*, 244, 111028. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111028>
10. **Son, Y. S., Oh, Y. H., Choi, I. Y., Dinh, T. V., Chung, S. G., Lee, J. H., Park, D., & Kim, J. C.** (2019). Development of a magnetic hybrid filter to reduce PM<sub>10</sub> in a subway platform. *Journal of hazardous materials*, 368, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.045>
11. **Juraeva, M., Ryu, K. J., Jeong, S.-H., & Song, D. J.** (2016). Influences of the train-wind and air-curtain to reduce the particle concentration inside a subway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 52, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.008>
12. **Solovev, V. A.** (1989). A device for dry dust cleaning in the tunnels [Ustroystvo dlya suhoj uborki pyili v tonnelyah] (Copyright certificate №1025410 SSSR, MPK A47L5/14, application №4213382). (in Russ.).
13. **Arkipov, V. A., Patrakov, Yu. F., Usanina, A. S., & Paleev, D. Yu.** (2014). Determining the wettability of coal dust [Opredelenie smachivaemosti ugolnoy pyili]. *FTPRPI*, 3, 170 – 179. (in Russ.)
14. **Huang, S., Zhang, X., Tafu, M., Toshima, T., & Jo, Y.** (2015). Study on subway particle capture by ferromagnetic mesh filter in nonuniform magnetic field. *Separation and Purification Technology*, 156, 642-654. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.10.060>
15. **Xie, Z., Xiao, Y., Jiang, C., Ren, Z., Li, X., & Yu, K.** (2021). Numerical study on fine dust pollution characteristics under various ventilation time in metro tunnel after blasting. *Building and Environment*, 204, 108111. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108111>
16. **Krasyuk, A. M., Lugin, I. V., Kiyanița, L. A., Unaspekov, B. A., Irgibayev, T. I., & Berdali, M. N.** (2022) A method for cleaning tunnel air from dust in the subway. [Sposob ochistki ot pyili

- tonnelnogo vozduha v metropolitene.] Eurasian patent №041484. Published in the bulletin EAPV 10. (in Russ.)
17. **Shtokman, E. A.** (2007). Air Purification: Tutorial. [Ochistka vozduha: Uchebnoe posobie]. Moscow: Construction universities' publishing house. (in Russ.).
  18. **Oshepkov, T. S., & Kiyanita, L. A.** (2021). The effect of the installation of filtration equipment in the ventilation failure on the air exchange of the metro station [Vliyanie ustanovki filtratsionnogo oborudovaniya v ventilyatsionnoy sboyke na vozduhoobmen stantsii metropolitena]. Fundamental and applied issues of mining sciences, 1(2), 210-215. <http://dx.doi.org/10.15372/FPVGN2021080232> (in Russ.).
  19. **ANSYS, C.** (2016). ANSYS CFX User's Guide Releases 17.0. Canonsburg, PA, ANSYS. (in Eng.)
  20. **Chupalov, V. S.** (2005). Air filters [Vozdushnyie filtryi]. SPb, SPGUTD. (in Russ.).
  21. **Aliev, G. M.-A.** (1986). Dust extraction and purification of industrial gases [Tehnika pyileulavlivaniya i ochistki promyshlennyih gazov]. Moscow, Metallurgiya. (in Russ.).
  22. **Vetoshkin, A. G.** (2005). Dust cleaning processes and devices Tutorial [Protsessyi i apparaty pyileochistki. Uchebnoe posobie], Penza: Penz. state. un-ty Printing. (in Russ.).
  23. **Shabliy, L. S., Krivtsov, A. V., & Kolmakova, D. A.** (2017). Computer simulation of typical hydraulic and gas-dynamic processes of engines and power plants via ANSYS Fluent. Tutorial [Kompyuternoe modelirovanie tipovyih gidravlicheskih i gazodinamicheskikh protsessov dvigateley i energeticheskikh ustanovok v ANSYS Fluent. ucheb. Posobie]. Samara: Samar. un-ty Printing. (in Russ.).