

Применение вычислительного моделирования для исследования параметров запыленных потоков воздуха в сооружениях метрополитена

И. В. Лугин¹, Л. А. Кияница¹, Т. С. Ощепков^{1}*

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com

Аннотация. На сегодняшний день метрополитен является наиболее перспективным видом городского общественного транспорта, который ежедневно используют тысячи пассажиров во всем мире. В современных метрополитенах проблемой является содержание взвешенной пыли в воздухе, которое превышает значения предельно допустимой концентрации. Особенно опасна пылевая фракция PM_{2.5} и менее, способная проникать через биологические барьеры организма человека. В настоящей статье рассмотрены результаты ряда исследований, направленных на определение концентрации, фракционного и химического состава такой пыли в сооружениях метрополитена. Одним из способов борьбы с запыленностью воздуха в метрополитенах является его фильтрация. Авторами предлагается применение фильтров, установленных в пристанционных вентиляционных сбойках, воздушный поток воздуха через которые обеспечивается поршневым действием поездов. Определение оптимальных конструктивных и эксплуатационных параметров таких фильтров проводится с помощью компьютерного моделирования методом конечных объемов. В статье приведен обзор существующих расчетных математических моделей движения запыленного воздуха как многофазного потока, и рассмотрена возможность их применения для условий подземных сооружений метрополитена.

Ключевые слова: метрополитен, запыленный воздух, многофазные потоки, мелкодисперсная пыль, математические модели, компьютерное моделирование

Application of computational modeling to study the parameters of dusty air flows in subway

I. V. Lugin¹, L. A. Kiyantsa¹, T. S. Oshchepkov^{1}*

¹ Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russia
* e-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com

Abstract. To date, the subway is the most promising type of urban public transport, which is used daily by thousands of passengers in the world. In modern subways, the problem is the content of suspended dust in the air, which exceeds the maximum permissible concentration. Especially dangerous is the dust fraction PM_{2.5} or less, capable of penetrating through the biological barriers of the human body. This article discusses the results of a number of studies aimed at determining the concentration, fractional and chemical composition of such dust in subway structures. One of the ways to combat dustiness of the air in subways is its filtration. The authors propose the use of filters installed in the jetty ventilation breakdowns, the air flow through which is provided by the piston action of trains. Determination of optimal design and operational parameters of such filters is carried out using computer modeling by the finite volume method. The article provides an overview of the existing computational mathematical models of the movement of dusty air as a multiphase

flow, and considers the possibility of their application to the conditions of underground subway structures.

Keywords: subway, dusty air, multiphase flows, fine dust, mathematical models, computer modeling

Введение

Одной из основных задач тоннельной вентиляции, возникающих при эксплуатации метрополитена, является поддержание параметров внутреннего микроклимата в рамках действующих нормативных и санитарных требований [1, 2]. В данной статье рассматривается одна из основных вредностей – взвешенная пыль. Так, содержание взвешенной пыли в воздухе не должно превышать значения предельно допустимой концентрации (ПДК) [3, 4]. На практике воздух метрополитена содержит твердые частицы во взвешенном состоянии в концентрации значительно превышающей ПДК, что показал ряд проведенных исследований в разных странах [5-8]. Например, концентрация взвешенных частиц в воздухе размером 10 мкм и 2,5 мкм, что соответствует PM10 и PM2.5, в метрополитене в 1,9 и 1,8 раза выше, чем для наземного рельсового транспорта согласно исследованию [7]. Мелкодисперсная пыль в высокой концентрации приводит к возникновению болезней органов дыхания [9], а также является благоприятной средой для распространения патогенных бактерий [10]. На основании выше сказанного следует вывод о необходимости дополнительной фильтрации и обеспыливания воздуха в сооружениях метрополитенов для снижения концентрации взвешенной пыли.

В работах [11-13] предлагается место установки устройств для очистки воздуха, а именно в пристанционных вентиляционных сбойках, так как значительная часть тоннельного воздуха проходит именно через них, образуя циркуляционное кольцо, причем расход воздуха через вентсбойку увеличивается с повышением количества встреч поездов. Геометрические и эксплуатационные параметры этих устройств возможно определить с помощью математического моделирования.

Целью данной работы является обобщение сведений о химическом составе пыли, находящейся в воздухе метрополитенов, и обоснование расчетной математической модели движения запыленного воздуха как многофазного потока.

Химический состав пыли в воздухе метрополитенов

Известен ряд исследований по химическому составу пыли и ее концентрации на различных линиях и станциях метрополитена в зарубежных странах [14-18]. Согласно этим исследованиям превышение ПДК взвешенных частиц пыли PM2.5 и PM10 является общемировой проблемой. Так рекомендуемое среднесуточное значение значения ПДК для частиц PM2.5 и PM10 составляет 25 мкг/м³ и 50 мкг/м³ соответственно [4]. Например, превышение значения ПДК [4] частиц PM10, рекомендуемого Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), для метрополитена Барселоны составляет 3,8 раза, а превышение ПДК частиц PM2.5 и PM10 для метрополитена Пекина составляет 10 и 8,6 раза соответственно [14]. Превышение значения ПДК твердых частиц в воздухе приводит к увеличению

уровня смертности. Например, превышение значений ПДК в 3 раза приводит к увеличению смертности примерно на 5% [4].

В исследованиях [15, 16] рассмотрен химический состав взвешенных частиц PM2.5, находящихся в воздухе метрополитена города Барселона, Испания. Образцы частиц, исследуемые путем химического анализа для определения основных показателей, были собраны во время работы метрополитена. Взвешенные частицы PM2.5 в большинстве были представлены Fe₂O₃ (30–66%) и углеродистыми веществами (18–37%). Также в воздухе метрополитена города были обнаружены Zn (цинк), Cu (медь), Mn (марганец), Cr (хром), Pb (свинец) и Ni (никель), выделяющиеся при истирании тормозных колодок подвижного состава, пантографов и токоведущего рельса [17].

Исследования образцов взвешенной пыли, взятых на шести станциях в метрополитене города Нанкин (Китай), показали, что наиболее распространенными элементами были Fe (железо), S (сера), Ca (кальций), Si (кремний) и K (калий). Также встречались следующие химические элементы: Cu (медь), Mn (марганец), Cr (хром) [18].

Химический анализ образцов пыли, взятых авторами в метрополитене города Новосибирска (Россия) и Алматы (Казахстан), показал наличие химических элементов, описанных ранее. Так в метрополитене города Новосибирска (Россия) преобладают взвешенные частицы в виде Fe₂O₃ (31%) и CaO (19,3%). Для метрополитена города Алматы (Казахстан) преобладают взвешенные частицы в виде SiO₂ (40,3%) и CaO (26,2%). Необходимо принять во внимание, что химический состав образцов пыли в значительной степени зависит от места отбора проб взвешенных частиц.

Таким образом, для дальнейшего математического моделирования необходимо основные параметры материала принять по правилу аддитивности системы, содержащей несколько составных частей. Так, например, плотность материала будет определяться по формуле (1).

$$\rho = \frac{\sum m_i \rho_i}{\sum m_i}, \quad (1)$$

где m_i – масса элемента, обнаруженного в результате исследования образцов пыли, кг; ρ_i – плотность этого элемента, кг/м³.

Обоснование расчетной математической модели для исследования движения запыленного воздуха

Для исследования параметров запыленных воздушных потоков, частиц пыли и последующей оценки эффективности работы пылеулавливающего устройства (воздушного фильтра) методами вычислительной аэрогазодинамики следует определить математическую модель, которая наиболее точно будет описывать движение воздуха и дискретных частиц в воздушном потоке.

На сегодняшний день существуют следующие основные методы расчета турбулентных течений: 1. прямое численное моделирование (DNS); 2. метод моделирования крупных вихрей (LES); 3. решение уравнений Рейнольдса (RANS). DNS метод характеризуется крайне высокими вычислительными затратами, поскольку для точного разрешения всех турбулентных вихрей требуется подробная сетка и достаточно малый шаг по времени. Применение метода LES также сопряжено со значительными вычислительными затратами, так как для обеспечения высокой точности требуется применение достаточно мелких сеток. RANS метод требует значительно меньшие вычислительные мощности, чем LES и DNS методы. К тому же RANS является наиболее широко применяемым методом при практических расчетах турбулентных течений, в частности при помощи математических моделей типа $k-\varepsilon$ [19].

Для численного моделирования многофазных течений в настоящее время существует два подхода: подход Эйлера-Лагранжа и подход Эйлера-Эйлера. Подход Эйлера-Лагранжа представлен следующими математическими моделями: Discrete Phase Model (DPM), Dense Discrete Phase Model (DDPM), Discrete Element Model (DEM), Macroscopic Particle Model (MPM). Подход Эйлера-Эйлера представлен тремя многофазными моделями: модель объема жидкости (VOF), модель смеси (mixture) и модель Эйлера [20].

Воздушный поток и содержащуюся в нем пыль в тоннелях метрополитена необходимо рассматривать как двухфазный поток газ-твердое вещество. Поскольку рассматриваемые взвешенные частицы пыли (дискретная фаза) в тоннеле имеют незначительные размеры, всего 2,5 мкм и 10 мкм, и занимают малую объемную долю, то принимается, что дискретная фаза не оказывает влияние на воздушный поток. По этой причине для математического моделирования запыленного воздушного потока, а именно движения частиц взвешенной пыли, следует применять модель Discrete phase model (DPM) [20].

Discrete phase model (DPM) – математическая модель, основанная на подходе Эйлера-Лагранжа. Жидкая фаза в данной модели рассматривается как сплошная среда, динамические процессы в ней определяются путем решения уравнений Навье-Стокса, а дискретная фаза решается путем отслеживания большого количества частиц через рассчитанное поле потока. Дискретная фаза может обмениваться импульсом, массой и энергией с жидкой фазой [20].

Мировой опыт в вопросе вычислительного моделирования многофазных потоков при помощи математической модели $k-\varepsilon$ *Realizable* в сочетании с DPM моделью доказал высокую точность полученных результатов в сравнении с натурными экспериментами [21-24].

К примеру, для проверки точности результатов математического моделирования распределения взвешенной пыли, полученных с использованием DPM модели, в забое угольной шахты Шанвань (Китай) были произведены замеры концентрации пыли и расходы воздуха. По итогам замеров и сравнения результатов погрешность между данными численного моделирования и данными натурных измерений была менее 10% [21]. В свою очередь результаты исследования [23] показали, что данные, полученные путем численного моделирования, о концен-

трации пыли в целом соответствовали измеренным данным, а погрешность между измеренными данными и результатами моделирования составила 4,63%.

Исходя из сказанного выше можно сделать вывод, что применение математической модели *k-ε Realizable* в сочетании с DPM моделью при численном моделировании запыленных потоков воздуха в сооружениях метрополитена для исследования их параметров, позволит получить достаточно точные данные, при этом погрешность между данными численного моделирования и данными натуральных измерений не будет превышать 10%.

Заключение

В результате проведенного анализа данных о текущем состоянии воздушной среды в тоннельных и пассажирских сооружениях метрополитена по публикациям в мировых источниках и исследованиям, проведенных авторами, установлено, что содержание взвешенной пыли в воздухе превышает ПДК. При этом преобладают взвешенные частицы в виде Fe₂O₃ (31%) и SiO₂ (40,3%).

Проведено обоснование расчетной математической модели для исследования параметров движения запыленного воздуха в условиях тоннельных сооружений метрополитена во время его эксплуатации. Согласно данным анализа проведенных в мире исследований сочетание модели турбулентности *k-ε Realizable* с DPM моделью движения твердых частиц в потоке дает достаточно точные результаты при разумных требованиях к вычислительной мощности и времени расчета.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ номер гос. регистрации №121052500147-6

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свод правил 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 [Текст] : утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. — М.: [б.и.], 2013. — 260 с.
2. СП 2.5.3650-20 Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры [Текст] : утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 16.10.2020: дата введ. 01.01.2021. — М.: [б.и.], 2020. — 101 с.
3. ГОСТ Р 59972-2021. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха общественных зданий. Технические требования [Текст]: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2021 г. N 1875-ст: дата введ. 01.02.2022. — М.: ФГБУ "РСТ", 2022 — 50 с.
4. Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы. Глобальные обновленные данные. 2005 год — Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2006. — 31 с.
5. Хунашвили Н.Г. [и др.] Клинико-гигиенические параллели при исследовании условий труда и состояния здоровья работников тбилисского метрополитена / Н.Г. Хунашвили, Р.Г. Кверенчиладзе, М.П. Цимакуридзе, Л.Ш. Бакрадзе, Майя П. Цимакуридзе // Аллергология и иммунология. — 2010. — том 11. — № 2. — с. 135-136

6. Сазонова А. М. Исследование пылевого фактора производственной среды метрополитена / А.М. Сазонова // Гигиена и охрана труда транспортной отрасли. – 2016. – с. 79-85
7. Winnie Kam, Kalam Cheung, Nancy Daher, Constantinos Sioutas. Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro // Atmospheric Environment. Volume 45, 2011, Pages 1506-1516.
8. Senlin Lu, Dingyu Liu, Wenchao Zhang, Pinwei Liu, Yi Fei, Yan Gu, Minghong Wu, Shang Yu, Shinich Yonemochi, Xiaoju Wang, Qingyue Wang. Physico-chemical characterization of PM2.5 in the microenvironment of Shanghai subway // Atmospheric Research. Volume 153, 2015, Pages 543-552.
9. Сачкова О.С. [и др.] Разработка мероприятий по оздоровлению условий труда тоннельных рабочих / О.С. Сачкова, Т.В. Матвеева, Н.И. Зубрев, М.В. Устинова, В.Л. Кашинцева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2018. – Т. 7. – №3 (43). – с. 145-149
10. Копытенкова О.И., Шилова Е. А., Сазонова А.М. Комплексный подход к оценке биодеструктивных факторов при освоении подземного пространства / О. И. Копытенкова, Е. А. Шилова, А. М. Сазонова // Интернет-журнал «Науковедение». – Том 7. – №1 (январь - февраль 2015). – с. 1-16
11. А. М. Krasnyuk. Circulatory Air Rings and Their Influence on Air Distribution in Shallow Subways // Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. // Journal of Mining Science, 2010. Т. 46. № 4. С. 431-437.
12. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. Experimental research into air distribution in a terminal subway station// Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 85, March 2019, Pages 21-28.
13. Ощепков Т.С., Кияница Л.А., Лугин И.В. К вопросу определения поля скоростей воздуха в тоннельных сооружениях линий метрополитена с использованием кольцевых моделей как способа топологической декомпозиции // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 8 т. Т. 2 : Национальная науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – С. 129 – 137.
14. Amit Passi, S.M. Shiva Nagendra, M.P. Maiya. Characteristics of indoor air quality in underground metro stations: A critical review // Building and Environment. Volume 198, 2021, 107907.
15. M.C. Minguillóna, C. Reche, V. Martinsa, F. Amato, E. de Miguel, M. Capdevila, S. Centelles, X. Querol, T. Moreno. Aerosol sources in subway environments // Environmental Research. Volume 167, 2018, Pages 314–328.
16. Vania Martins, Teresa Moreno, María Cruz Minguillon, Barend L. van Drooge, Cristina Reche, Fulvio Amato, Eladio de Miguel, Marta Capdevila, Sonia Centelles, Xavier Querol. Origin of inorganic and organic components of PM2.5 in subway stations of Barcelona, Spain // Environmental Pollution. Volume 208, 2016, Pages 125-136.
17. Oriol Font, Teresa Moreno, Xavier Querol, Vania Martins, Daniel Sánchez Rodas, Eladio de Miguel, Marta Capdevila. Origin and speciation of major and trace PM elements in the barcelona subway system // Transportation Research. Part D 72, 2019, Pages 17-35.
18. Wenjing Ji, Chenghao Liu, Zhenzhe Liu, Chunwang Wang, Xiaofeng Li. Concentration, composition, and exposure contributions of fine particulate matter on subway concourses in China // Environmental Pollution. Volume 275, 2021, 116627.
19. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности. Курс лекций [Электронный ресурс]. URL: https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/turb_models (дата обращения: 14.05.2022).
20. Ansys. Fluent, Release 2021 R2, Help System, User's Guide, ANSYS, Inc.
21. Tao Du, Wen Nie, Dawei Chen, Zihao Xiu, Bo Yang, Qiang Liu, Lidian Guo. CFD modeling of coal dust migration in an 8.8-meter-high fully mechanized mining face// Energy. Volume 212, 2020, 118616.

22. Yun Hua, Wen Nie, Qiang Liu, Shuai Yin, Huitian Peng. Effect of wind curtain on dust extraction in rock tunnel working face: CFD and field measurement analysis // *Energy*. Volume 197, 2020, 117214.
23. Shi J., Zhang W., Guo S., An H. Numerical Modelling of Blasting Dust Concentration and Particle Size Distribution during Tunnel Construction by Drilling and Blasting // *Metals*. 2022, 12, 547.
24. Luke Stone, David Hastie, Stefan Zigan. Using a coupled CFD – DPM approach to predict particle settling in a horizontal air stream // *Advanced Powder Technology*. Volume 30, 2019, Pages 869-878.

© *И. В. Лугин, Л. А. Кияница, Т. С. Ощепков, 2022*