

*И. В. Лугин¹**

Исследование влияния скорости воздушного потока на эффективность пылеулавливания инерционными фильтрами в вентиляционных сбоях метрополитена

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: ivlugin@misd.ru

Аннотация. Метрополитен в настоящее время является наиболее перспективным и быстро развивающимся видом городского общественного транспорта, которым ежегодно пользуются миллионы пассажиров во всем мире. Одной из основных проблем в современных метрополитенах является содержание взвешенной пыли в воздухе, которое превышает значения предельно допустимой концентрации. Для снижения значения концентрации взвешенной пыли в воздухе метрополитена необходимо использовать специальное оборудование – воздушные фильтры. В настоящей статье приведены результаты исследования скорости воздушного потока через фильтры на эффективность пылеулавливания. Исследования проведены с помощью численного моделирования методом конечных объемов.

Ключевые слова: метрополитен, запыленный воздух, многофазные потоки, мелкодисперсная пыль, эффективность пылеулавливания, компьютерное моделирование

*I. V. Lugin¹**

Investigation of the effect of air flow rate on the efficiency of dust collection by inertial filters in the ventilation blockages of the subway

¹ Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: ivlugin@misd.ru

Abstract. The subway is currently the most promising and fastest growing type of urban public transport, used by millions of passengers every year around the world. One of the main problems in modern subways is the content of suspended dust in the air, which exceeds the maximum allowable concentration. To reduce the concentration of suspended dust in the subway air, it is necessary to use special equipment – air filters. This article presents the results of a study of the speed of the air flow through the filters for the efficiency of dust collection. The studies were carried out using computer simulation by the finite volume method.

Keywords: subway, dusty air, multiphase flows, fine dust, dust collection efficiency, computer simulation

Введение

Метрополитен является местом пребывания большого количества людей, к которому предъявляется ряд санитарно-гигиенических требований, в частности, по мелкодисперсной пыли, уровень концентрации и количество частиц на 1 м³ которой регламентируется соответствующими отечественными норматив-

ными документами и рекомендациями международной организации здравоохранения. Так, массовая концентрация частиц пыли должна быть не больше: для тонких частиц PM_{2.5} (частицы, всасывающиеся в кровь) – среднесуточное значение не более 20 мкг/м³, среднегодовое – не более 10 мкг/м³; для грубых частиц PM₁₀ (частицы, проникающие в легкие) – среднесуточное значение не более 50 мкг/м³, среднегодовое – не более 25 мкг/м³ [1-5]. В кратковременной экспозиции превышение концентрации мелкодисперсных частиц PM₁₀ на каждые 10 мкг/м³ сверх 50 мкг/м³ повышает смертность на 0,5%. Так, например, концентрация 150 мкг/м³ может соответствовать примерно 5% увеличению смертности. Поэтому снижение концентрации пыли в воздухе подземных сооружений метрополитена представляет актуальную задачу для отечественных и зарубежных исследователей [6-11].

Ключевыми параметрами для подбора оборудования, предназначенного для очистки воздуха метрополитена от взвешенной пыли, является скорость движения воздуха в месте его установки, устойчивость к резкому непродолжительному изменению направления движения воздуха, происходящему в момент времени, когда отправляющийся со станции поезд приближается к вентиляционной сбойке, располагаемый перепад давления, определяемый скоростью движения поезда и геометрией сооружений метрополитена [12].

Путем сопоставления требований к условиям работы фильтров, при которых будет достигаться наибольшая эффективность фильтрации, и фактических условий работы в подземных сооружениях метрополитенов, выявлено, что наиболее подходящими являются фильтры, основанные на сухом механическом способе очистки: инерционные и жалюзийные пылеуловители, центробежные пылеуловители (циклоны), экранный инерционный пылеуловитель [13, 14].

Предложен способ очистки воздуха от пыли фильтрами, установленными в вентиляционных сбояках метрополитенов. Новизна способа защищена патентом [15]. С данной статье исследуются параметры фильтрационного оборудования для реализации этого способа.

Методы и материалы

Моделирование процесса пылеосаждения в лабиринтных инерционных фильтрах проведено в модуле Fluent вычислительного комплекса ANSYS [16, 17]. Параметры запылённого воздуха приняты до данным, полученным в ходе исследований, проведенных в метрополитене г. Алматы.

Двухфазность потока моделируется в лагранжевой постановке: воздух рассматривается, как сплошная (несущая) фаза, а пыль как дисперсная. В решении она представляется набором материальных точек, движение которых рассчитывается по второму закону Ньютона. В такой постановке считается, что пыль никак не влияет на основной поток, поэтому сначала производится решение аэродинамической задачи, а на втором этапе обработки результатов производится расчет траекторий движения частиц пыли.

Геометрическая модель и расчетная сетка

Рассмотрено несколько вариантов/типов лабиринтных фильтров и способов их компоновки, установленных одиночно или последовательно в вентиляционной сбойке вблизи станции метрополитена. В расчетах для экономии вычислительных и временных ресурсов рассматривается одна периодическая секция фильтра. Эта секция представлена фрагментом высотой 0,5 м и шириной 0,2 м, длина секции составляет 5-8 м в зависимости от степени возмущения потока воздуха после фильтра. Сверху и снизу расчетная область ограничена стенкой с коэффициентом отражения для дискретных частиц, равным 0,8, на боковых стенках задано условие продольной периодичности. На входе задается скорость потока воздуха, на выходе – атмосферное давление. На рис. 1 представлены геометрические модели и размеры фрагмента вентсбойки (рис. 1а) и с установленными в ней лабиринтными фильтрами различной конфигурации (рис. 1б).

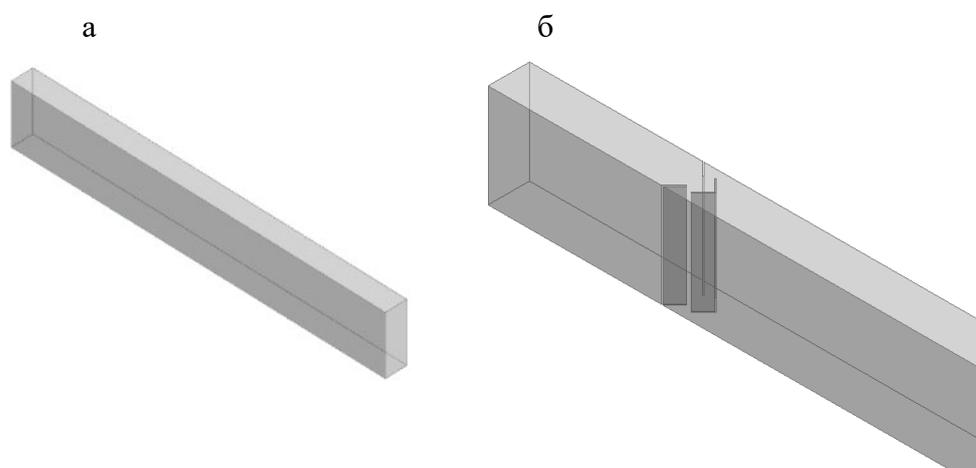


Рисунок 1 – Геометрическая модель выделенной ячейки вентсбойки и пример установки инерционного фильтра: а – пустая сбойка; б – ячейка жалюзийного уголкового фильтра.

Пространственная дискретизация модели проведена с использованием сгущения возле стенок для корректного моделирования пристеночного слоя для выбранной модели турбулентности Transition SST. Такая модель позволяет исследовать поведение частиц пыли вблизи поверхности фильтра с высокой степенью достоверности. Расчетные сетки строятся с соблюдением параметров качества сетки для всех исследуемых типов и конфигураций фильтров.

Граничные условия, параметры и порядок расчета

В настройках расчета модуля Fluent на вкладке основных настроек задается основанный на давлении тип решателя с абсолютным заданием скорости. Постановка задачи стационарная с учетом действия гравитации.

В настройках модели подключается уравнение энергии, модель турбулентности задается Transition SST, все константы остаются заданными по умолчанию.

Граничные условия: – входящий поток воздуха со скоростью от 0,1 до 3 м/с ;– давление на выходе – превышение относительно атмосферного давления 0 Па.

На этом этапе рассчитывается аэродинамика и определяется падение давления в фильтре.

На втором этапе проводится расчет движения пыли.

В модели задаются параметры расчета треков частиц пыли: максимальное число шагов и множитель длины шага.

Задается инъекция частиц пыли в поток воздуха с поверхности входа и параметры частиц:

- инерционный тип;
- материал пыли принимается по данным лабораторных испытаний пыли Алматинского метрополитена с плотностью 2535 кг/м³ ;
- распределение размеров частиц задается вероятностное по уравнению Розина-Раммлера в диапазоне от 5 до 40 мкм, средний размер 20 мкм (по тем же данным) со степенью распределения 3.5, число диаметров 8;
- расход пыли на входе 0,1 г/с для задания равномерного распределения масштабируется по площади ячеек;
- инъекция осуществляется нормально к поверхности входа со скоростью, соответствующей скорости потока.

Задается поведение частиц на границах. Для входной и выходной границы устанавливается исход из расчетной области, на стенках – неупругий отскок с коэффициентом 0.8, на стенках фильтра – полное прилипание частиц.

Количество и размер уловленных частиц, то есть качество фильтрации, определяется сравнением статистик выборок частиц на входе, выходе и на поверхности фильтров. Учитывая качество фильтрации и определенное на этапе решения гидравлической задачи падения давления в фильтре, выбирается наиболее рациональная по этим двум критериям система фильтрации воздуха.

Скорость воздуха в вентсбойке существенно меняется как по времени, в зависимости от текущего расположения движущихся поездов, так и по сечению сбойки [18]. Для исследования эффективности пылеулавливания различных рассмотренных типов фильтров принята скорость 1 м/с. Для одного типа фильтров (вариант 7, рис. 2ж) рассмотрено влияние скорости воздуха на пылеулавливание, принятые значения скорости 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2 м/с.

Рассмотренные варианты фильтров.

Вариант 1 (рис. 2а) Особенностью этого фильтра является его симметричность относительно поперечной плоскости сечения вентиляционной сбойки, что позволяет ему работать одинаково при изменении направления потока воздуха от поршневого действия поездов на противоположное.

Вариант 2 (рис. 2б). Циклонный фильтр однорядный дискретный. Представляет собой ряд одиночных циклонов, который в горизонтальном направлении поперечного сечения сбойки перекрывает 75% живого сечения. Сверху оставлен промежуток для выхода воздуха и циклона, составляющий 25% высоты расчетной области. Штатный режим работы при одном направлении воздуха.

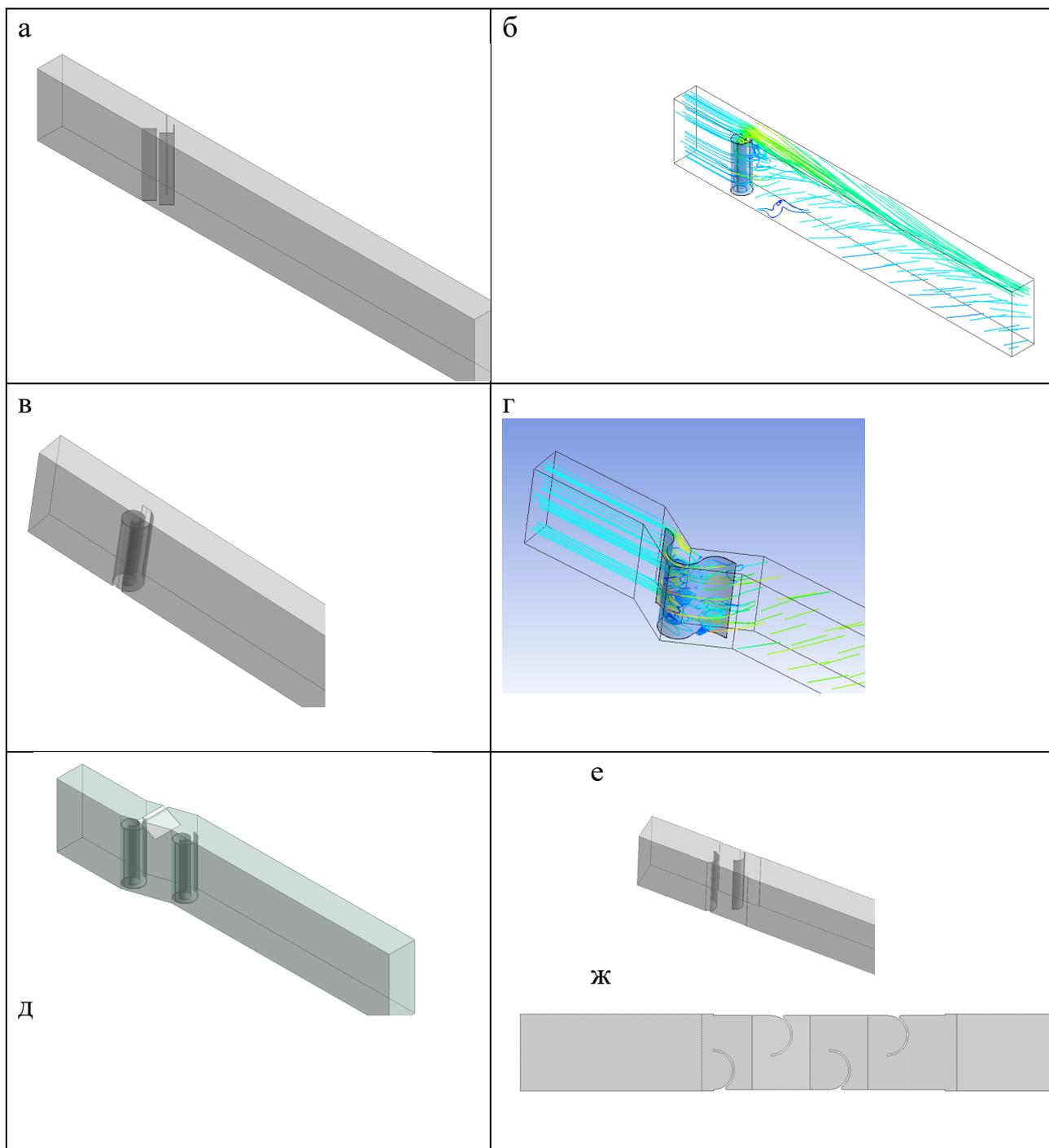


Рис. 2 Варианты рассмотренных фильтров: а – двурядный фильтр с разнонаправленными уголковыми элементами; б – циклонный фильтр однорядный дискретный; в – циклонный фильтр однорядный сплошной; г – продольный S-образный двурядный фильтр; д – циклонный фильтр двурядный дискретный с верхней направляющей; е – продольный J-образный однорядный фильтр; ж – продольный J-образный двурядный фильтр.

Вариант 3 (рис. 2в). Циклонный фильтр однорядный сплошной. Геометрические параметры соответствуют варианту 2, но горизонтальных промежутков между фильтрами нет.

Вариант 4 (рис. 2г). Продольный S-образный двурядный фильтр. Как и вариант 1, работает одинаково для обоих направлений потока.

Вариант 5 (рис. 2д). Циклонный фильтр двурядный дискретный с верхней направляющей. Разработан на основе варианта 2, добавлен второй ряд циклонов, расположенный в шахматном порядке относительно первого и верхняя направляющая. Добавленные элементы направлены на снижение количества воздуха, идущего в обход фильтров.

Вариант 6 (рис. 2е). Продольный J-образный однорядный фильтр.

Вариант 7 (рис. 2ж). Продольный J-образный двурядный фильтр. Добавлен второй ряд фильтрующих элементов

Результаты

Результаты расчета потерь давления и эффективности пылеулавливания по параметру процента частиц, осевших на фильтре от общего количества влетевших в расчетную зону, и аэродинамического сопротивления для исследуемых фильтров приведены в таблице. Потери давления необходимо учитывать, так как располагаемое давление для обеспечения движения воздуха через вентсбойку от поршневого действия поездов при их скорости до 90 км/ч составляет не более 30 Па [18]. Для всех вариантов скорость воздуха принята 1 м/с, для варианта 1 дополнительно рассмотрено пылеулавливание при скорости 3 м/с. Результаты представлены в таблице. Эффективность пылеулавливания при различных скоростях воздуха для варианта 7 (рис. 2ж) представлены на рис. 3,4 и 5.

Результаты исследования для рассмотренных вариантов фильтров

Параметр фильтра	Варианты типов и компоновки фильтров							
	1	1 при 3 /с)	2	3	4	5	6	7
Потери давления, Па	27,5	245,7	3,6	31	4,8	12,6	12,5	51,5
Вошло частиц, шт	8312	25568	9248	6008	5832	5720	18816	13120
Осело на фильтре частиц, шт	1961	12023	571	1084	518	1318	2676	3009
Эффективность улавливания, %	23,6	47,0	6,2	18,0	8,9	23,0	14,2	22,9

Анализ представленных графических зависимостей показал, что при скоростях потока воздуха через фильтр ниже 0,8 м/с эффективность улавливания пыли резко снижается как по количеству частиц, так и по их общей массе. Повышение скорости воздуха при проходе через фильтр имеет дополнительное преимущество по повышению степени улавливания частиц мелких фракций. Это также хорошо согласуется с результатами исследования фильтра вариант 1 с повышением скорости воздуха с 1 до 3 м/с, представленными в таблице, по которым эффек-

тивность его пылеулавливания изменилась с 23,6 до 47%. Однако повышение скорости воздуха закономерно приводит к повышению потерь давления в фильтре и при скорости 0,8 м/с уже превышают 30 Па.

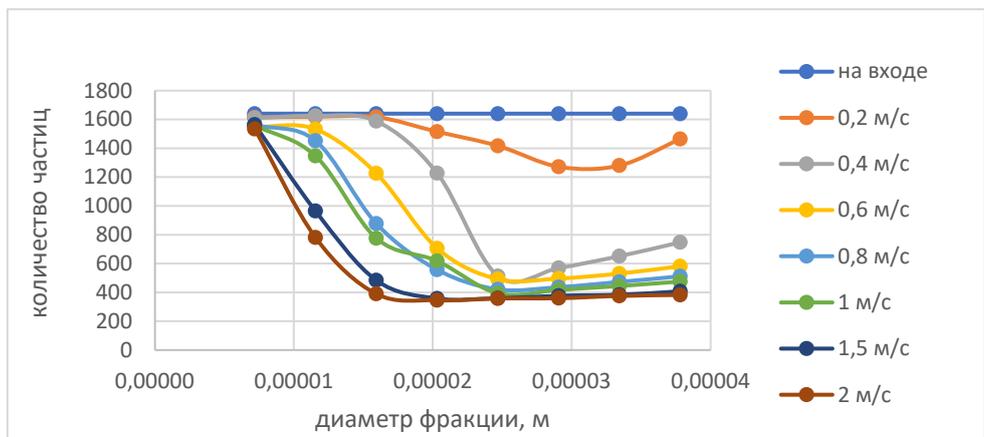


Рис. 3. Количество частиц по фракциям, прошедших фильтр при различной скорости воздуха

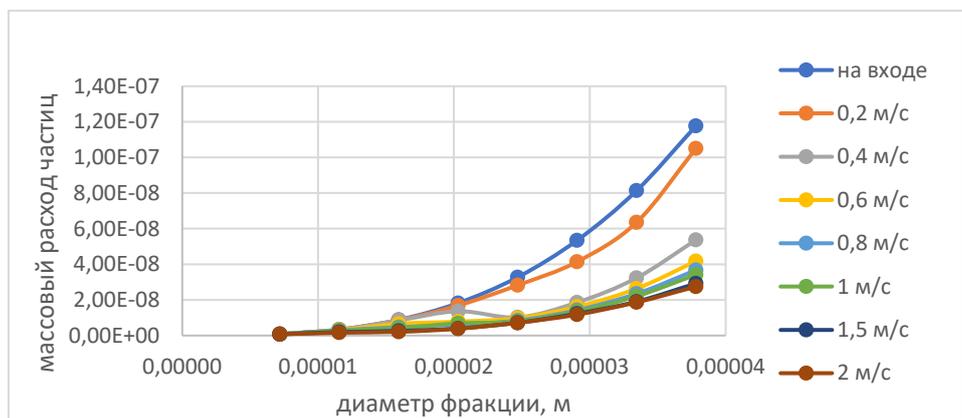


Рис. 4. Распределение массы частиц, прошедших фильтр, по фракциям, при различной скорости воздуха.

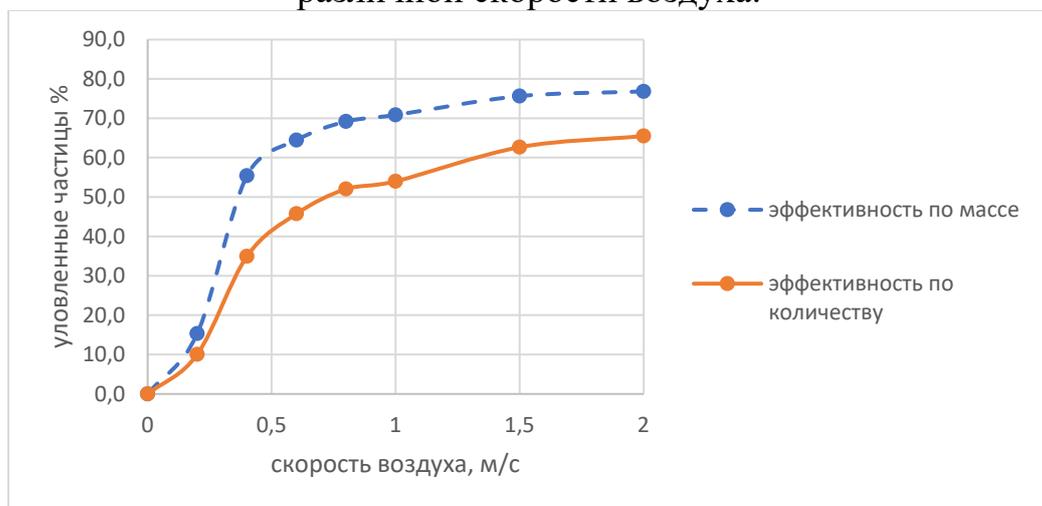


Рис. 5. Эффективность фильтра в процентах уловленных частиц по количеству и массе при различных скоростях воздуха

Заключение

Полученные результаты позволяют сформулировать дальнейшие направления исследований по эффективности пылеулавливания фильтров оптимизацией геометрических параметров для обеспечения максимальной скорости воздуха через фильтры при их минимальном сопротивлении.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сазонова А. М. Исследование пылевого фактора производственной среды метрополитена / А.М. Сазонова // Гигиена и охрана труда транспортной отрасли. – 2016. – с. 79-85
2. 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
3. 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
4. Jung, H.-J., Kim, B., Malek, M. A., Koo, Y. S., Jung, J. H., Son, Y.-S., ... Ro, C.-U. (2012). Chemical speciation of size-segregated floor dusts and airborne magnetic particles collected at underground subway stations in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 213-214, 331–340. doi:10.1016/j.jhazmat.2012.02.
5. Ji, W., Li, X., & Wang, C. (2021). Composition and exposure characteristics of PM2.5 on subway platforms and estimates of exposure reduction by protective masks. *Environmental Research*, 197, 111042. doi:10.1016/j.envres.2021.111042
6. Ji, W., Liu, Z., Liu, C., Wang, C., & Li, X. (2021). Characteristics of fine particulate matter and volatile organic compounds in subway station offices in China. *Building and Environment*, 188, 107502. doi:10.1016/j.buildenv.2020.1075
7. Roy, D., Seo, Y.-C., Namgung, H.-G., & Kwon, S.-B. (2019). Inhalation cancer risk from PM10 in the metropolitan subway stations in Korea. *Journal of Transport & Health*, 14, 100580. doi:10.1016/j.jth.2019.100580
8. Minguillón, M. C., Reche, C., Martins, V., Amato, F., de Miguel, E., Capdevila, M., Moreno, T. (2018). Aerosol sources in subway environments. *Environmental Research*, 167, 314–328. doi:10.1016/j.envres.2018.07.034
9. Park, D., Oh, M., Yoon, Y., Park, E., & Lee, K. (2012). Source identification of PM10 pollution in subway passenger cabins using positive matrix factorization. *Atmospheric Environment*, 49, 180–185. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.11.064
10. 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. doi:10.1016/j.trd.2019.03.007
11. Lu, S., Liu, D., Zhang, W., Liu, P., Fei, Y., Gu, Y., Wang, Q. (2015). Physico-chemical characterization of PM2.5 in the microenvironment of Shanghai subway. *Atmospheric Research*, 153, 543–552. doi:10.1016/j.atmosres.2014.10.006
12. Krasnyuk, A.M., Lugin, I.V., & Pavlov, S.A. (2010). Circulatory air rings and their influence on air distribution in shallow subways. *Journal of Mining Science*, 46(4), 431–437. doi:10.1007/s10913-010-0054-

13. Чупалов В.С. Воздушные фильтры / В.С. Чупалов. – СПб : СПГУТД, 2005. – 167 с.
14. Алиев Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. Спр. изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
15. Krasnyuk, A.M., Lugin, I.V., Kiyanita, L.A., Unaspekov, B.A., Irgibaev, T.I., & Berdali, M.N., (2022). Eurasian Patent No. 041484 Technique to remove dust from tunnel air in subways. EAPV Bulletin, 10.
16. ANSYS Fluent User's Guide (2015) ANSYS, Inc.
17. Шаблий, Л.С. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent: учеб. пособие / Л.С. Шаблий, А.В. Кривцов, Д.А. Колмакова. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 108 с.: ил.
18. Kiyanita, L.A., Unaspekov, B.A. Estimate of air distribution in ventilation tunnel between subway station as function of piston effect. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021, 2021(12), стр. 99–109.

© И. В. Лугин, 2023