ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(11):147-162
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 624.63-52:622.44 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_147

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ И ДЫМА ПРИ ПОЖАРЕ НА МЕТРОМОСТУ

С.С. Кобылкин[1], Н.О. Каледина[1], А.С. Кобылкин[2]

[1] ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: kobylkin.s@misis.ru
[2] Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

Аннотация: В настоящее время интенсивно развивается транспортная система города Москвы, в том числе идет активное освоение подземного пространства. Строятся новые ветки московского метрополитена – большая кольцевая линия, Сокольническая, Солнцевская, Люблино-Дмитровская, Троицкая, Рублево-Архангельская, Бирюлевская линии и большое количество соединительных веток и съездов в депо. Ряд веток метрополитена, прокладываемых на поверхности, часто включают метромосты, которые являются участками повышенной опасности при пожарах. Эти участки и являются объектом данного исследования. В настоящее время нет нормативных и методических документов, позволяющих оценить уровень безопасности принятых проектных решений по конструкциям метромоста. Для обоснования специальных технических условий и принимаемых проектных решений использована программа Ansys CFD. Для определения начальных и граничных условий для моделирования были проведены исследования климата района, где расположен метромост. При моделировании изучалась газовая динамика токсичных продуктов горения CO CO_2 HCl и дыма на различных участках метромоста. Проведенные исследования показали, что наиболее худшая ситуация возникает при штиле. Наличие ветра ускоряет вынос токсичных газов и дыма. При этом на различных участках метромоста по-разному осуществляется вынос опасных примесей. Так моделированием установлено, что в припортальной части метромоста, где имеются бетонные ограждения, происходит накопление вредных примесей и дыма. Для таких участков необходимо разрабатывать дополнительные мероприятия по обеспечению пожарной безопасности. Расчетами установлено влияние температуры воздуха на процессы естественного проветривания метромоста в случае пожара.

Ключевые слова: метро, компьютерное моделирование, проветривание, климатические факторы, пожар, задымление.

Для цитирования: *Кобылкин С. С., Каледина Н. О., Кобылкин А. С.* Моделирование влияния ветра и температуры воздуха на распределение токсичных газов и дыма при пожаре на метромосту // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 147–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_147.

© С.С. Кобылкин, Н.О. Каледина, А.С. Кобылкин. 2022.

Modeling wind and air temperature effect on propagation of smoke and toxic gases during fire on metro bridge

S.S. Kobylkin[1], N.O. Kaledina[1], A.S. Kobylkin[2]

[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: kobylkin.s@misis.ru

[2] Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract: The transportation system in Moscow enjoys active and intense development, including the underground space. The Moscow Metro features construction of new lines—Big Circle Line, Sokolnicheskaya, Solntsevskaya, Lyublino-Dmitrovskaya, Troitskaya, Rublevo-Arkhangelskaya and Biryulevskaya Lines, as well as many connection lines and engine house access tracks. Some metro lines built on ground surface often include metro bridges which are the objects of heightened danger when on fire. The metro bridges are the subject of this research. There are currently no norms and procedures to assess safety of approved design choices on metro bridges. The validation of the project-specific technical specifications and design choices used ANSYS CFD software. For determining initial and boundary conditions for the modeling, the climate research was performed in the location region of the metro bridge. The modeling studied the gas dynamics of toxic combustion products CO, CO_2 and HCl, and smoke in different sites of the metro bridge. The studies show that situation is the worst at zero wind. Wind accelerates removal of toxic gases and smoke. Removal of hazardous impurities runs differently in different sites. For example, the modeling finds out that toxic substances and smoke accumulate at the metro portals equipped with concrete enclosures. Such areas require extra activities to be developed to ensure the fire safety. The calculations determine the air temperature effects on natural ventilation of a metro bridge on fire.

Key words: metro, computer modeling, ventilation, climatic factors, fire, smoking.

For citation: Kobylkin S. S., Kaledina N. O., Kobylkin A. S. Modeling wind and air temperature effect on propagation of smoke and toxic gases during fire on metro bridge. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11):147-162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_147.

Введение

Обеспечение безопасности московского метрополитена комплексная задача, включающая оценку рисков [1, 2], геологический и экологический мониторинг [3, 4], расчеты и научное обоснование по водоотливу [5] и проветриванию [6], противопожарную защиту и другие аспекты. Линии метрополитена включают как подземные, так и наземные участки. К последним относятся метромосты. В отличии от подземных участков наземные не имеют принудительной вентиляции и систем противопожарной вентиляции. При этом существенное влияние на их проветривание могут оказывать климатические условия местности. Для оценки уровня безопасности полевым методом были проведены расчеты для различных вариантов естественного проветривания и для различных участков метромоста. Данная работа является продолжением проводимых исследований [7].

Методы

Пожарная опасность наземных участков линий метрополитена обусловлена

наличием в них горючих веществ. Среди потенциальных мест возникновения горения выделяют кабельные линии и элементы конструкций метропоездов и метромостов. Пожарная опасность представлена возгоранием на кабельной линии, исходя из следующих обоснований:

- большая горючая нагрузка по массе, представленная изоляцией кабелей, которая горит только под напряжением;
- теплота сгорания кабелей (32 МДж/кг);
- кабельная линия расположена вдоль всего перегона;
- дымообразующая способность кабелей составляет 521 Нп·м^2/кг;
- кабельная линия может гореть в течение продолжительного времени (до снятия напряжения) с распространением пожара вдоль нее.

В основном в наземных участках линии метрополитена проложены кабельные линии типа исполнения нг(...)-HF. Значения дымообразующей способности, потребления кислорода при горении и выделения токсичных продуктов горения принимаются для типовой горючей нагрузки «Кабельный поток; кабели

Таблица 1

Начальные и граничные условия проведения численного моделирования
Initial and boundary conditions for numerical simulation

№	Параметр		Единицы измерения	Величина
1	k	коэффициент ослабления оптического излучения	м$^{-1}$	0,1
2	$B_{кр}$	яркостный порог зрения человека в условиях задымления	кд/м^2	0,302
3	a	коэффициент отражения поверхности объекта	– (%)	0,3 (30%)
4	E_0	освещенность поверхностей	лк	50
5	μ	оптическая плотность дыма	Нп·м$^{-1}$	0,12
6	C_{O_2}	удельный расход кислорода	кг/кг	2,19
7	Y_s	удельный выход дыма (soot yield)	б.р.	0,06
8	σ_s	удельный массовый показатель экстинкции	м^2/кг	8700
9	$l_{кр}$	предельная видимость	м	20
10	D_m	коэффициент дымообразования (дымообразующая способность)	Нп·м^2/кг	521
11	C	безразмерная характеристика типа объекта, рассматриваемого в дыму		от 2 до 4
12	C_m	массовая концентрация дыма	кг/м^3	0,000023
13	t	температура тления/горения	°C	500
14	v	линейная скорость распространения пламени	м/с	0,00104
15	C_{CO}	Выделение токсичных продуктов горения CO при сгорании 1 кг материала	кг/кг	0,13
16	C_{CO_2}	Выделение токсичных продуктов горения CO_2 при сгорании 1 кг материала	кг/кг	0,65
17	C_{HCl}	Выделение токсичных продуктов горения HCl при сгорании 1 кг материала	кг/кг	0,02

АВВГ и АПВГ» в соответствии с таблицей П1.3 Пособия по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов (Москва, ВНИИПО, 2012).

На кронштейнах по каждой внутренней продольной стороне наземно-надземного участка линии предусматривается групповая прокладка кабельных линий. Как отмечалось ранее [7] предел огнестойкости конструкций метрополитена составляет 15 мин (анализ конструкторской документации показал, что чаще применяется металл R15), далее будет потеря несущей способности. Несмотря на то, что при строительстве и эксплуатации метрополитена должны применяться негорючие материалы (в том числе кабели серии НГ), а также должно соблюдаться требование по укладке каждой линии кабеля отдельно в лотке, на практике встречаются нарушения. Для обеспечения безопасности необходимо предусмотреть чрезвычайную ситуацию, при которой кабели уложены друг на друга и отключение напряжения не произошло в кротчайшие сроки.

Обоснование основных начальных и граничных условий процесса горения кабеля (приведены в табл. 1) опубликовано ранее [7]. По данным [8] для практических расчетов рекомендовано принимать σ_s равным 8700 м^2/кг на длине волны 632,8 нм с доверительным интервалом ±1170 м^2/кг и доверительной вероятностью 95%. Вывод сделан на основе исследования как мало-, так и крупномасштабных пожаров при горении древесины и пластиков. Это значение данного параметра принято в практике моделирования развития пожаров в полевой модели. Анализ данных по продуктам горения изоляции кабеля АВВГ и АПВГ в рамках проведенных работ показал, что необходимо проводить дополнительные натурные исследования для установления количественных характеристик состава продуктов горения с целью повышения точности расчетов и повышения пожарной безопасности метрополитена.

По открытым сведениям, Гидрометцентра России построены розы ветров за 2020 г. по каждому месяцу (рис. 1). Их анализ позволяет сделать вывод о преобладании Северо-Западного, Западного, Юго-Запанного, Южного и Юго-Восточного ветров, со средними скоростями движения воздуха 5,3; 5,7; 5; 4,6 и 3,5 м/с соответственно.

Абсолютный максимум по температуре воздуха в г. Москве был зафиксирован в 2010 г., он составил +39,0 °С (метеостанция Балчуг). Среднегодовая температура в 2020 г. составила +8,0 °С. Абсолютный минимум по температуре воздуха в г. Москве был зафиксирован в 1940 г., он составил –42,2 °С (метеостанция ТСХА). Учет месторасположения объекта и метеорологической обстановки в районе размещения надземных участков линии метрополитена проводится с целью моделирования пожаров в различных погодных условиях, наиболее приближенных к реальным.

Согласно требованиям п. 7.4 СП 7.13130.2013 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности» должны учитываться температура (для теплого периода года по СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99) и скорость ветра (по наибольшим значениям независимо от периода года).

В соответствии с табл. 3.1 «Климатические параметры холодного периода года» СП 131.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности» для г. Москвы температура воздуха обеспеченностью 0,94 составляет –13 °С, максимальная из средних скоростей ветра за январь — 2 м/с. В соответствии с

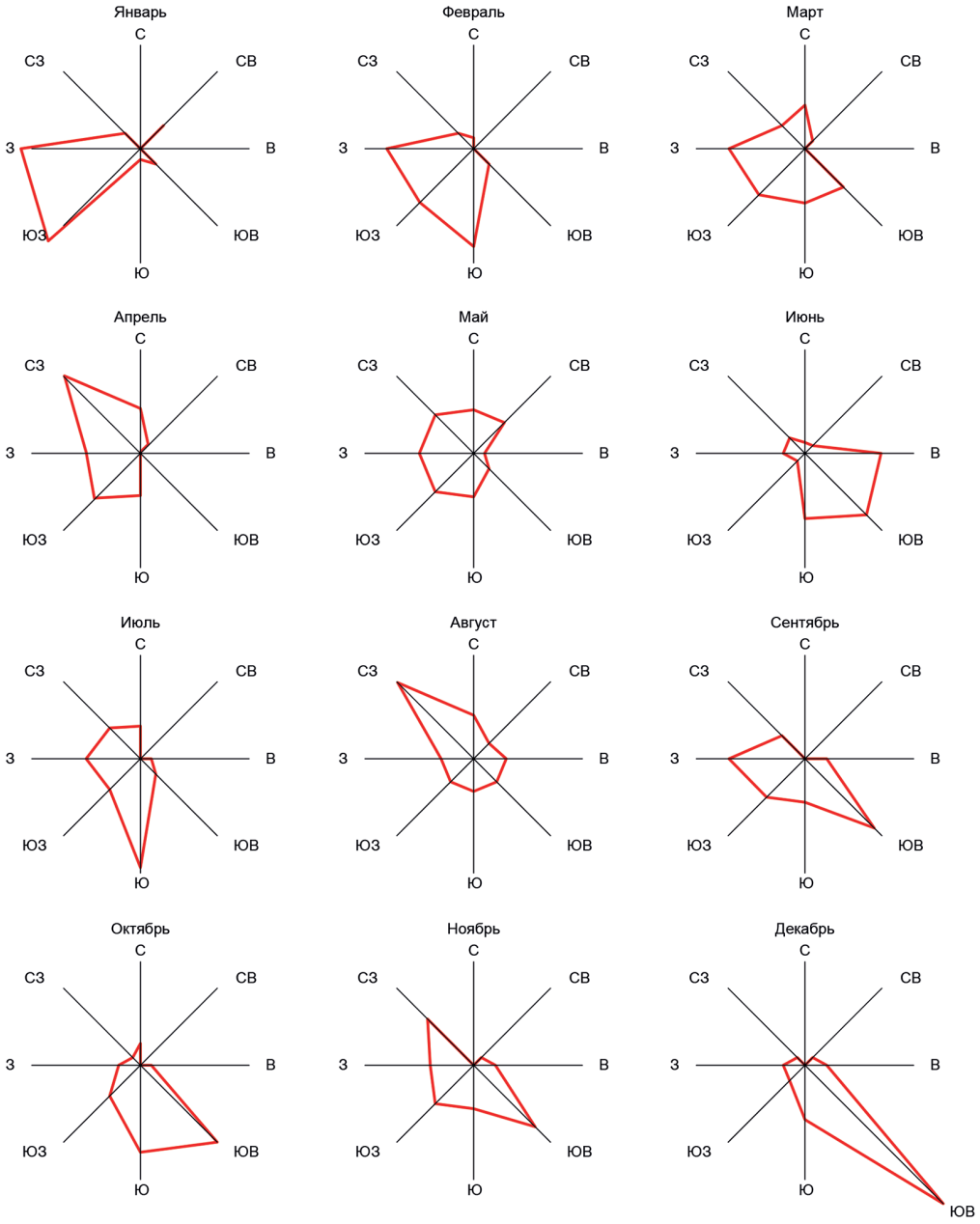

Рис. 1. Розы ветров района строительства (по месяцам 2020 г.)
Fig. 1. Wind roses of the construction area (by months of 2020)

табл. 4.1 «Климатические параметры теплого периода года» СП 131.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности» для г. Москвы температура воздуха обеспеченностью 0,98 составляет +26 °С, максимальная из средних скоростей ветра за июль — 0 м/с. Таким образом, для моделирования пожаров в надземных участках линии для крайних

условий можно принять, что температура воздуха +26 °С, скорость ветра — 2 м/с. Проведение исследований влияния ветра и его отсутствие на распределение токсичных газов и дыма, образовавшихся в результате пожара на метромосту является целью данной работы.

Полученные данные будут использованы как начальные и граничные условия проведения расчетного обоснования технических решений по противопожарной защите наземно-надземных участков линии метрополитена с покрытием для защиты от атмосферных осадков в проектной документации строительства Калининско-Солнцевской линии метрополитена на участке «Рассказовка»–«Внуково».

Проведение компьютерного моделирования должно оценить уровень безопасности принятых проектных решений. Системы дымоудаления на рассматриваемом объекте (метромосту) не предусмотрены. При этом сценарии аварийных ситуаций должны охватывать все возможные варианты развития событий с учетом климата района эксплуатации метромоста.

Анализ схемы конструкции метромоста (рис. 2) позволил выявить четыре основных сечения (рис. 3). Для каждого сечения рассматриваются различные сочетания метеорологических факторов.

С учетом расположения рассматриваемых участков направление ветра, совпадающее с осью метромоста, не моделируется. В связи с этим разработаны сценарии аварийной ситуации представленные в табл. 2.

Для варианта с наиболее сложными условиями проветривании в сечении, где часть ламелей заменены бетонной стеной (рис. 3, *а*), дополнительно к западному и восточному ветрам рассмотрены случаи с максимально низкой и высокой температурами воздуха (дополнительно еще 4 сценария). Таким образом, в результате анализа возможных сценариев аварийной ситуации при самом неблагоприятном стечении обстоятельств к рассмотрению было принято 16 вариантов.

Все расчеты проводились в нестационарной постановке решения задач.

Важным вопросом при проведении моделирования является порядок разбие-

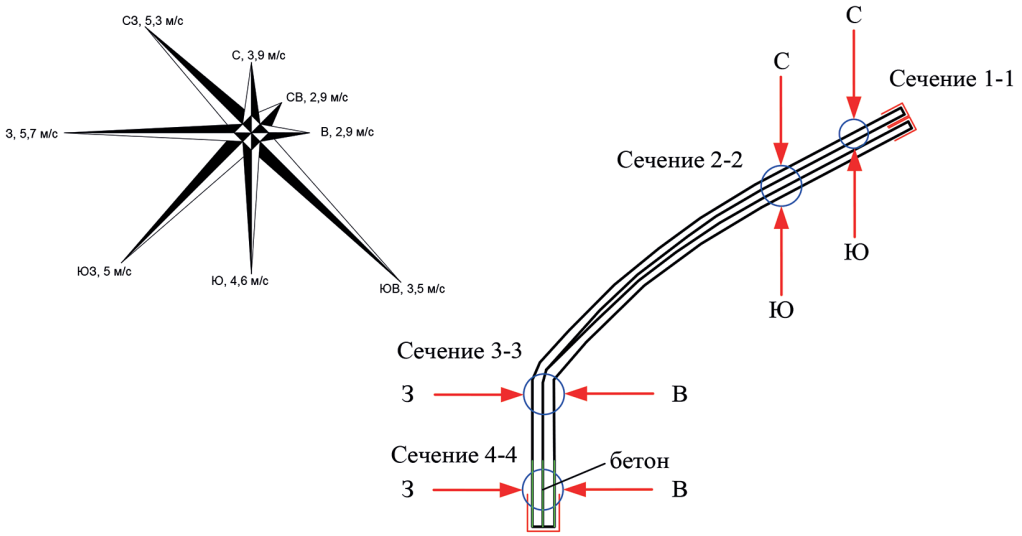

Рис. 2. Схема к определению сценариев аварийной ситуации
Fig. 2. Scheme for the definition of emergency scenarios

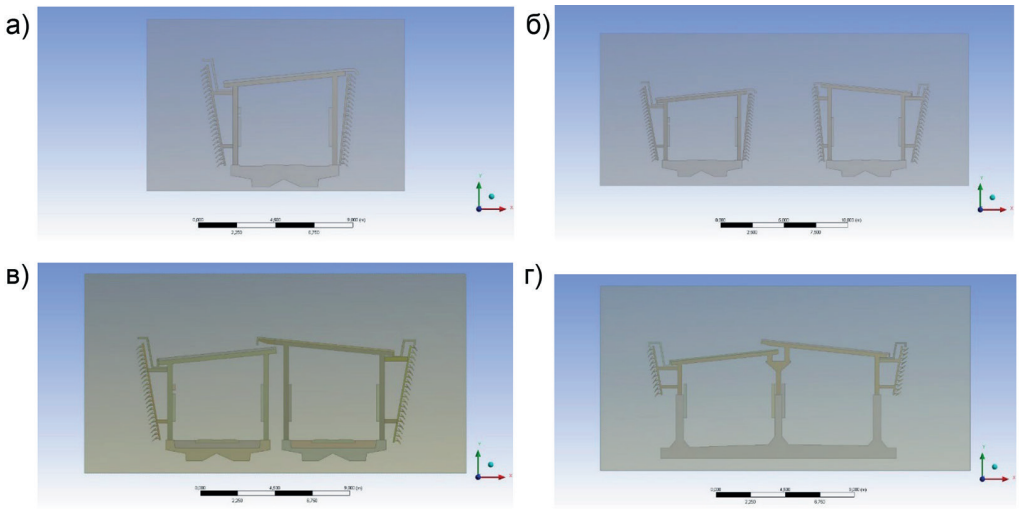

Рис. 3. Типовые сечения метромоста
Fig. 3. Typical sections of the metro bridge

ния трехмерной модели на расчетные элементарные объемы. Как показали исследования [9], для задач аэрогазодинамики оптимальными являются элементы, представленные тетраэдрами с рассчитанным минимальным размером ребра равным 0,05 м.

Обоснование проектных решения по противопожарной защите может быть осуществлено полевым методом (Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях. Москва, ВНИИПО, 2003).

Этот метод реализован в целом ряде программных комплексов: специальном комплексе Fire Dynamics Simulator (разработчик NIST, США), Pyrosim (разработчик FireCat, ИП Карькин Илья Николаевич, РФ), Fenix +3 (разработчик MST, АО «Современные программные технологии», РФ) и др., многопрофильном комплексе Ansys (CFX и Fluent, США), отечественной программе Flow Vision CFD [10].

Первый комплекс используется проектными организациями ООО «Пожтех-

Таблица 2

Сценарии аварийной ситуации
Emergency scenarios

Сценарий	Направление преобладающего ветра	Средняя скорость ветра, м/с	Сечение
1	северное	3,9	рисунок 3*а*
2	южное	4,6	
3	северное	3,9	рисунок 3*б*
4	южное	4,6	
5	западное	5,7	рисунок 3*в*
6	восточное	2,9	
7	западное	5,7	рисунок 3*г*
8	восточное	2,9	

ника-проект», ГАУ «НИАЦ», АО «Моспромпроект» и др.), не позволяет проводить расчеты со сложными геометрическими параметрами расчетной области. Эта программа, например, не может построить необходимую сетку между ламелями. Также данная программа не позволяет проводить расчеты для больших объектов. Ansys позволяет моделировать любые течения, в том числе процесс горения с расчетом максимальной температуры, реакции горения, выделения токсичных газов и дыма, сажи и убыли кислорода. Однако, данный программный комплекс требует больших вычислительных ресурсов. Отечественная программа FlowVision CFD активно развивается, и также позволяет моделировать процессы горения. Исходя из анализа сложности задачи и возможностей программных комплексов расчеты проводились в ANSYS CFX. Трехмерное моделирование пожаров в метро активно применяется многими исследователям и использованием других программ [11, 12].

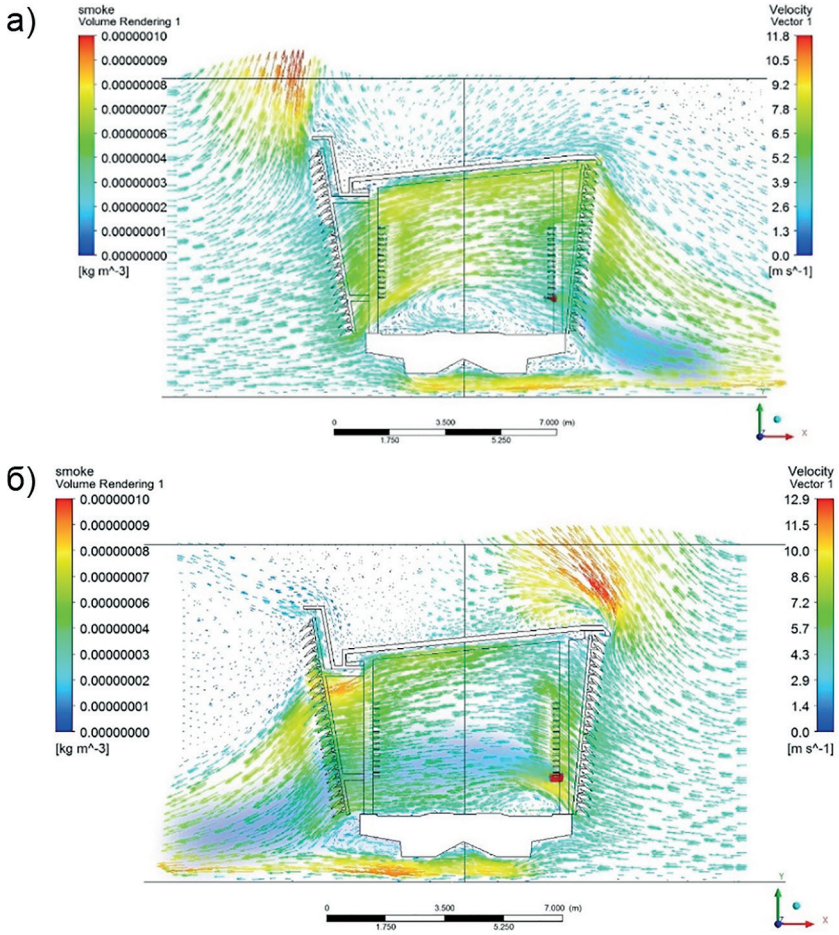

Рис. 4. Векторы скорости движения воздуха и концентрация токсичных газов и дыма (CO и CO_2) для первого сечения: Северный ветер (v = 3,9 м/с) (а); Южный ветер (v = 4,6 м/с) (б)

Fig. 4. Air velocity vectors and concentration of fire gases (CO and CO_2) for the first section: North wind (v = = 3.9 m/s) (a); South wind (v = 4.6 m/s) (b)

Результаты компьютерного моделирования естественного проветривания

Результаты расчетов по сценариям аварийных ситуаций с распределением дыма и токсичных газов (моделируемых как смесь в соответствии с процентным содержанием по табл. 1) по метромосту при различном ветре для рассматриваемых сечений приведены на рис. 4—7. Как видно из результатов моделирования, существенное влияние на распределение дыма имеют конструкторские решения. На открытых участках, сквозных по бортам, прикрытых от атмосферных осадков только ламелями, осуществляется интенсивный вынос токсичных газов и дыма. При этом существенное значение имеет место возникновения пожара и направления ветра. При нахождении пожара с подветренной стороны (рис. 4, *б*) или при объединенных путях (рис. 6, *а*;

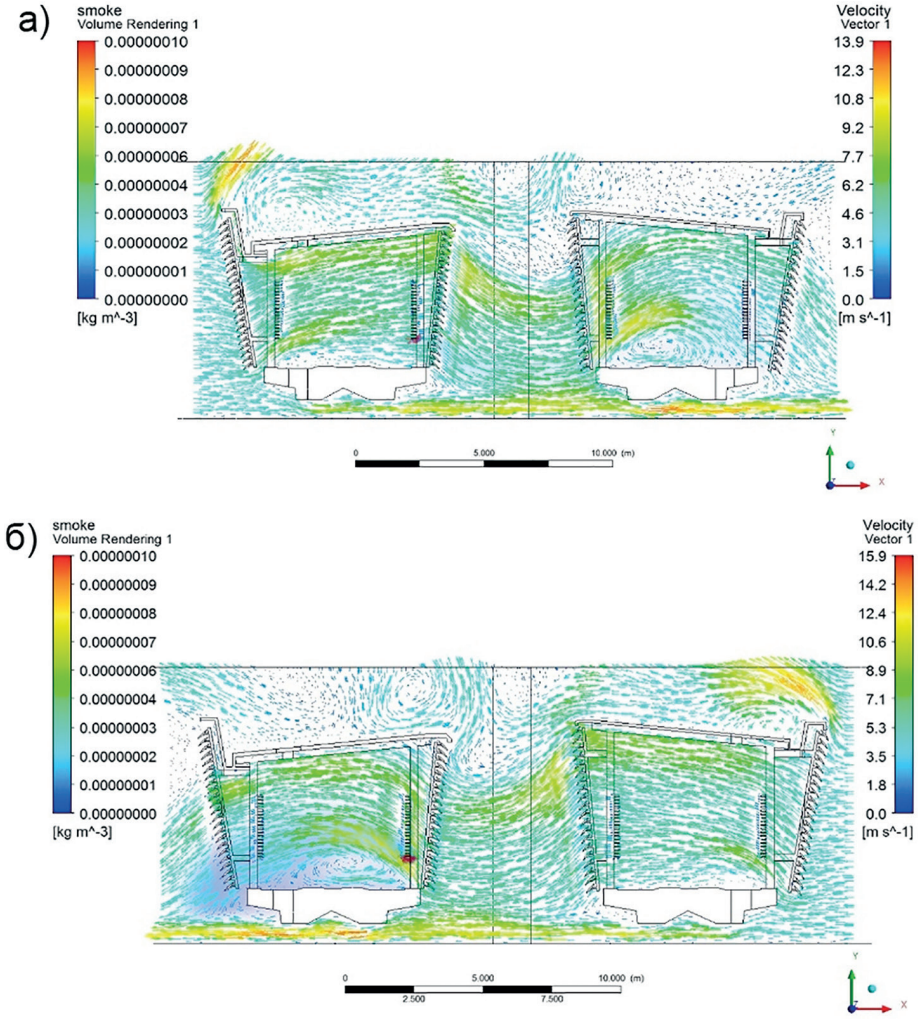

Рис. 5. Векторы скорости движения воздуха и концентрация токсичных газов и дыма (CO и CO_2) для второго сечения: Северный ветер (v = 3,9 м/с) (а); Южный ветер (v = 4,6 м/с) (б)

Fig. 5. Air velocity vectors and concentration of fire gases (CO and CO_2) for the second section: North wind (v = 3.9 m/s) (a); South wind (v = 4.6 m/s) (b)

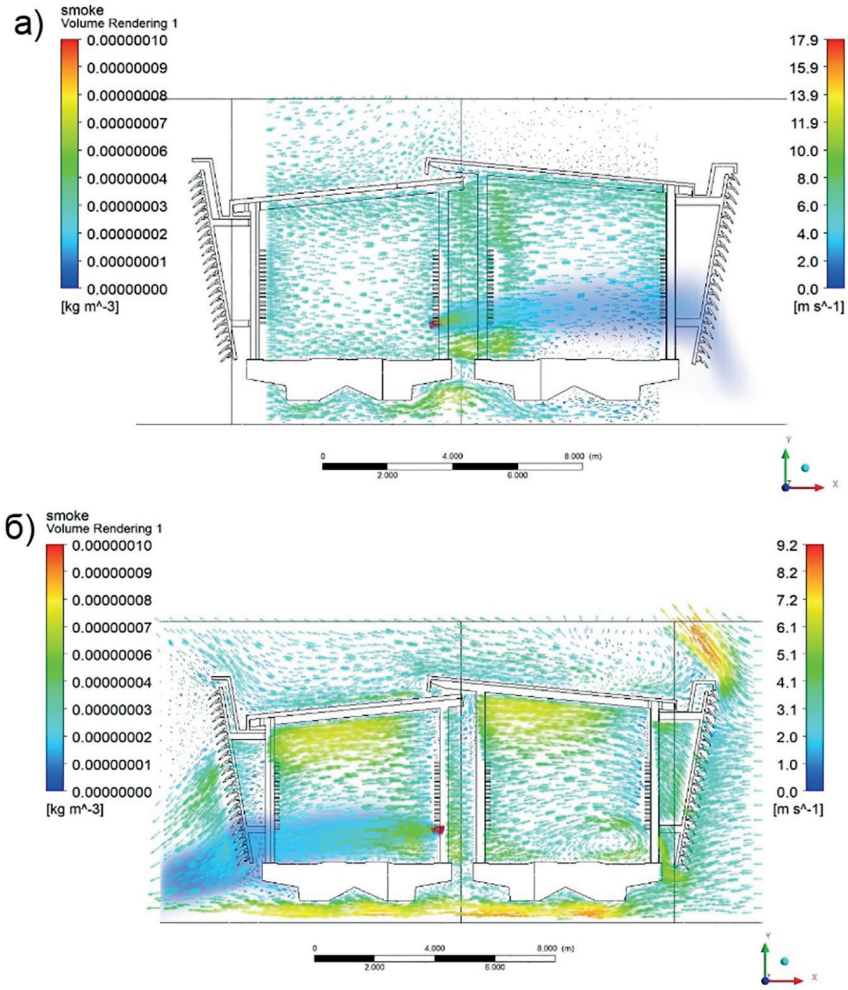

Рис. 6. Векторы скорости движения воздуха и концентрация токсичных газов и дыма (CO и CO_2) для третьего сечения: Западный ветер (v = 5,7 м/с) (а); Восточный ветер (v = 2,9 м/с) (б)

Fig. 6. Air velocity vectors and concentration of fire gases (CO and CO_2) for the third section: West wind (v = 5.7 m/s) (a); East wind (v = 2.9 m/s) (b)

6, *б*; 7, *б*) наблюдается переток дыма через метромост в поперечном направлении.

При устройстве между путями бетонной глухой перегородки (рис. 7), происходит накопление дыма с повышением концентрации, и вынос токсичных газов и дыма осуществляется медленно.

На рис. 8 приведены результаты расчетов при температуре окружающего воздуха равной –42 °С (самая низкая температура, зафиксированная в районе размещения метромоста). По представленным данным можно сделать вывод о том, что дым резко охлаждается и опускается ниже конструкций метромоста. Следовательно, отрицательные температуры наружного воздуха повышают уровень безопасности на открытых участках метромоста.

На рис. 9 приведены результаты расчетов сценария аварийной ситуации распределения дыма по метромосту при восточном ветре со скоростью 2,9 м/с для

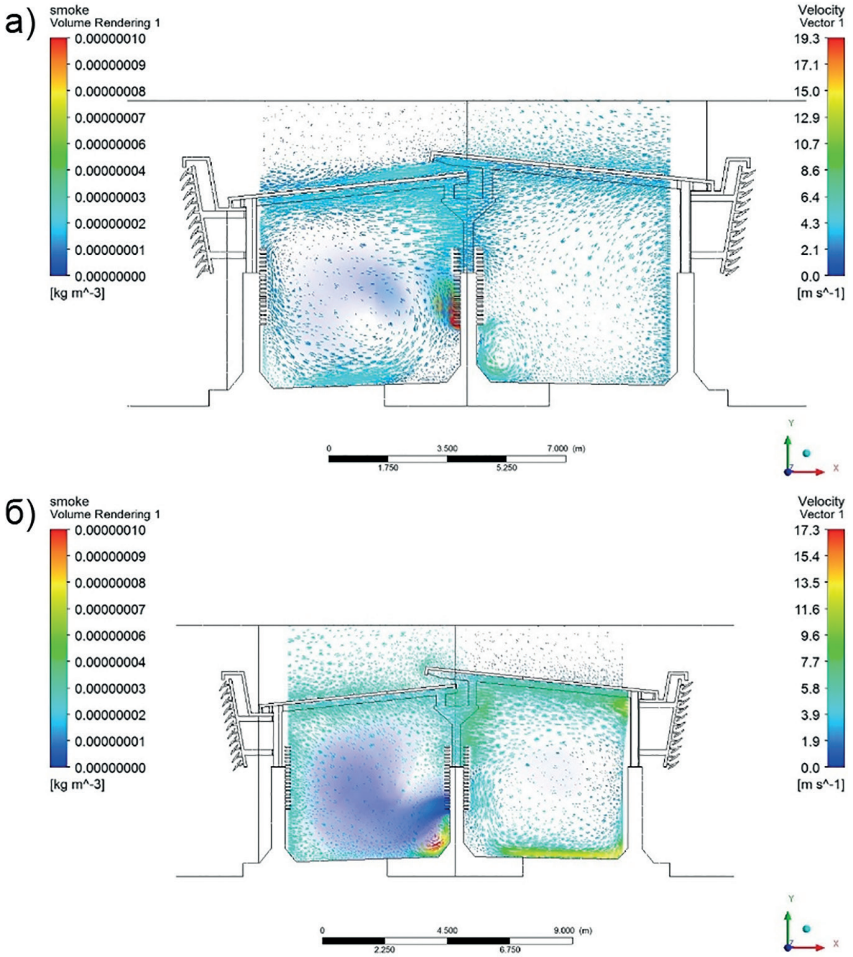

Рис. 7. Векторы скорости движения воздуха и концентрация токсичных газов и дыма (CO и CO_2) для четвертого сечения: Западный ветер (v = 5,7 м/с) (а); Восточный ветер (v = 2,9 м/с) (б)

Fig. 7. Air velocity vectors and concentration of fire gases (CO and CO_2) for the fourth section: West wind (v = 5.7 m/s) (a); East wind (v = 2.9 m/s) (b)

сечения, представленного на рис. 3, *г*, при температуре воздуха 39 °С (максимальная зафиксированная температура в районе местонахождения метромоста).

При движении воздуха в исследуемом домене происходит изменение его скорости и направления ввиду наличия лобовых сопротивлений, каковые представляют собой элементы конструкции метромоста (рис. 9). Выделение дыма при горении кабеля происходит с заданного участка модели (горящего кабеля). Воздействие потока воздуха приводит к распространению смеси газов по направлению воздушного потока. Основное направление движения воздуха задается бетонным перекрытием и ламелями и проходит под крышей метромоста. В нижней части наблюдаются две зоны рециркуляции. В этих зонах происходит скопление дыма. Часть дыма выносится за пределы одного пути метромоста.

Проведенный нестационарный расчет, показывающий распределение токсичных газов и дыма в движении, показал, что этот процесс в течение незначитель-

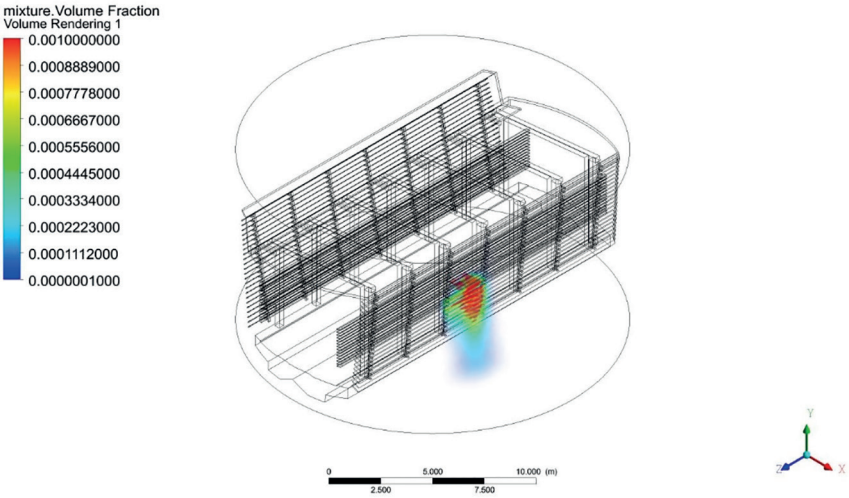

Рис. 8. Результаты численного моделирования выделения токсичных газов и дыма (CO и CO_2) при температуре окружающего воздуха t = –42 °C

Fig. 8. Results of numerical simulation of the release of fire gases (CO and CO_2) at ambient temperature t = = –42 °C

ного периода времени стабилизируется. Это позволило принять решение о достаточности проведения стационарного расчета при допущении непрекращающегося горения в течение 15 мин. В этот период времени выделение дыма задается с постоянным массовым расходом и концентрацией со всей поверхности горения.

Образование зон рециркуляции над путями метромоста при значительном задымлении может привести к существенному снижению видимости. При определенных условиях (ветровая обста-

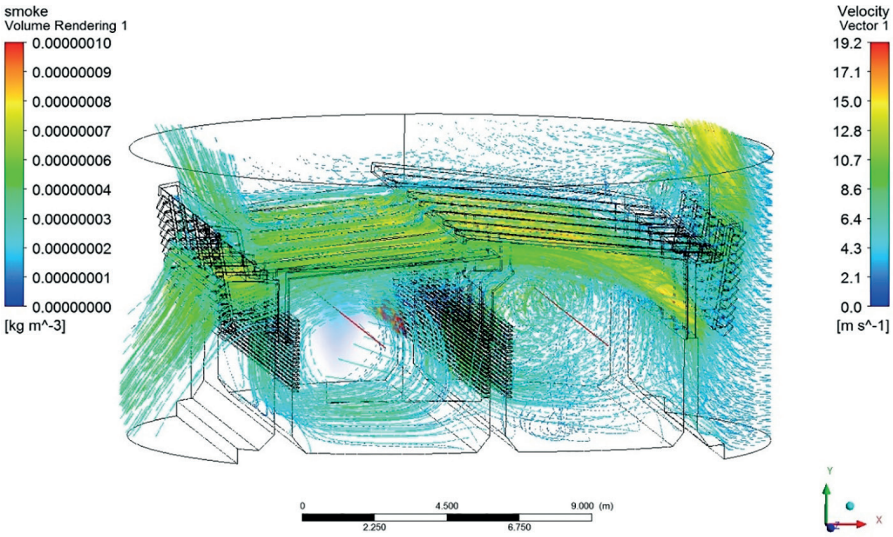

Рис. 9. Результаты численного моделирования выделения токсичных газов и дыма (CO и CO_2) при температуре окружающего воздуха t = 39°C

Fig. 9. Results of numerical simulation of the release of fire gases (CO and CO_2) at ambient temperature t = 39 °C

новка в районе метромоста, значительное дымообразование) может возникнуть ситуация попадания дыма в зону рециркуляции что приведет к его накапливанию в нижней части метромоста. Данная ситуация присуща всем типовым сечениям метромоста, для которых проводились исследования. Более пристальное внимание следует уделить сечению метромоста с бетонными перекрытиями в нижней его части, снижающих эффективность проветривания зон над путями.

Полученные результаты моделирования отражают наблюдаемые физические явления и позволяю количественно оценивать их параметры.

Актуальность темы исследований для мегаполисов России не вызывает сомнений. Данную тему исследований необходимо развивать так как это делают в зарубежных странах [13—15]. При этом там большое внимание уделяется натурным [16, 17] и лабораторным [18] экспериментам для верификации численных результатов моделирования. В нашем случае скорее всего возможны только лабораторные исследования.

Заключение

Проведенные полевым методом исследования распространения продуктов горения в пределах метромоста с учетом влияния метеоусловий для условий московской области позволили сделать следующие выводы.

1. При отрицательных температурах наружного воздуха происходит быстрое охлаждение токсичных газов и дыма. В связи с тем, что плотность их выше плотности воздуха, они опускаются вниз не распространяясь по метромосту. В зависимости от рассматриваемого участка метромоста в одних случаях наблюдается скопление на почве, в других токсичные газы и дым опускаются ниже путей метромоста. Другие опасные факторы пожара (температура и снижение концентрации кислорода) также рассматривались, но ввиду открытой связи с атмосферой распределение полей повышенной температуры распространяется на небольшое расстояние рядом с местом горения. Концентрация кислорода быстро восстанавливается. В последующих работах данным факторам пожара будет уделено особое внимание. Следовательно, отрицательные температуры наружного воздуха повышают уровень безопасности на открытых участках метромоста в случае возникновения пожара на метромосту для исследованных конструкций.

2. Наиболее сложная ситуация, при распределении токсичных газов и дыма, возникает при штиле, что повышает задымленность в зоне видимости машиниста на аварийном участке и концентрацию токсичных газов. Поэтому максимальное расстояние, на которое распространяется дым по метромосту, и предельную видимость следует определять именно при этом условии (когда ветер отсутствует).

3. Наличие ветра существенно повышает уровень безопасности за счет выноса токсичных газов и дыма.

4. При наличии участков со сложными геометрическими характеристиками (например, бетонные перегородки), снижающими эффективность естественной вентиляции метромоста, для них необходимо разрабатывать дополнительные мероприятия по обеспечению пожарной безопасности.

5. Полученные результаты показали адекватность разработанной модели, что позволяет рекомендовать данный метод для широкого использования при оценке пожарной опасности объектов городского транспорта. Открытых статистических данных о метеоусловиях достаточно для определения начальных и граничных условий при проведении трехмерного моделирования. Однако,

данные по фактическому составу продуктов горения кабеля некоторых видов отсутствуют и производителем кабельной продукции не предоставляются, что требует дополнительного проведения специальных исследований.

Представленный подход определения эффективности проветривания и безопасности эксплуатации метромоста может быть применен в аналогичных проектах.

В дальнейшем полученные результаты исследований должны быть использованы для проработки специальных мероприятий или дополнительных конструкций при проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Куликова Е. Ю.*, *Конюхов Д. С.* Мониторинг риска аварий при освоении подземного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 97–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_97.

2. *Куликова Е. Ю.*, *Потапова Е. В.* Синтез управленческих решений для обеспечения безопасности подземного строительства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 2. — С. 62–69. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_62.

3. *Kulikova E., Ivannikov A.* Geographic information systems in geological monitoring during the construction of urban underground structures / Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. Conference Proceedings, Monitoring 2019. 2019, pp. 1 — 5. DOI: 10.3997/2214-4609/201903192.

4. *Ryzhova L. V.*, *Titova T. S.*, *Gendler S. G.* Ensuring environmental safety during the construction and operation of tunnels in residential areas // Procedia Engineering. 2017, vol. 189, pp. 404–410. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.064.

5. *Krasyukova E., Aynbinder I., Ivannikov A.* A rational approach to the management of underground mining in complex hydrogeological and geomechanical conditions based on a risk assessment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 684, no. 1, article 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012006.

6. *Maslak V., Boytsov D., Danilov A., Levina E., Gendler S.* Innovative engineering solutions for improving operational safety and efficiency of subways with two-way tunnels // Procedia Engineering. 2016, vol. 165, pp. 214–223.

7. *Каледина Н. О.*, *Кобылкин С. С.*, *Кобылкин А. С.*, *Кондрев Р. С.*, *Белецкий Д. Н.* Оценка эффективности естественного проветривания метромоста в случае возгорания кабеля с учетом защитных конструкций от климатических осадков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10-1. — С. 17 — 28. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_17.

8. *Суриков А. В.*, *Лешенюк Н. С.* Расчет видимости в помещениях в условиях пожара с применением программного комплекса FDS // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. — 2018. — Т. 2. — № 2. — С. 147 — 160.

9. *Кобылкин С. С.*, *Тимченко А. Н.*, *Кобылкин А. С.* Применение компьютерного моделирования при выборе параметров работы пылеотсоса, встраиваемого в проходческие комбайны // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 3. — С. 21 — 27. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-3-21-27.

10. *Маркова Т. В.*, *Жлуктов С. В.* Развитие моделей горения в ПК FlowVision / Инженерные системы-2012: Труды Международного форума. — М.: МАКС Пресс, 2012. — С. 89 — 95.

11. *Yu H.* Comparison of the spreading characters of fire products in the typical metro stations of Washington, D.C. and Guangzhou // Urban Rail Transit. 2021, vol. 7, pp. 269–284. DOI: 10.1007/s40864-021-00160-9.

12. *Jiaqiang Han, Zihao Wang, Pengqiang Geng* The effect of blockage and tunnel slope on smoke spread and ceiling temperature distribution in a natural-ventilated metro depot // Energy and Buildings. 2021, vol. 253, article 111540. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111540.

13. *Kubinyecz V., Teodosiu C.* Review of numerical studies on ventilation systems for subway networks in emergency situations // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 664, no. 1, article 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/664/1/012093.

14. *Król A., Król M.* Some tips on numerical modeling of airflow and fires in road tunnels // Energies. 2021, vol. 14, no. 9, article 2366. DOI: 10.3390/en14092366.

15. *Kubinyecz F.-V., Teodosiu C.* Verification of ventilation system efficiency in a curved subway tunnel in case of fire using numerical modeling / Proceedings of 10th International Conference on Energy and Environment (CIEM 2021). 2021. DOI: 10.1109/CIEM52821.2021.9614790.

16. *Król A., Król M.* Study on hot gases flow in case of fire in a road tunnel // Energies. 2018, vol. 11, no. 3, article 590. DOI: 10.3390/en11030590.

17. *Juraeva M., Ryu K. J., Jeong S.-H., Song D. J.* Influences of the train-wind and air-curtain to reduce the particle concentration inside a subway tunnel // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016, vol. 52, pp. 23—29. DOI: 10.1016/j.tust.2015.11.008.

18. *Flores-Herrera L. A., Sandoval-Pineda J. M., Silva-Rivera U. S., Tamayo-Meza P. A., Rivera-Blas R.* CFD simulation of obstructed ventilation ports in a subway tunnel section // International Journal of Simulation Modelling. 2017, vol. 16, no. 3, pp. 386—398. — DOI: 10.2507/IJSIMM16(3)2.380. ГИАБ

REFERENCES

1. Kulikova E. Yu., Konyukhov D. S. Accident risk monitoring in underground space development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 97–103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_97.

2. Kulikova E. Yu., Potapova E. V. Synthesis of managerial decisions to the effect of underground construction safety. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 62–69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_62.

3. Kulikova E., Ivannikov A. Geographic information systems in geological monitoring during the construction of urban underground structures. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. Conference Proceedings, Monitoring 2019*. 2019, pp. 1—5. DOI: 10.3997/2214-4609/201903192.

4. Ryzhova L. V., Titova T. S., Gendler S. G. Ensuring environmental safety during the construction and operation of tunnels in residential areas. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 189, pp. 404–410. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.064.

5. Krasyukova E., Aynbinder I., Ivannikov A. A rational approach to the management of underground mining in complex hydrogeological and geomechanical conditions based on a risk assessment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 684, no. 1, article 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012006.

6. Maslak V., Boytsov D., Danilov A., Levina E., Gendler S. Innovative engineering solutions for improving operational safety and efficiency of subways with two-way tunnels. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 165, pp. 214–223.

7. Kaledina N. O., Kobylkin S. S., Kobylkin A. S., Kondrev R. S., Beleckij D. N. Evaluation of the effectiveness of natural ventilation of a metro bridge in the event of a cable fire, taking into account protective structures from climatic precipitation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10-1, pp. 17—28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_17.

8. Surikov A. V., Leshenyuk N. S. Raschet vidimosti v pomeshcheniyah v usloviyah pozhara s primeneniem programmnogo kompleksa FDS. *Vestnik Universiteta grazhdanskoy zashchity MCHS Belarusi*. 2018, vol. 2, no. 2, pp. 147—160. [In Russ].

9. Kobylkin S. S., Timchenko A. N., Kobylkin A. S. Use of computer simulation in the selection of operating parameters for the dust extractor built into the roadheader. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 3, pp. 21—27. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-3-21-27.

10. Markova T. V., Zhluktov S. V. Development of gorenje models in FlowVision PC. *Inzhenernye sistemy-2012. Trudy Mezhdunarodnogo foruma* [Engineering Systems-2012: Proceedings of the International Forum], Moscow, MAKS Press, 2012, pp. 89—95.

11. Yu H. Comparison of the spreading characters of fire products in the typical metro stations of Washington, D.C. and Guangzhou. *Urban Rail Transit*. 2021, vol. 7, pp. 269–284. DOI: 10.1007/s40864-021-00160-9.

12. Jiaqiang Han, Zihao Wang, Pengqiang Geng The effect of blockage and tunnel slope on smoke spread and ceiling temperature distribution in a natural-ventilated metro depot. *Energy and Buildings*. 2021, vol. 253, article 111540. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111540.

13. Kubinyecz V., Teodosiu C. Review of numerical studies on ventilation systems for subway networks in emergency situations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 664, no. 1, article 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/664/1/012093.

14. Król A., Król M. Some tips on numerical modeling of airflow and fires in road tunnels. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 9, article 2366. DOI: 10.3390/en14092366.

15. Kubinyecz F.-V., Teodosiu C. Verification of ventilation system efficiency in a curved subway tunnel in case of fire using numerical modeling. *Proceedings of 10th International Conference on Energy and Environment (CIEM 2021)*. 2021. DOI: 10.1109/CIEM52821.2021.9614790.

16. Król A., Król M. Study on hot gases flow in case of fire in a road tunnel. *Energies*. 2018, vol. 11, no. 3, article 590. DOI: 10.3390/en11030590.

17. Juraeva M., Ryu K. J., Jeong S.-H., Song D. J. Influences of the train-wind and air-curtain to reduce the particle concentration inside a subway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016, vol. 52, pp. 23 — 29. DOI: 10.1016/j.tust.2015.11.008.

18. Flores-Herrera L. A., Sandoval-Pineda J. M., Silva-Rivera U. S., Tamayo-Meza P. A., Rivera-Blas R. CFD simulation of obstructed ventilation ports in a subway tunnel section. *International Journal of Simulation Modelling*. 2017, vol. 16, no. 3, pp. 386 — 398. DOI: 10.2507/IJSIMM16(3)2.380.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кобылкин Сергей Сергеевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: kobylkin.s@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2626-208X,
Каледина Нина Олеговна[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: nok52@mail.ru,
Кобылкин Александр Сергеевич — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: aleksandr@kobylkin.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1512-890X,
Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
[1] ГИ НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Кобылкин С.С., e-mail: kobylkin.s@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.S. Kobylkin[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: kobylkin.s@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2626-208X,
N.O. Kaledina[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: nok52@mail.ru,
A.S. Kobylkin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Institute of Problems of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
111020, Moscow, Russia, e-mail: aleksandr@kobylkin.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1512-890X,
[1] Mining Institute, National University of Science
and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: S.S. Kobylkin, e-mail: kobylkin.s@misis.ru.

Получена редакцией 01.07.2022; получена после рецензии 19.09.2022; принята к печати 10.10.2022.
Received by the editors 01.07.2022; received after the review 19.09.2022; accepted for printing 10.10.2022.