УДК 622.8

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОВЕТРИВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСОВ

С.Г.ГЕНДЛЕР, *д-р техн. наук*, *профессор*, *sgendler@mail.ru*
Санкт-Петербургский горный университет, *Россия*

В статье приведена характеристика отечественных и зарубежных транспортных тоннелей и отмечены преимущества их размещения в условиях города. Одним из главных факторов, определяющих негативное воздействие на окружающую среду, в период проходки тоннелей является работа горной техники, а при эксплуатации – движение транспортных средств. Сделан анализ принципиальных отличий особенностей загрязнения атмосферного воздуха при строительстве тоннелей и зданий на поверхности. Примеры иллюстрируют уровни негативного воздействия исходящей вентиляционной струи на атмосферный воздух, предложены схемы вентиляции, уменьшающие это влияние. Показано, что в период эксплуатации автодорожных тоннелей загрязнения воздушной среды могут распространяться на значительные расстояния от порталов тоннеля. Выполнены численные расчеты концентраций оксидов углерода и азота при удалении исходящей воздушной струи через порталы и через шахты , сооруженные вблизи них. Описаны технические решения по очистке тоннельного воздуха с помощью электростатических фильтров.

***Ключевые слова*:** городской тоннель, воздух, схема вентиляции, загрязнения окружающей среды, исходящая струя, концентрация оксидов углерода и азота, портал тоннеля, очистка воздуха.

Количество транспортных тоннелей в крупных городах России несопоставимо мало по сравнению с аналогичными тоннелями, расположенными в странах Европы, Америки, Азии (табл.1). Однако, тенденция увеличения количества тоннелей, в том числе в мегаполисах, делает необходимым предварительный анализ особенностей их строительства и эксплуатации в условиях мегаполисов.

Преимущества подземного размещения автодорожных магистралей хорошо известны:

• разгрузка наземных магистралей от транспортных потоков, приводящих к снижению негативного воздействия на окружающую среду;

• повышенная защищенность подземных дорог от воздействия природных факторов (дождь, снег, гололед и т.п.);

• сокращение протяженности городских автомобильных дорог;

• минимальное нарушение архитектурных ансамблей городов;

• высвобождение земельных участков на поверхности, характеризующихся высокой стоимостью земли, для сооружения значимых социально-культурных и жилых объектов;

• увеличение эстетической ценности районов строительства и эксплуатации.

Реализация большей части перечисленных преимуществ возможна при условии применения технически обоснованных технологий сооружения и эксплуатации автодорожных тоннелей. В частности, это относится к учету экологических требований при выборе параметров производственных и эксплуатационных процессов, приводящих к загрязнению атмосферного воздуха, водных бассейнов, в том числе поверхностных и подземных вод, почвы; повышенному шумовому и вибрационному воздействию, увеличенному расходу энергетических и материальных ресурсов.

Таблица 1

Характеристика некоторых городских автодорожных тоннелей

Название тоннеля	Город, страна	Протяженность, км	Тип тоннеля	Число тоннелей/ полос движения транспорта
Бруклин-Бэттери (Хью Кэрри)	Нью-Йорк, США	2,78	Подводный	1/4
Куинс-Мидтаун	Нью-Йорк, США	5,5	Подземный	2
Голланд	Нью-Йорк, США	2,6	Подводный	2/2
Под р.Эльбой	Гамбург, Германия	3,33	Подводный	4/8
Дублинский портовой	Дублин, Ирландия	4,5	Подводный	2/4
Западный А86	Париж, Франция	10	Подземный	Один двухуровневый /6
		5,5		1/2
Химелрайк	Грац, Австрия	1,05	Подземный	1/2
Южный обходной на дороге М30	Мадрид, Испания	7,21	Подземный	1/3
Северный обходной на дороге М30	Мадрид, Испания	10,53	Подземный	1/3
Вестершельдский	Амстердам, Нидерланды	6,6	Подводный	Один двухуровневый/4
Ютлибергский	Цюрих, Швейцария	4,4	Подземный	2/2
SMART	Куала-Лумпур, Малайзия	9,45	Подземный	Один трехуровневый/6
Серебряноборский	Москва, Россия	3,13	Подземный	3/6
Алабяно-Балтийский	Москва, Россия	2,02	Подземный	1/6
Лефортовский	Москва, Россия	3,2	Подземный (подводный)	1/7
Гагаринский	Москва, Россия	1,1	Подземный	2/6
Волоколамский	Москва, Россия	1,73	Подземный	1/6
Канонерский	Санкт-Петербург, Россия	0,927	Подводный	1/2
С1 в дамбе КЗН	Санкт-Петербург, Россия	1,19	Подводный	2/3

Одним из главных факторов, во многом определяющим уровень негативного воздействия на окружающую среду, являются выбросы загрязняющих веществ, которые в период сооружения тоннелей выделяются при работе погрузочно-доставочных машин, а при эксплуатации тоннелей – от движущихся транспортных средств. Попадающие в атмосферу токсичные вещества приводят не только к превышению предельно допустимых значений их содержания в воздухе, но и загрязняют водные бассейны и почвы, расположенные в пределах зоны влияния выбросов.

Воздействие загрязняющих веществ на состояние окружающего воздуха в период строительства тоннелей отличается от воздействия при строительстве любых объектов на поверхности. Эта особенность связана с неравномерным характером влияния загрязняющих веществ на атмосферный воздух – минимальное в начальный период строительства, оно затем увеличивается по мере увеличения протяженности проходимых выработок и интенсивности проходческих работ. После завершения основного этапа строительства во время обустройства тоннелей воздействие на атмосферный воздух вновь снижается.

Вышесказанное подтверждается данными натурных исследований при строительстве автодорожного тоннеля тоннельного комплекса № 1 на совмещенной железнодорожной и автомобильной дороге Адлер – горно-климатический курорт «Альпико-Сервис» (рис.1). Протяженность тоннеля составляет 2350 м [1]. При его сооружении использовались погрузочно-доставочные машины, суммарная мощность двигателей которых достигала во время максимальной интенсивности работ 300 кВт. Проветривание тоннеля в период проходки осуществлялось по нагнетательной схеме, предусматривающей подачу свежего воздуха в забой с помощью расположенного у портала тоннеля, по воздуховоду и отвод исходящей воздушной струи через портал тоннеля (рис.2). Количество свежего воздуха, подаваемого в забой, определялось мощностью погрузочно-доставочного оборудования и составляло 22 $м^3/с$.

Из графика на рис.1 следует, что, хотя концентрация диоксида серы на рабочих местах не превышает предельно допустимые значения (10 $мг/м^3$), в атмосфере она оказывается выше максимально разового значения ПДК для воздуха населенных мест более чем в четыре раза.

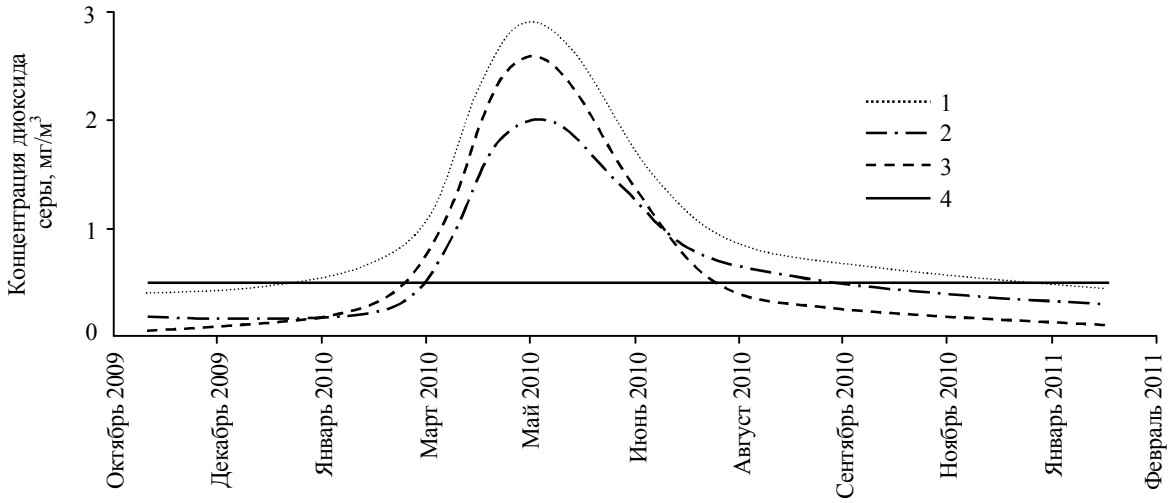


Рис.1. Содержание диоксида серы в тоннельном и атмосферном воздухе на участке от забоя до границы строительной площадки

1 – в забое тоннеля; 2 – на выходе из портала; 3 – в 50 м от портала; 4 – максимально разовая ПДК диоксида серы

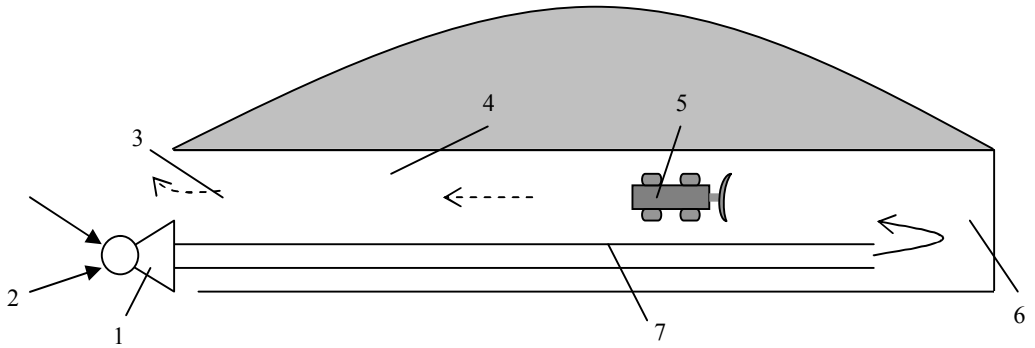


Рис.2. Нагнетательная схема проветривания тоннеля в период его проходки

1 – нагнетательный вентилятор; 2 – свежий воздух; 3 – загрязненный воздух; 4 – сквозной участок проветривания; 5 – дизельный погрузчик; 6 – забой; 7 – воздуховод;

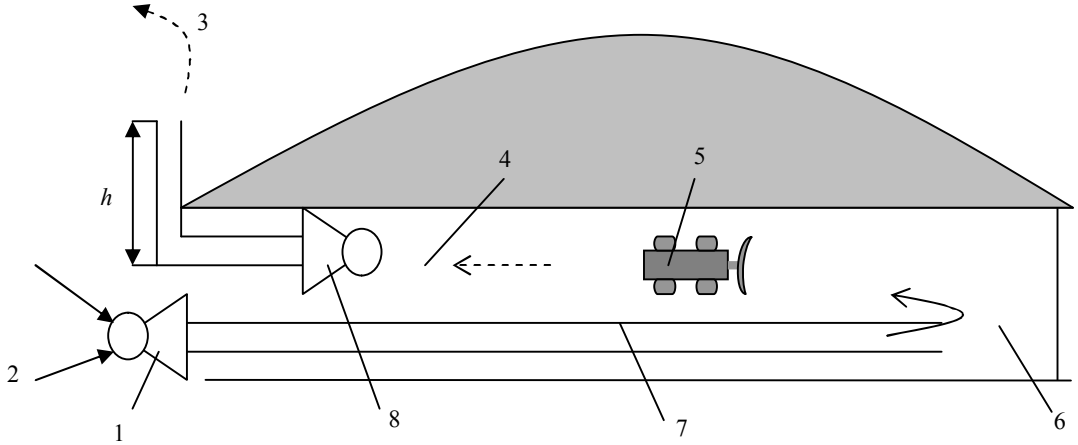


Рис.3. Нагнетательно-всасывающая схема проветривания тоннеля в период его проходки

1-7 – соответствуют рис.2; 8 –нагнетательный вентилятор

Снижение загрязнения атмосферного воздуха до нормативных величин может быть достигнуто за счет увеличения количества воздуха, подаваемого в тоннель до 30 $м^3/с$ (что и было реализовано при сооружении тоннеля). Другой путь состоит в применении схемы проветривания, предполагающей отвод загрязненного воздуха из тоннеля по воздуховоду с вертикальным участком высотой *h* (рис.3).

При эксплуатации автодорожных тоннелей, в отличие от автомобильных дорог, где выбросы загрязняющих веществ распределены по участку дороги равномерно, выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух происходит или из портала тоннеля, или из вентиляционной выработки (ствол, штольня и т.п.). Концентрация загрязняющих веществ в исходящей воздушной струе определяется протяженностью тоннеля, его сечением, профилем трассы, схемой вентиляции и количеством воздуха, интенсивностью и структурой транспортного потока, скоростью движения транспорта, количеством полос (путей), направлениями движения транспортных средств (однонаправленное или двухнаправленное). Локальный выброс загрязняющих веществ может привести к существенному ухудшению экологической обстановки в районах, расположенных вблизи мест удаления из тоннеля исходящей воздушной струи.

На рис.4 и 5 представлены схема и результаты натурных измерений распределения относительных концентраций загрязняющих веществ, содержащихся в исходящей из тоннеля воздушной струе, в зависимости от расстояния от сечения портала и направления ветра.

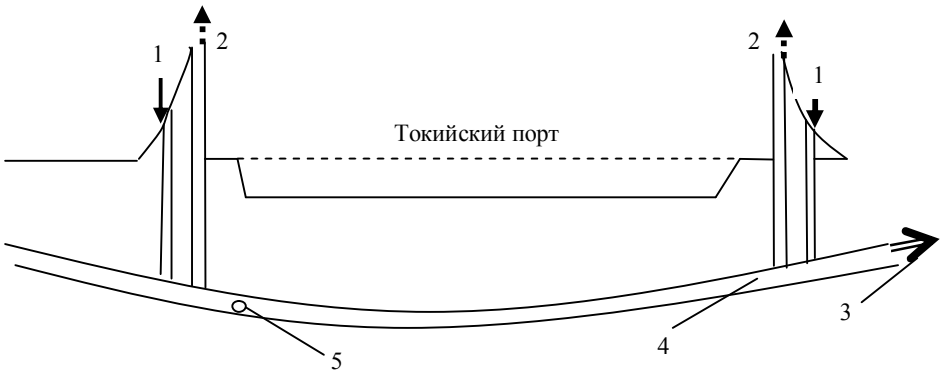


Рис.4. Профиль Токийского портового тоннеля

1 – приточный воздух; 2 – исходящий воздух; 3 – направление движения транспорта; 4 – точка измерения скорости воздушного потока в тоннеле; 5 – точка выпуска трассерного газа SF6

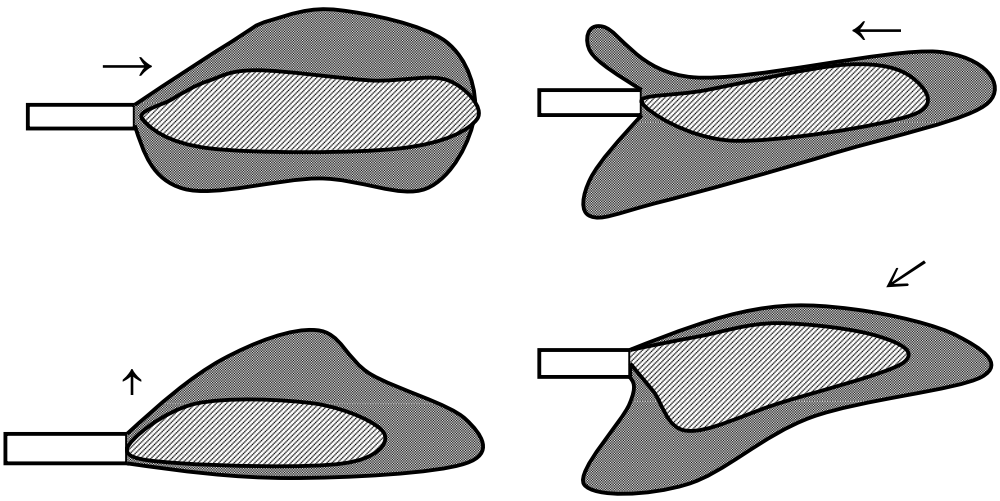


Рис.5. Распределение концентрации трассерного газа вокруг портала тоннеля с исходящей воздушной струей при различных направлениях ветра относительно оси портала (показаны стрелками)

Измерения были осуществлены на подводном тоннеле в порту г. Токио, имеющем протяженность 1325 м и шесть полос движения, по которым осуществлялось движение 2000-4000 машин в час. Для эксперимента использовался трассерный газ SF6, который вводился в сечение тоннеля на расстоянии 300 м от одного из его порталов (рис.4). Смесь трассерного газа с тоннельным воздухом перемещалась по тоннелю к выходному порталу и выбрасывалась на поверхность, где проводились площадные измерения концентрации трассерного газа.

В период проведения измерений искусственная вентиляция тоннеля не работала [5]. Эта ситуация соответствовала продольной схеме проветривания, при которой воздух движется параллельно оси тоннеля.

Данные рис.5 свидетельствуют о том, что прочих равных условиях распределение концентрации загрязняющих веществ зависит от направления действия ветра относительно направления движения транспортного потока (оси тоннеля). Если при поперечном относительно оси тоннеля направлении ветра максимум концентрации находится на расстоянии между 50 м и 100 м, то при действии ветра параллельно оси тоннеля расположение изолиний концентраций совпадает с направлением движения транспортного потока. Эти закономерности необходимо учитывать при размещении вблизи порталов тоннелей зданий и сооружений различного назначения.

Анализ влияния загрязненного воздуха, выходящего из портала тоннеля, на распределение концентрации оксида углерода в атмосфере был осуществлен с помощью программного комплекса УПРЗ «Эколог», версия 3,0. Концентрация оксида углерода в удаляемом из тоннеля воздухе была принята равной 60 мг/м^3, а расход воздуха 200 м^3/с. Величина выброса оксида углерода при этом составила 12 г/с [2].

Расчет рассеивания оксидов углерода и азота в атмосферном воздухе осуществлялся на основе модели магистрали, имеющей длину, равную протяженности струи, истекающей из портала тоннеля. Результаты вычислений (рис.6) позволили показать, что при удалении исходящей воздушной струи через порталы тоннеля концентрации оксидов углерода и азота в атмосфере только на расстояниях от портала, равных соответственно 250 и 450 м, достигают нормативной величины. При этом на удалении 50 м от портала концентрации оксидов углерода и азота приближаются соответственно к 6 и 14 ПДК. Кроме того, оказалось, что концентрации оксидов углерода и азота в атмосферном воздухе практически не зависят от высоты над поверхностью дороги.

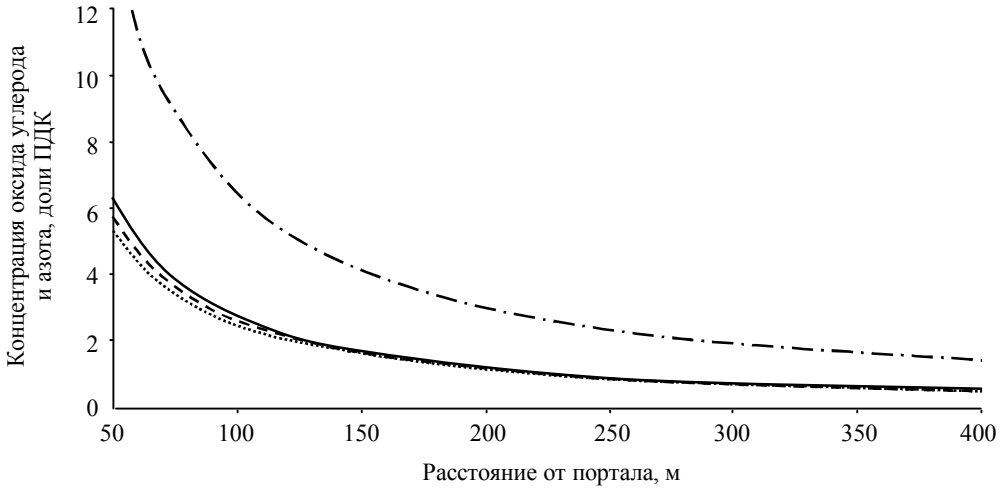


Рис.6. Расчетное изменение концентрации оксида углерода и азота в атмосферном воздухе на различных расстояниях от портала тоннеля с исходящей вентиляционной струей; штрихпунктирная линия соответствует концентрации диоксида азота; сплошные и пунктирные линии – концентрации диоксида углерода на высотах 2, 10 и 30 м

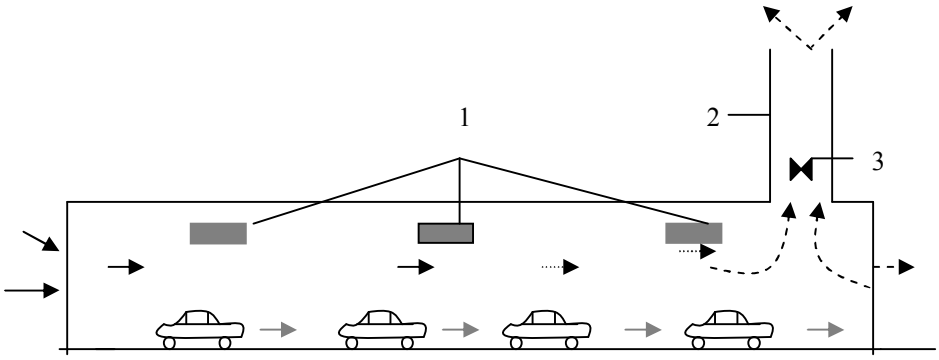


Рис.7. Продольная схема вентиляции, использующая струйные вентиляторы (1), шахту для отвода из тоннеля загрязненного воздуха (2) и вытяжной вентилятор (3)

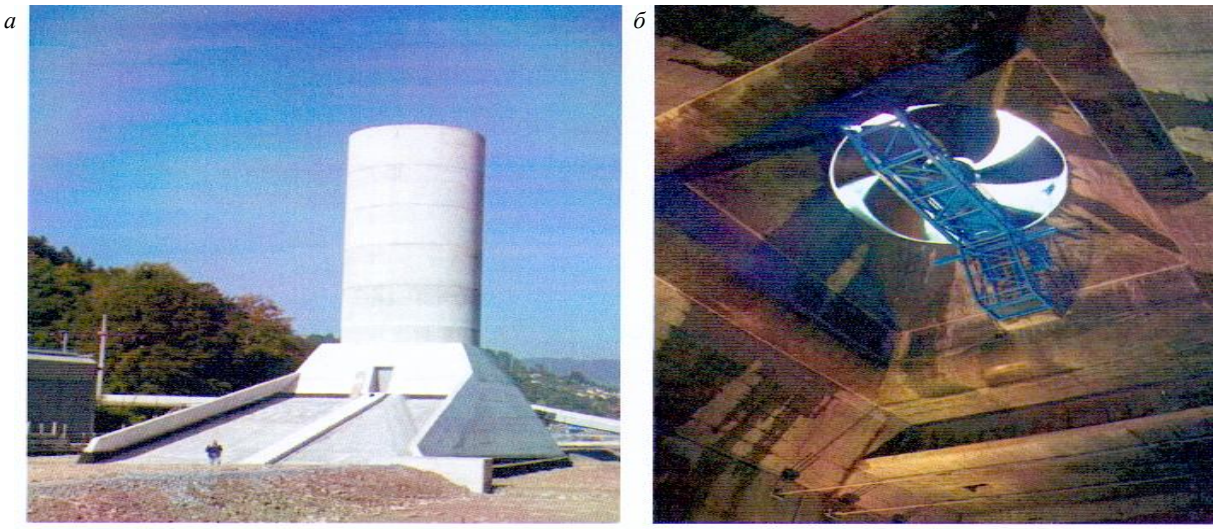


Рис.8. Сооружения для проветривания автодорожного тоннеля в Швейцарии (г. Люцерн): *а* – вентиляционная шахта; *б* – вытяжной вентилятор в своде тоннеля

Снижение концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе для условий продольной схемы проветривания тоннелей может быть осуществлено за счет отвода загрязненного воздуха из тоннеля по шахтам, пройденным вблизи порталов (рис.7). Подобная схема проветривания реализована на одном из тоннелей в Швейцарии (рис.8).

Эффективность использования отвода тоннельного воздуха через специальную шахту для нормализации концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе будет зависеть при прочих равных условиях от высоты шахты относительно уровня дороги. Для оценки влияния высоты шахты на распределение концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в качестве примера осуществлен расчет рассеивания оксида углерода, содержащегося в тоннельном воздухе. Исходные данные соответствовали данным, используемым при расчетах рассеивания выбросов из портала тоннеля. В процессе расчетов вентиляционные шахты моделировались «точечными» источниками с высотой, совпадающей с высотой шахты над поверхностью автодороги.

Из анализа расчетных данных, представленных на рис.9, следует, что высоты вентиляционной шахты 4,5 м достаточно для обеспечения нормативных значений концентрации оксида углерода в атмосфере в пределах 100 м от портала тоннеля. При необходимости размещения зданий и сооружений на более близком расстоянии высота выброса загрязненного воздуха должна быть увеличена до 5-6 м.

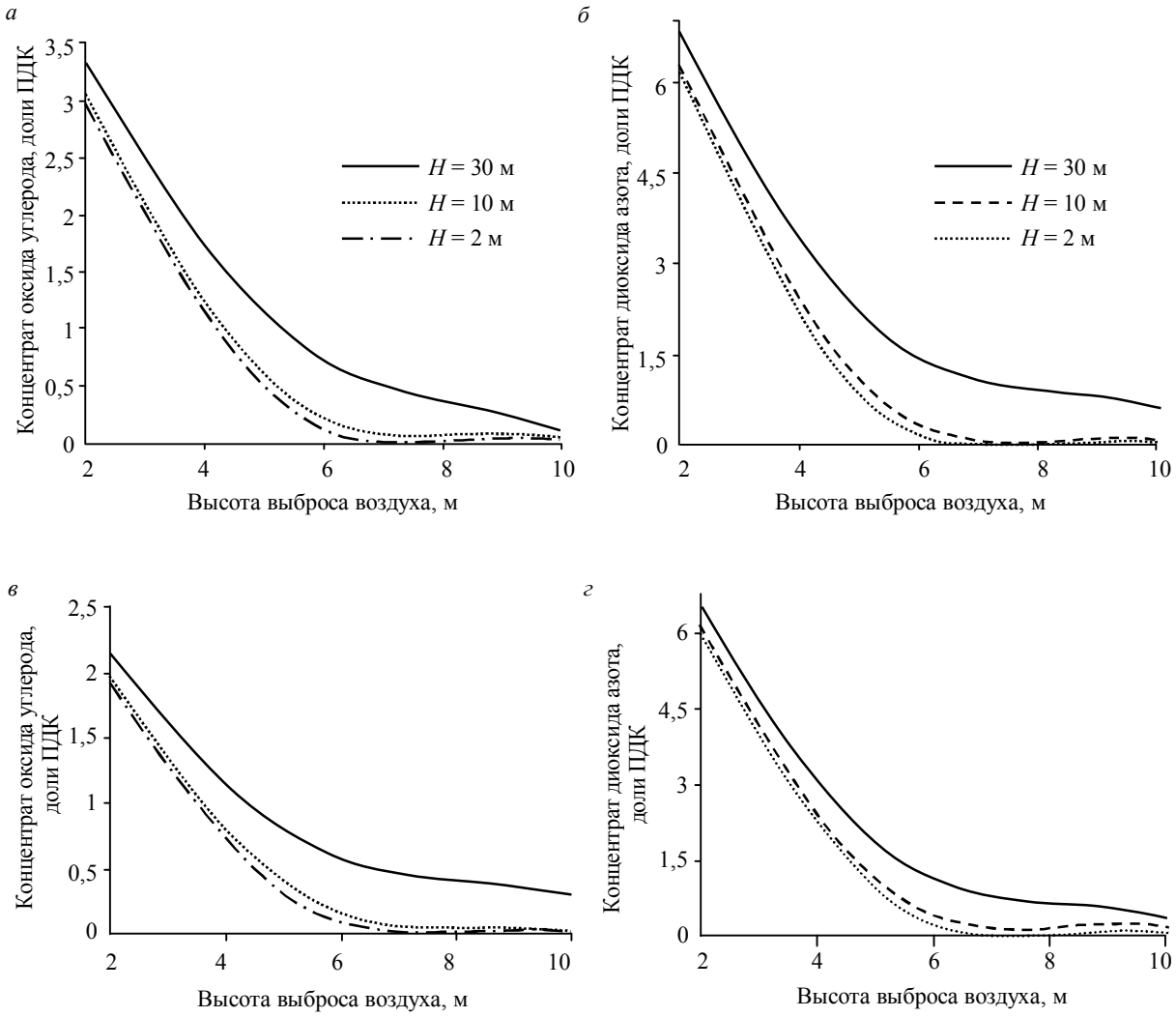


Рис.9. Расчетное изменение содержания оксидов углерода (*а*, *в*) и азота (*б*, *г*) в атмосферном воздухе на расстоянии 50 м (*а*, *б*) и 100 м (*в*, *г*) от портала по оси дороги в зависимости от высоты выброса исходящей вентиляционной струи над ее поверхностью. Кривые $H = 30$; 10; 2 м соответствуют концентрациям оксида углерода на различных высотах от поверхности дороги

Использование вентиляционных шахт для удаления из тоннеля загрязненного воздуха может быть применено в случае использования полупоперечной или поперечной схем проветривания, а также для удаления дымовых газов при возникновении пожара.

В тех случаях, когда не удается снизить концентрацию загрязняющих веществ, выбрасываемых из тоннеля, в атмосферном воздухе в местах фактического или предполагаемого размещения объектов гражданского строительства до допустимых значений только с помощью вентиляционных методов, системы проветривания должны быть дополнены системами очистки воздуха [3]. Работа этих систем может осуществляться на основе электростатических, каталитических или биологических процессов. Исследования, выполненные на автодорожных тоннелях Австрии (10 км тоннеля «Плабуч», 5,4 км тоннеля «Катсчберг») показали, что выбор способа очистки зависит от химического состава выбрасываемого из тоннеля воздуха, который определяется интенсивностью движения транспортных средств и структурой транспортного потока (процентное количество машин различного типа) [4].

Высокая эффективность использования для очистки тоннельного воздуха электростатических фильтров (выше 90 %) была подтверждена во время их испытаний в Норвегии на 3,91 км в тоннеле «Хелл» [5]. При этом электростатические фильтры были размещены у

свода тоннеля в комплексе со струйными вентиляторами. Преимуществами размещения электростатических фильтров у свода тоннеля является низкая стоимость и высокая эффективность применения в случае пожара для очистки от дымовых газов [5]. Электростатические фильтры при удалении загрязненного воздуха стволов могут быть размещены или на сопряжении стволов с вентиляционными каналами, по которым удаляется загрязненный воздух (в том числе непосредственно с тоннелем), или на устье ствола.

Выводы

При выборе схем проветривания автодорожных тоннелей, строительство и последующая эксплуатация которых осуществляется в условиях мегаполисов, необходимо принимать во внимание возможное негативное воздействие на окружающую среду выбросов загрязняющих веществ, которые в период сооружения тоннелей выделяются при работе погрузочно-доставочных машин, а при эксплуатации тоннелей – от движущихся транспортных средств.

При планировании размещения вблизи порталов тоннелей зданий и сооружений различного назначения необходимо учитывать распределение концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, которое зависит от сочетания орографических (рельеф местности), метеорологических (роза ветров, термодинамические параметры воздуха) и технических (химический состав и количество удаляемого из тоннеля воздуха, тип и количество выработок, используемых для удаления воздуха, характеристика застройки, окружающей тоннель) факторов.

Использование вентиляционных стволов для удаления загрязненного воздуха дает возможность существенно снизить экологическую нагрузку на атмосферу территорий, прилегающих к транспортным тоннелям.

При недостаточной эффективности применения вентиляционных методов для снижения концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе до допустимых значений в местах фактического или предполагаемого размещения объектов гражданского строительства необходимо использование систем очистки тоннельного воздуха перед его выбросом за пределы тоннеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гендлер С.Г.* Оценка загрязнения атмосферного воздуха при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей / С.Г.Гендлер, В.А.Рогалев // Записки Горного института. 2012. Т.195. С.152-155.

2. *Гендлер С.Г.* Оценка загрязнения атмосферы при эксплуатации транспортных тоннелей / С.Г.Гендлер, Е.И.Домпальм, А.Ю.Котомина // Горный информационный бюллетень. 2009. № 5. С.377-381.

3. *Anderl H.*, *Henning J.E.* Ceiling mounted air filtration techology used fof longitudinal ventilation / BHRg. 9th International Symposium Aerodynamics and Ventilation Tunnels. Aosta. Italy. 1997. P.981-991.

4. *Pucher K.* Purification processes for tunnel air / BHRg. 9th International Symposium Aerodynamics and Ventilation Tunnels. Aosta, Italy, 1997. P.961-968.

5. Atmospheric dispersion characteristics of polluted air from the portal of an urban road tunnel / I.Yoshizawa, K.Limura, H.Tanabe, K.Horiuchi / BHRg 8th International Symposium Aerodynamics and Ventilation Tunnels. Liverpool. UK. Scotland. 1994. P.791-808.

REFERENCE

1. *Gendler S.G.*, *Rogalev V.A.* Estimation of pollution of atmospheric air at construction and operation of transport tunnels. Proceeding of the Mining. 2012. Vol.195, p.152-155.

2. *Gendler S.G.*, *Dompalm E.I.*, *Kotomina A.Yu.* Evaluation of pollution of the atmosphere at operation of transport tunnels. Mining informational and analytical bulletin. 2009. N 5, p.377-381.

3. *Anderl H.*, *Henning J.E.* Ceiling mounted air filtration techology used fof longitudinal ventilation. BHRg. 9th International Symposium Aerodynamics and Ventilation Tunnels, Aosta, Italy, 1997, p.981-991.

4. *Pucher K*. Purification processes for tunnel air. BHRg. 9th International Symposium Aerodynamics and Ventilation Tunnels, Aosta, Italy, 1997, p.961-968.

5. *Yoshizawa I*., *Limura K*., *Tanabe H*., *Horiuchi K*. Atmospheric dispersion characteristics of polluted air from the portal of an urban road tunnel. BHRg 8th International Symposium Aerodynamics and Ventilation Tunnels, Liverpool, UK. Scotland, 1994, p.791-808.

ECOLOGICAL ASPECTS OF VEHICLE TUNNELS VENTILATION IN THE CONDITIONS OF MEGALOPOLISES

S.G.GENDLER, *Dr. of Engineer Science*, *professor*, *sgendler@mail.ru*
Saint-Petersburg Mining University, *Russia*

The characteristic of Russia and foreign vehicle tunnels are provided in paper and advantages of their placement in the conditions of the city are noted. It is shown that one of the main factors defining negative impact on environment in the period of tunnels driving is mine equipment, and at operation – vehicles. The analysis of essential differences of features of pollution of atmospheric air at construction of tunnels from its pollution at construction of buildings on a surface is given. The examples illustrating levels of negative impact of the upcast ventilation shaft airflow on atmospheric air are given and the ventilation schemes reducing this influence are offered. It is shown that during operation of road tunnels of pollution of the air environment can extend on considerable distances from tunnel portals. Numerical calculations of concentration of carbon oxides and nitrogen during removal of the upcast ventilation shaft airflow through portals and through the mines built near them are executed. Technical solutions on purifications of tunnel air by means of electrostatic filters are described.

***Key words*:** city tunnel, ventilation scheme, environmental pollution, upcast, concentration of carbon oxides and nitrogen, tunnel portal, purification of air.