



**ПАРАМЕТРЫ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ АДИАБАТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА
В ПОДЗЕМНЫХ ТОННЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА**

И. В. Лугин, Е. Л. Алферова

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: alferova_el@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Приведены результаты вычислительного моделирования процесса адиабатического охлаждения тоннельного воздуха при фазовом переходе воды из жидкого состояния в газообразное в условиях тоннеля метрополитена при различных параметрах распылительного оборудования. Показано, что данный способ существенно снижает требования к вентиляционному оборудованию по сравнению со способом удаления тепловых избытков только вентиляцией. Для удаления теплоизбытков вентиляцией производительность одного вентилятора (при параллельной работе двух вентиляторов) составляет до 269 м³/с, мощность — 727 кВт. При использовании адиабатического охлаждения тоннельного воздуха максимальная производительность одного вентилятора равна 67.5 м³/с при мощности 104 кВт, мощность насосов не превышает 50 кВт при максимальном расходе воды 1.5 м³/ч.

Тоннельная вентиляция, микроклимат, метрополитен, теплый период года, теплоизбытки, адиабатическое охлаждение воздуха

**EQUIPMENT PARAMETERS OF EVAPORATIVE AIR COOLING SYSTEMS
IN UNDERGROUND SUBWAY TUNNELS**

I. V. Lugina and E. L. Alferova

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: ivlugin@misd.ru, alferova_el@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The paper presents the results of computational modeling of evaporative cooling of tunnel air during the phase transition of water from a liquid to a gaseous state in subway tunnel conditions at various parameters of spraying equipment. It is shown that this method significantly reduces the requirements for ventilation equipment in comparison with the method of removing heat excesses by ventilation alone. To remove heat excesses by ventilation alone, the capacity of one fan (with two fans running in parallel) is up to 269 m³/s, and the power is 727 kW. When using evaporative air cooling, the maximum capacity of one fan is 67.5 m³/s with a power of 104 kW, the pump power does not exceed 50 kW with a maximum water flow rate of 1.5 m³/h.

Tunnel ventilation, microclimate, subway, warm season of year, heat excesses, evaporative air cooling

В метрополитенах России наблюдается постоянный рост пассажиропотока и, как следствие, увеличение количества поездов на линиях. Например, в московском метрополитене частота движения поездов составляет до 45 пар/ч, при том что большинство станций рассчитаны на частоту движения не более 35 пар/ч [1–3]. Это приводит к значительным избыткам тепловыделений в метрополитене, которые создают дискомфортные тепловые условия, превышающие нормативные санитарные требования. Удаление теплоизбытков возможно путем увеличения воздухообмена действием тоннельных вентиляторов, но требует большой производительности,

соответственно, большего типоразмера. В действующих метрополитенах это невыполнимо, так как установка нового вентиляционного оборудования ограничена габаритами существующих подземных вентиляционных сооружений. В проектируемых метрополитенах применение вентиляторов с высокой производительностью приведет к высоким финансовым затратам. В работе [4] представлен почасовой тепловой баланс, рассчитанный на основе работы [5] для метрополитена с двухпутным тоннелем на глубине заложения 20 м, тепловые избытки в часы максимального пассажиропотока и частоты движения достигают 6 МВт. Воздухообмен по удалению теплоизбытков, рассчитанный с учетом суточного изменения температуры наружного воздуха и температуры удаляемого воздуха +33° [6], будут превышать возможности оборудования тоннельной вентиляции. Например, требуемая производительность одного вентилятора при параллельной работе двух вентиляторов в расчетный промежуток времени составит 269 м³/с. Такую производительность можно обеспечить шахтным вентилятором, мощность которого при производительности 269 м³/с составит 727 кВт [7–9].

Одним из способов решения проблемы перегрева является адиабатическое охлаждение воздуха (АОВ). Во время распыления воды (скрытая теплота парообразования которой при нормальных условиях 2258 кДж/кг [10]) в движущемся потоке воздуха, происходит ее испарение, а теплоизбытки расходуются на фазовый переход. Такой способ применяется для охлаждения воздуха на улицах, в жилых и общественных помещениях, помещениях аграрного и промышленного комплексов, фасадных строительных конструкциях и т. д. [11–18]. В Ташкентском метрополитене, например, АОВ используется в системе основной вентиляции, что позволяет в летнее время очищать воздух, подаваемый на станции и в тоннель от пыли, увлажнять и понижать его температуру с 40 до 25°С [19–21]. Изложенное подтверждает актуальность проведенного исследования.

Описание способа адиабатического охлаждения воздуха и модели. В данной работе рассмотрен способ АОВ при распылении воды форсунками высокого давления непосредственно в путевом пространстве тоннеля (рис. 1а).

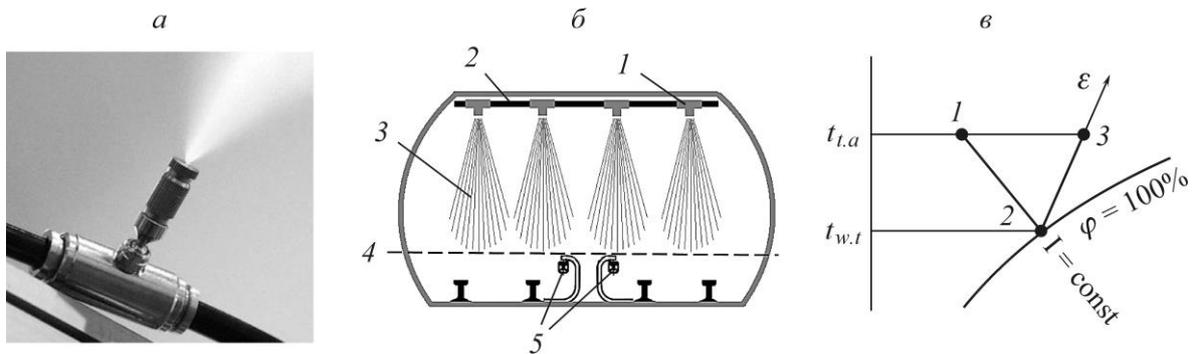


Рис. 1. а — форсунка высокого давления в работе; б — схема АОВ в тоннеле: 1 — форсунки; 2 — трубопровод; 3 — распыляемая вода; 4 — верхний уровень кожуха контактных рельсов; 5 — контактные рельсы; в — процесс обработки воздуха на диаграмме Рамзина: 1 — точка с параметрами тоннельного воздуха; 2 — точка с параметрами охлажденного (увлажненного) воздуха; I — количество теплоты, содержащееся в тоннельном и охлажденном воздухе; ε — луч процесса нагрева воздуха в тоннеле; 3 — точка с параметрами снова нагретого тоннельного воздуха; $t_{t,a}$ — температура тоннельного воздуха, °С; $t_{w,t}$ — температура мокрого термометра

Этот способ охлаждения воздуха дает возможность привести в норму показатели микроклимата, при этом он практически не исследован для условий метрополитена. Здесь важно, чтобы частицы воды полностью испарялись, не достигая поверхности кожуха контактного рельса (рис. 1б). Процесс обработки воздуха на диаграмме Рамзина представлен на рис. 1в.

В тоннель подается наружный воздух, он ассимилирует часть тепловых избытков и нагревается до максимально допустимой по нормам температуры воздуха ($+33^{\circ}\text{C}$ [6]) — точка 1 на рис. 1в. В тоннеле распыляется расход воды, требуемый для ассимиляции оставшихся тепловых избытков. Воздух охлаждается до параметров точки 2, затем снова нагревается по лучу процесса ε до $+33^{\circ}\text{C}$ (точка 3, рис. 1в), вновь орошается водой и остывает и т. д. Цикл “нагрев – орошение” можно повторять в течение всего времени работы метрополитена и в те часы, когда происходит перегревание воздуха.

Моделирование процесса орошения воздуха в тоннеле осуществлялось в программном пакете ANSYS Fluent. Для моделирования испарения жидкостей использован подход Эйлера – Лагранжа, при котором дискретная фаза в виде капель задается на входе в расчетную область. Преимущество этого подхода над остальными при моделировании распыления воды доказано в работе [22]. Математическая модель распыления и испарения воды основана на усредненных уравнениях Навье – Стокса с учетом межфазного взаимодействия, замкнутого с помощью $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Модель учитывает двустороннее взаимодействие жидкой и газообразной фаз, перенос импульса, энергии и массы [23]. Сила сопротивления частиц рассчитывается по модели Шиллера – Науманна, теплопередача в окружающую среду моделируется с использованием подхода Ранца – Маршалла [24]. Межфазный массоперенос зависит от того, находится ли давление насыщенного пара капли выше или ниже точки кипения. Точка кипения определяется уравнением Антуана, описывающим связь между давлением насыщенных паров и температурой для чистых компонентов.

В двухпутный тоннель требуется подавать расходы воздуха $90-135\text{ м}^3/\text{с}$ [25, 26]. При этом, как было отмечено, часть тепловых избытков удаляется за счет воздухообмена, а оставшееся тепло — путем орошения тоннельного воздуха. Расход воды на орошение G_w будет вычисляться через отношение неудаленных теплоизбытков Q_o и теплоты парообразования r .

Требуемый расход воды G_w при расходе воздуха $90\text{ м}^3/\text{с}$ на один перегон длиной 1.7 км [4] составляет 0.417 кг/с , при расходе воздуха $135\text{ м}^3/\text{с}$ — 0.301 кг/с . Для того чтобы капли при таких расходах воды полностью испарялись в тоннеле, не достигая кожуха контактного рельса, необходимы форсунки высокого давления. Системы увлажнения воздуха с форсунками работают с давлением $0.4-1.0\text{ МПа}$, которое обеспечивается поршневыми насосами [27].

При использовании системы АОВ наибольшая нагрузка на нее приходится в расчетные часы. Расчетный час определяется невыгодным сочетанием характеристик наружного и внутреннего климата. За расчетный час по наружному воздуху принимается время наступления максимальной температуры наружного воздуха в самые жаркие летние сутки, для условий Москвы — 15 ч [28]. Что касается внутреннего микроклимата, решающую роль в тепловом балансе помещений метрополитена, а значит и для определения расчетных часов, играют теплоступления от ходовой части поездов [29], они главным образом зависят от частоты движения поездов и пассажиропотока и наивысшие значения приобретают в часы пик. В работе [4] показано, что неблагоприятный с этой точки зрения промежуток времени — с 16 до 17 ч . Наибольшие теплоизбытки в этот час образуются вследствие повышения пассажиропотока и частоты движения поездов, а наибольший расход наружного воздуха необходим потому, что в этот час невелика разница температур внутреннего и наружного воздуха. Исследования проводились для двухпутного тоннеля глубиной заложения 20 м . Это обусловлено тем, что для данного случая из-за максимальны тепловых избытков и высокой температуры наружного воздуха потребуется наибольший расход воды. Если для этого случая заданный расход воды будет полностью испаряться, не достигая кожуха контактного рельса, то и для всех остальных случаев это условие будет выполняться.

Геометрия тоннеля принята по данным работы [26]. Исследования проводились для расчетной области в виде участка тоннеля длиной 200 м, в котором расположены 48 форсунок (12 рядов по 4 форсунки), расстояние от входа до первого ряда форсунок равно пяти гидравлическим диаметрам тоннеля, чтобы орошаемый водой поток воздуха имел установившийся режим движения. На входе в расчетную область задавалась скорость воздуха. Температура исходная 306 К (+ 33°C). Принятые допущения: стенка гладкая, адиабатическая, массовое содержание воды в воздухе равно нулю. Задача решалась в стационарной постановке, так как для исследования расчетной области, приближенной к натуральным размерам участка, не хватает вычислительной мощности компьютера при решении нестационарной задачи. Для каждой из 48 форсунок задавались следующие параметры: диаметр, соответствующие ему расход воды и давление впрыска, температура воды, угол распыла принимался постоянный, равный 120°.

Результаты и обсуждение. Проведена серия вычислительных экспериментов — изменялись параметры форсунок (диаметр, расход, давление) и расход воздуха на входе в расчетную область. Их результаты для расхода воздуха 90 м³/с сведены в таблицу. “Да” означает полное испарение частицы воды выше уровня кожуха контактного рельса, “нет” указывает на то, что частицы воды пересекли поверхность на уровне кожуха контактного рельса.

Результаты вычислительных экспериментов по распылению воды в тоннеле

Производительность форсунки, кг/с	Давление, МПа							
	1.0	2.5	3.0	4.5	5.8	7.0	7.5	8.4
500 мкм								
0.012	нет	нет	нет	да	да	да	да	да
0.002	нет	нет	нет	нет	нет	да	да	да
0.0027	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да	да
0.0031	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да	да
0.0037	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да	да
0.00445	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да	да
400 мкм								
0.000933	нет	нет	да	да	да	да	да	да
0.001478	нет	нет	нет	да	да	да	да	да
0.001983	нет	нет	нет	нет	да	да	да	да
0.002472	нет	нет	нет	нет	нет	да	да	да
0.00325	нет	нет	нет	нет	нет	да	да	да
300 мкм								
0.000681	нет	нет	да	да	да	да	да	да
0.001075	нет	нет	нет	да	да	да	да	да
0.001444	нет	нет	нет	нет	да	да	да	да
0.0018	нет	нет	нет	нет	да	да	да	да
0.00265	нет	нет	нет	нет	да	да	да	да

На рис. 2 представлены массовая доля воды в воздухе и размеры частиц в продольном сечении по центру тоннеля для случая полного испарения влаги до достижения ею уровня кожуха контактного рельса (расход воздуха 135 м³/с, диаметр форсунки 300 мкм, расход воды через одну форсунку 0.00265 кг/с, давление перед форсункой 5.8 МПа).

В результате вычислительного моделирования для случая, показанного на рис. 2 (расход воздуха 135 м³/с, расход воды через одну форсунку 0.00265 кг/с, 48 форсунок), на рассматриваемом участке длиной 200 м среднеобъемная температура воздуха после испарения воды достигла 304.15 К, т. е. изменение температуры составило $\Delta t_c = 1.85$ К от начальной температуры 306 К.

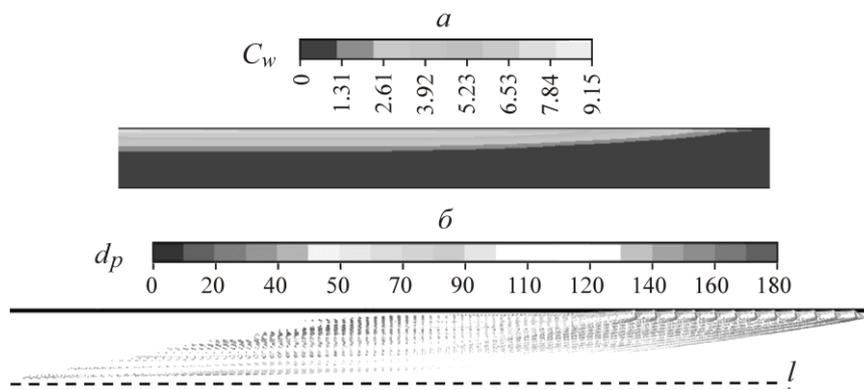


Рис. 2. Результаты вычислительного эксперимента для случая полного испарения влаги до достижения ею уровня кожуха контактного рельса (линия l) в продольном сечении тоннеля: a — распределение массовой доли воды в воздухе C_w , %; b — распределения облака орошения и диаметр частиц воды d_p , мкм

Аналитически изменение температуры воздуха можно рассчитать по формуле:

$$\Delta t_a = \frac{Q_o}{cL\rho} = \frac{C_w r}{cL\rho},$$

где Q_o — теплоизбытки, не удаляемые вентиляцией, кВт; c — теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); L — расход воздуха, м³/с; ρ — плотность воздуха, кг/м³; C_w — расход воды на орошение, кг/с; r — теплота парообразования воды, кДж/кг.

Для случая на рис. 2 получаем:

$$\Delta t_a = 0.00265 \cdot 48 \cdot 2258 / (1.005 \cdot 135 \cdot 1.2) = 1.76 \text{ К.}$$

Расхождение численного и аналитического решения в данном случае составило 4.86 %. При диаметре форсунки 400 мкм, расходе воды 0.00325 кг/с и давлении перед форсункой 7 МПа среднеобъемная температура по результатам численного расчета составляет 303.8 К, $\Delta t_c = 2.07$ К. Аналитически Δt_a получается равно 2.16 К. При диаметре форсунки 500 мкм, расходе 0.00445 кг/с и давлении перед форсункой 7.5 МПа $\Delta t_c = 2.84$ К, а $\Delta t_a = 2.96$ К. Расхождение соответственно 4.17 и 4.05 %.

При максимальных значениях расхода воздуха (135 м³/с), давления (8.4 МПа) и расхода воды (1.5 т/ч) и использовании форсунки диаметром 500 мкм, когда капли воды полностью испаряются в тоннеле и не достигают контактного рельса, мощность насосного оборудования составит 50 кВт [30], производительность одного вентилятора 67.5 м³/с, мощность вентилятора 104 кВт. На основе полученных данных определены области работы форсунок с полным испарением влаги в тоннеле для рассмотренных расходов воздуха рис. 3.

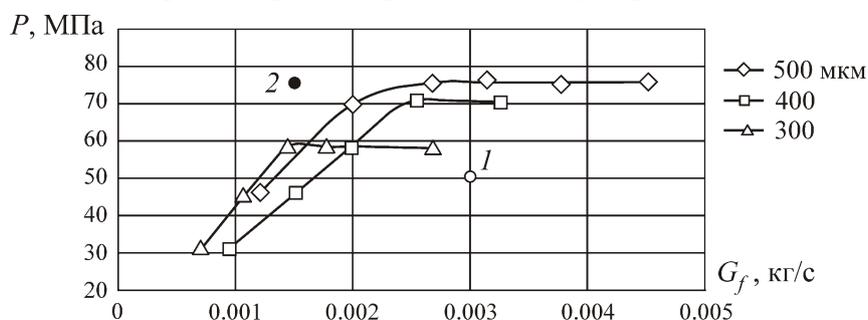


Рис. 3. Номограмма областей работы форсунок диаметрами 300, 400 и 500 мкм: P — давление воды перед форсункой; G_f — расход воды через одну форсунку; точка 1 — параметры, при которых разбрызгиваемая форсунками вода не испарится до уровня высоты контактного рельса; точка 2 — параметры, при которых происходит полное испарение разбрызгиваемой воды в тоннеле выше уровня контактного рельса

Линии на рис. 3 показывают границу области работы форсунки, т. е. при задании значений, лежащих на линии и выше нее, вся распыляемая вода будет испаряться до достижения поверхности кожуха контактного рельса. Например, если распылительное оборудование будет иметь параметры, соответствующие точке 1 (рис. 3), жидкость не успеет полностью испариться и достигнет уровня контактного рельса, потому что значения расхода и давления лежат ниже границы областей работы рассмотренных форсунок. Для форсунок с параметрами, соответствующими точке 2, наоборот, вода полностью испарится в зоне, лежащей выше уровня контактного рельса.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена и обоснована эффективность удаления теплоизбытков в метрополитене с помощью адиабатического охлаждения воздуха непосредственно в тоннеле. Для условий московского метрополитена удаление теплоизбытков воздухообменом вызывает необходимость применения установки шахтных вентиляторов с расходом воздуха до 279 м³/с и мощностью до 727 кВт, что приведет к высоким капитальным и эксплуатационным затратам. Путем вычислительного моделирования определены режимы работы форсунок, обеспечивающие испарение частиц воды до достижения ими кожуха контактного рельса. Показано, что использование системы адиабатического охлаждения воздуха значительно снижает требования к вентиляционному оборудованию — максимальная производительность одного вентилятора составит 67.5 м³/с при затрачиваемой мощности 104 кВт, мощность насосного оборудования не превысит 50 кВт при расходе воды 1.5 м³/ч. В результате исследования определены требуемые параметры распылительного оборудования системы адиабатического охлаждения воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Library.** Subways. Moscow Subway. Available at: <http://www.metro.ru/library/metropoliteny/192>, (accessed 3 May 2021). [Библиотека / Метрополитены / Московский метрополитен [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metro.ru/library/metropoliteny/192/>, свободный – (03.05.2021).]
2. **International Metro Assosiation.** Technical and operational indicators. Available at: http://asmetro.ru/metro/techno_ekonom, (accessed 12 June 2021). [Международная ассоциация “Метро” / Техничко-эксплуатационные показатели метрополитенов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://asmetro.ru/metro/techno_ekonom, свободный – (12.06.2021).]
3. **Metro.** Passenger traffic of the Moscow metro. Ultimate metro capabilities. Available at: http://asmetro.ru/metro/techno_ekonom, (accessed 12 June 2021). [Метрополитен / Пассажиропоток Московского метрополитена / Предельные возможности метрополитена [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.opklare.ru/m/passajiropotok_moskovskogo_metropolitena__predelnyie_vozmojnosti_metropolitena, свободный – (12.06.2021).]
4. **Lugin I. V. and Alferova E. L.** Generation and maintenance of the required air parameters in subway tunnels during warm seasons, Mining Informational and Analytical Bulletin, 2018, no. 11, pp. 63–69. [Лугин И. В., Алферова Е. Л. К вопросу создания и поддержания требуемых параметров внутреннего воздуха в тоннелях метрополитена в теплый период // ГИАБ. — 2018. — № 11. — С. 63–69.]
5. **Lugin I. V. and Alferova E. L.** Effect of annual cyclicity of heat flow variation in soil on estimated temperature balance in double-track underground railway tunnel, InterExpo GEO-Siberia, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 191–196. [Лугин И. В., Алферова Е. Л. Влияние годовой цикличности изменения теплового потока в грунт на расчетный тепловой баланс двухпутного тоннеля метрополитена // ИнтерЭкспо ГЕО-Сибирь. — 2016. — Т. 2. — № 3. — С. 191–196.]

6. **Set of rules** 122.13330.2012. Tunnels railway and road, set of rules, Updated edition of SNiP 32-04-2097: approved by the Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation on June 30, 2012: date of introduction 01.01.2013, Moscow, 2012, 132 pp. [СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-2097. – Утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012: дата введ. 01.01.2013. — М., 2012. — 132 с.]
7. **Mokhirev N. N.** Engineering calculations of mine ventilation: Construction. Reconstruction. Exploitation, Moscow, Nedra, 2007, 324 pp. [Мохирев Н. Н. Инженерные расчеты вентиляции шахт: Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. — М.: Недра, 2007. — 324 с.]
8. **Ivanovsky I. G.** Mine fans, Training manual, Publishing house of Far Eastern State Technical University, Vladivostok, 2003, 196 pp. [Ивановский И. Г. Шахтные вентиляторы / Учеб. пособие. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. — 196 с.]
9. **Babak G. A., Bocharov K. P., and Volokhev A. T.** Shaft fan installations of the main ventilation, Moscow, Nedra, 1982, 296 pp. [Бабак Г. А., Бочаров К. П., Волохов А. Т. Шахтные вентиляторные установки главного проветривания — М.: Недра, 1982. — 296 с.]
10. **Lugin I. V. and Alferova E. L.** Theoretical foundations of creating a microclimate of premises, Part I, Training manual, Publishing House of the Novosibirsk State University of architecture and Civil Engineering, 2016, 48 pp. [Лугин И. В., Алферова Е. Л. Теоретические основы создания микроклимата помещений Ч. 1. / Учеб. пособие. — Novosibirsk: Изд-во НГАСУ, 2016. — 48 с.]
11. **Yamada H., Yoon G., Okumiya M., and Okuyama H.** Study of cooling system with water mist sprayers: Fundamental Examination of Particle Size Distribution and Cooling Effects, Building Simulation, 2008, vol. 1, no. 3, pp. 214–222.
12. **Farnham C., Emura K., and Mizuno T.** Evaluation of cooling effects: outdoor water mist fan, Building Research and Information, 2015, vol. 43, no. 3, pp. 334–345.
13. **Livesley S.J., Marchionni V., Cheung P.K., Daly E., Pataki D. E.** Water Smart Cities Increase Irrigation to Provide Cool Refuge in a Climate Crisis, Earths Future, 2021, vol. 9, no. 1.
14. **Zhang T., Han Z., Du Z., Liu K., Zhang Z.** Cooling characteristics of cooking oil using water mist during fire extinguishment, Applied Thermal Engineering, 2016, vol. 107, pp. 863–869.
15. **Lara B., Omar E.** Urban Oasis: a Thermal Retrofitting Proposal for the Santiago Metro, Revista Habitat Sustentable, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 17–29.
16. **Li Y., Dong L.** Research on Mobile Water Spray Device Reducing the Temperature of Metro Fire, Applied Mechanics and Materials, 2012, Vols. 166-169, pp. 2731-2734.
17. **Huang X., Li X., Sheng X. W., and Su X. Q.** The research of the key problem of evaporative cooling system in dry areas subway, Energy Procedia, 2014, vol. 65, pp. 1965–1968.
18. **Zhou Y., Bi H., Wang H., Zhao Y., and Lei B.** Time-delay Characteristics of Air-conditioning System for Subway Trains, Journal of Building Engineering, 2021, vol. 40.
19. **Di Giuseppe E., Ulpiani G., Cancellieri C., Di Perna C., D’Orazio M., and Zinzi M.** Numerical modelling and experimental validation of the microclimatic impacts of water mist cooling in urban areas, Energy and Buildings, 2021, vol. 231.
20. **Guo C., Nie W., Xu C. W., Peng H. T., Zhang C. C., Li S. L., Yue N., Liu Z. Q., Yang S. B., Ma Q. X., and Li M. H.** A study of the spray atomization and suppression of tunnel dust pollution based on a CFD-based simulation, Journal of Cleaner Production, 2020. vol. 276.
21. **Kalinichev V. P.** Subways, Moscow, Publishing House “Transport”, 1988, 277 pp. [Калиничев В. П. Метрополитены. — М.: Изд-во “Транспорт”, 1988. — 277 с.]
22. **Montazeri H., Blocken B., and Hensen J. L. M.** Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis, Building and Environment, 2015, no. 83, pp. 129–141.

23. **Gabaruk A. V., Strelets M. Kh., and Shur M. L.** Modeling of turbulence in calculations of complex flows (manual), St. Petersburg, Publishing House of the St. Petersburg State Polytechnic University, 2012, 88 pp. [**Габарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений / Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во СПбПУ, 2012. — 88 с.]
24. **Ranz W. E. and Marshal W. R. Jr.** Evaporation from Drops. Part I and Part II, Chem. Eng. Prog., 1952, no. 48(4), pp. 173–180.
25. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., Alferova E. L., and Kiyanitsa L. A.** Evaluation of ventilation flow charts for double-line sub-way tunnels without air chambers, Journal of Mining Science, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 740–751.
26. **Lugin I. V. and Alferova E. L.** Integrated performance analysis of ventilation schemes for double-line subway tunnel, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, pp. 012043.
27. **Industrial air** humidifiers and fog generators. Injectors. Available at: <https://par-tuman.ru/forsunka1>, (accessed 03.04.2020). [**Промышленные увлажнители** воздуха и генераторы тумана. Форсунки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://par-tuman.ru/forsunka1>, свободный – (03.04.2020)]
28. **Bogoslovsky V. N.** Heating and ventilation, Part 2, Ventilation, Moscow, Stroyizdat, 1976, 439 pp. [**Богословский В.Н.** Отопление и вентиляция. Ч. 2. Вентиляция. — М.: Стройиздат, 1976. — 439 с.]
29. **Krasyuk A. M. and Lugin I. V.** Ventilation of subways. Publishing House of SB RAS, Nauka, 2019, 316 pp. [**Красюк А. М., Лугин И. В.** Вентиляция метрополитенов. — Новосибирск: СО РАН: Наука: Изд-во СО РАН, 2019. — 316 с.]
30. **Internal sanitary.** Designer's handbook. Part 1, Heating, Ed. by I. G. Staroverov, Yu. I. Shiller, Moscow, Integral, 2008, 344 pp. [**Внутренние санитарно-технические устройства.** Справочник проектировщика. Ч. 1. Отопление / Под ред. И. Г. Староверова, Ю. И. Шиллера. — М.: Интеграл, 2008. — 344 с.]