

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДИАБАТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА В ТОННЕЛЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

Елена Леонидовна Алферова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, младший научный сотрудник, тел. (383)2053030 доб. 179, e-mail: alferova_el@mail.ru

В работе показана возможность использования адиабатического охлаждения воздуха путем распыления воды непосредственно в тоннеле, проведено решение задачи моделирования процесса удаления избытков тепла из воздуха при фазовом переходе воды из жидкого состояния в газообразное в условиях тоннеля метро. Показано, что данный способ существенно снижает требования к вентиляционному оборудованию по сравнению со способом удаления тепловых избытков только средствами вентиляции. При использовании такого способа удаления тепловых избытков в тоннеле метрополитена, максимальная производительность одного вентилятора составит $67.5 \text{ м}^3/\text{с}$ при затрачиваемой мощности 104 кВт, мощность насосного оборудования не превысит 50 кВт при расходе воды $1.5 \text{ м}^3/\text{ч}$. При удалении тепловых избытков только вентиляцией производительность одного вентилятора (при параллельной работе двух вентиляторов) составляет до $269 \text{ м}^3/\text{с}$, а мощность 727 кВт.

Ключевые слова: адиабатическое охлаждение, тоннель, метрополитен, тепловой баланс, вентиляция

COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE EVAPORTIVE AIR COOLING PROCESS IN A SUBWAY TUNNEL

Elena L. Alferova

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Pr., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, phone: (383)2053030, extension 179, e-mail: alferova_el@mail.ru

The paper shows the possibility of using evaporative cooling of air by spraying water directly in the tunnel. The solution of the problem of modeling the process of removing heat excess from the air during the phase transition of water from the liquid state to the gaseous in the conditions of the metro tunnel is carried out. It is shown that using method significantly reduces the requirements for ventilation equipment in comparison with the method of removing heat surpluses only by mechanical ventilation. When using evaporative cooling method of removing heat surpluses in a subway tunnel, the maximum air flow rate of one fan will be $67.5 \text{ м}^3/\text{с}$ with 104 kW power, the power of the pump equipment will be nearly 50 kW, with a water flow rate 1.5 м^3 per hour. When removing heat surpluses only by ventilation, the air flow rate of one fan (with two fans in parallel work) will be up to $269 \text{ м}^3/\text{с}$, and the power will be 727 kW.

Keywords: adiabatic cooling, tunnel, metro, heat balance, ventilation

Введение

В метрополитенах РФ наблюдается постоянный рост пассажиропотока и, как следствие, увеличение количества поездов на линиях. При этом в некоторых метрополитенах фактический пассажиропоток превысил предельные значения,

предусмотренные проектом. Например, в московском метрополитене частота движения поездов составляет до 45 пар/час, а станции метро, построенные до 1995 года, рассчитаны на частоту движения не более 35 пар/час. Это приводит к значительным тепловым избыткам в метрополитене, которые создают дискомфортные тепловые условия, нарушающие нормативные санитарные требования к микроклимату помещений метрополитена. Удаление теплоизбытков возможно путем увеличения подаваемого расхода наружного воздуха с использованием тоннельных вентиляторов, но для этого необходимо установить вентиляторы большой производительности. В уже эксплуатируемых метрополитенах это невыполнимо, так как установка нового вентиляционного оборудования ограничено габаритами существующих подземных вентиляционных сооружений. В проектируемых метрополитенах применение вентиляторов с высокой производительностью приведет к высоким финансовым затратам. В работе [1] приведен почасовой тепловой баланс [2-3] для метрополитена с двухпутным и тоннелем на глубине заложения 20 м, тепловые избытки в часы максимального пассажиропотока и частоты движения достигают 6 МВт. Если проветривать тоннель с регулированием расхода воздуха и соответственно теплоизбыткам увеличивать расход воздуха, то в данных условиях расчетные расходы воздуха по удалению теплоизбытков (рассчитанные с учетом суточного изменения температуры наружного воздуха и при температуре удаляемого воздуха +33° [4]) будут превышать возможности оборудования тоннельной вентиляции. Так, например, требуемая производительность одного вентилятора при параллельной работе двух вентиляторов в промежуток времени между 16 и 17 часами составит 269 м³/с для метрополитена с двухпутным тоннелем при глубине заложения тоннеля 20 м. Такую производительность можно обеспечить шахтным вентилятором, мощность которого при производительности 269 м³/с составит 727 кВт [5].

Одним из способов, которым можно устранить проблему перегрева является адиабатическое охлаждение воздуха (АОВ). Сущность этого способа заключается в том, что при разбрызгивании воды (вода имеет одно из наибольших среди жидкостей значение скрытой теплоты парообразования – 2258 кДж/кг при нормальных условиях [6]) в движущемся потоке воздуха, этот воздух взаимодействует со взвешенными частицами воды, частицы испаряются, забирая при этом тепло, а воздух увлажняется испарившейся влагой до состояния близкого к насыщению. То есть источником теплоты в процессе испарения для рассматриваемой системы «вода-воздух» является воздух, а потенциалом переноса теплоты – разность температур между воздухом и водой, равная психометрической разности температур сухого и мокрого термометров [7].

Методы и материалы

В работе рассмотрен способ АОВ при распылении воды непосредственно в путевом пространстве тоннеля. Этот способ охлаждения воздуха в метрополитенах дает возможность привести в норму показатели микроклимата, при этом имеет небольшие габариты и не превышает требования к вентиляционному оборудованию, однако, он практически не исследован для условий метрополитена.

Для таких условий важно, чтобы частицы воды полностью испарялись, не достигая поверхности кожуха контактного рельса (рис. 1). Процесс обработки воздуха на диаграмме Рамзина показан на рис. 2.

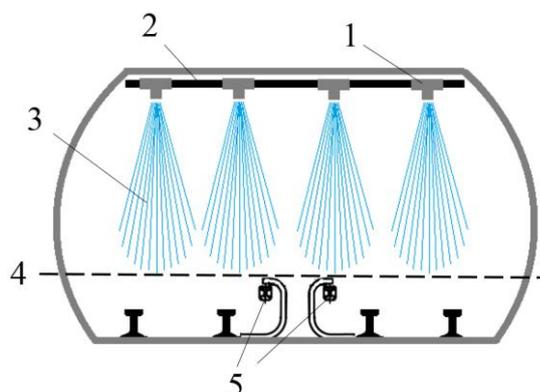


Рис. 1. Схема АОВ в тоннеле:

1 – форсунки; 2 – трубопровод; 3 – распыляемая вода; 4 – верхний уровень кожуха контактных рельс; 5 – контактные рельсы

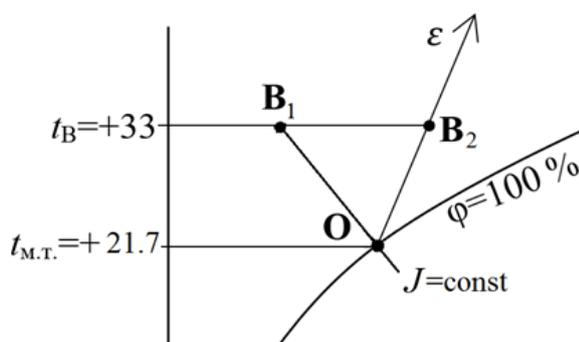


Рис. 2. Процесс обработки воздуха на диаграмме Рамзина:

В₁ – точка с параметрами тоннельного воздуха; О – точка с параметрами охлажденного (увлажненного) воздуха; J – количество теплоты, содержащееся в тоннельном и охлажденном воздухе; ε – луч процесса нагрева воздуха в тоннеле; В₂ – точка с параметрами снова нагретого тоннельного воздуха; t_В – температура тоннельного воздуха, °С; t_{М.т.} – температура мокрого термометра

В тоннель подается наружный воздух, он ассимилирует часть тепловых избытков и нагревается до максимально возможной температуры воздуха – точка В₁ на рис. 2. (+33 °С). При достижении этой температуры в тоннеле распыляется расход воды, требуемый для ассимиляции оставшихся тепловых избытков. Воздух охлаждается до параметров точки О (рис. 2), далее снова нагревается по лучу процесса ε до +33 °С, снова орошается водой и остывает и т.д. Цикл «нагрев-орошение» можно повторять в течении всего времени работы метрополитена, когда происходит перегрев воздуха.

Моделирование процесса орошения воздуха в тоннеле осуществлялось в программном пакете ANSYS Fluent. Для моделирования испарения жидкостей существуют несколько подходов [8-12]. В данной работе использован подход Эйлера-Лагранжа, когда дискретная фаза в виде капель задается на входе в расчетную область. Преимущество этого подхода доказано в работе [13].

Математическая модель основана на усредненных уравнениях Навье-Стокса с учетом межфазного взаимодействия, замкнутого с помощью k-ε модели

турбулентности. Модель учитывает двустороннее взаимодействие жидкой и газообразной фаз, перенос импульса, энергии и массы [14]. Сила сопротивления частиц рассчитывается по модели Шиллера-Науманна, теплопередача в окружающую среду моделируется с использованием подхода Ранца-Маршалла [15]. 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.

Исходные данные

В двухпутный тоннель требуется подавать расходы воздуха 90–135 м³/с [16–17]. При этом, как уже было сказано выше, часть тепловых избытков удаляется за счет подачи в тоннель наружного воздуха, а оставшиеся теплоизбытки путем орошения тоннельного воздуха. Расход воды на орошение $G_{ж}$ будет определяться через отношение неудалённых теплоизбытков Q_o и теплоты парообразования r :

$$G_{ж} = Q_o / r = (Q_{\Sigma} - Q_B) / r.$$

В табл. 1 приведен требуемый расход воды при различных расходах воздуха.

<i>Таблица 1</i>		
Подаваемый расход воздуха, м ³ /с	90	135
Требуемый расход воды на один перегон $G_{ж}$, кг/с	0.417	0.301

Для того, чтобы капли при таких расходах воды полностью испарялись в тоннеле, не достигая кожуха контактного рельса, требуется использование форсунок высокого давления. Системы увлажнения воздуха с форсунками высокого давления работают с давлением 40–100 кгс/см², которое обеспечивается плунжерными насосами [18].

При использовании системы АОВ, наибольшая нагрузка на неё приходится в расчетные часы. Расчетный час определяется невыгодным сочетанием характеристик наружного и внутреннего климата. За расчетный час по наружному воздуху принимаются время наступления максимальной температуры наружного воздуха в наиболее жаркие летние сутки, для условий Москвы это 15 часов [19]. Что касается внутреннего климата, определяющую роль в тепловом балансе помещений метрополитена, а значит и для определения расчетных часов, играют теплопоступления от ходовой части поездов [20], они главным образом зависят от частоты движения поездов и пассажиропотока и наибольшие значения приобретают в часы-пик. В работе [1] показано, что наиболее неблагоприятный с этой точки зрения промежуток времени с 16 до 17 часов. Наибольшие теплоизбытки в этот час образуются в результате повышения пассажиропотока и частоты движения поездов, а наибольший требуемый расход наружного воздуха ещё и 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 этого случая, ввиду того, что тепловые избытки максимальны, а температура наружного воздуха высокая, будет иметь место наибольший требуемый 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 [17]. Исследования проводились для расчётной 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 5 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 °С). Приняты следующие 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

Было проведена серия численных экспериментов – изменялись параметры форсунок (диаметр, расход, давление) и расход воздуха на входе в расчетную область. На рис. 3 представлены массовая доля воды в воздухе и размеры частиц в продольном сечении по центру тоннеля для случая с полным испарением влаги до её достижения 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 58 МПа).

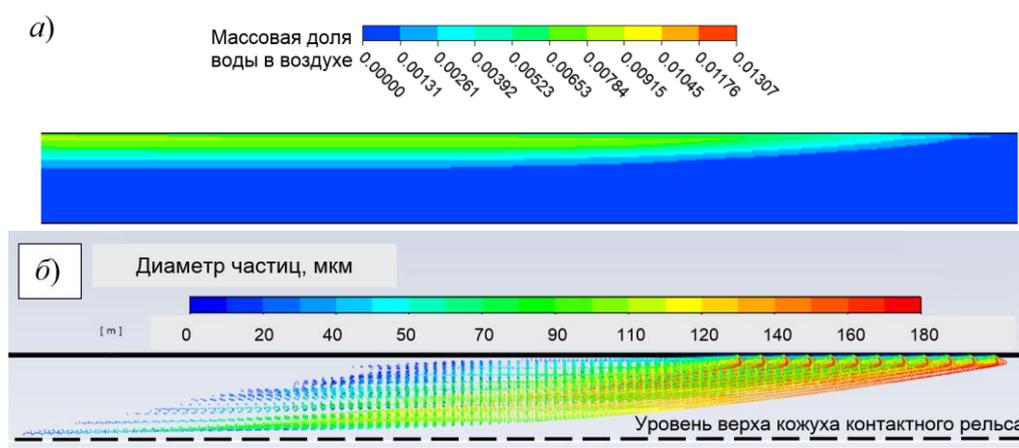


Рис. 3. Результаты вычислительного эксперимента для случая полного испарения влаги до достижения ею уровня кожуха контактного рельса в продольном сечении тоннеля: а) массовая доля воды в воздухе; б) распределения облака орошения и размеры частиц

На рис. 4 показан случай, когда вода не успевает полностью испариться в воздухе и достигает поверхности путей из-за недостаточного напора перед форсунками (расход воздуха 135 м³/с, диаметр форсунки 300 мкм, расход воды через одну форсунку 0.0018 кг/с, давление перед форсункой 25 МПа).

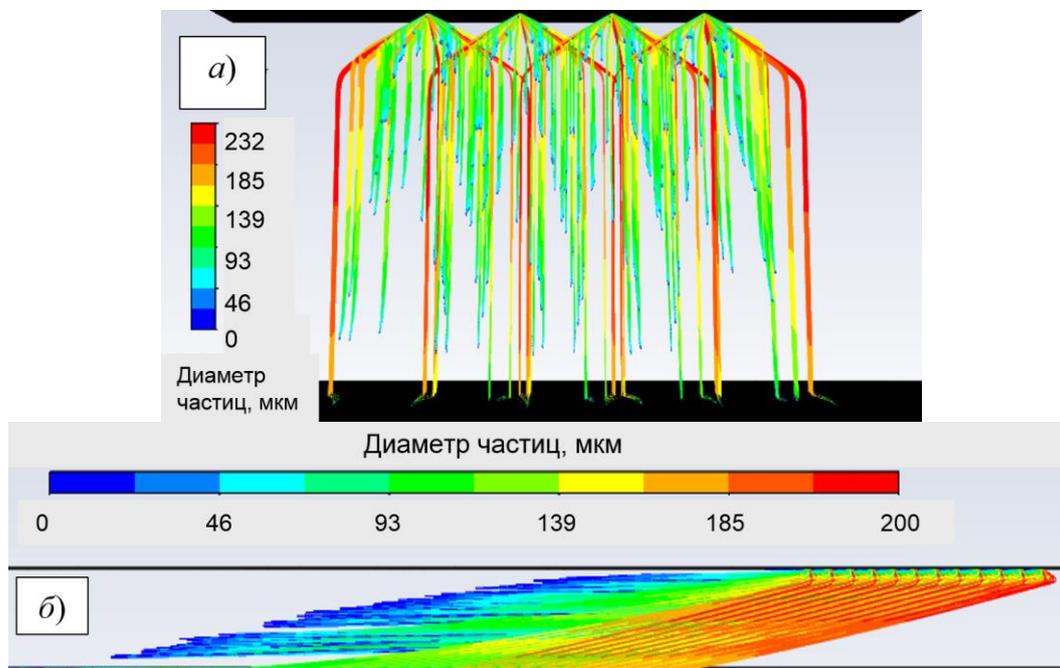


Рис. 4. Распределения облака орошения и размеры частиц в случае, когда частицы воды не успели полностью испариться и достигли поверхности путей тоннеля:

а) вид с торца тоннеля; б) вид в продольном разрезе тоннеля

Обсуждение

По результатам численного расчета, для случая на рис. 3 (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 составила 304.15 К, то есть изменение температуры в результате численного моделирования составило $\Delta t_{\text{ч}} = 1.85$ К от заданной температуры 306 К.

Аналитически изменение температуры воздуха Δt , К, можно рассчитать по формуле:

$$\Delta t = Q_o / (c_v L_v \rho_v) = G_{\text{ж}} r / (c_v L_v \rho_v),$$

где Q_o – теплоизбытки, неудаленные вентиляцией, кВт; c_v – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); L_v – расход воздуха, м³/с; ρ_v – плотность воздуха, кг/м³; $G_{\text{ж}}$ – расход воды на орошение, кг/с; r – теплота парообразования воды, 2258 кДж/кг.

Для случая на рис. 3 получаем $\Delta t_a = 0.00265 \cdot 48 \cdot 2258 / (1.005 \cdot 135 \cdot 1.2) = 1.76$ К. Расхождение численного и аналитического решения в данном случае составило 4.86 %.

При диаметре форсунки 400 мкм, расходе 0.00325 кг/с и давлении перед форсункой 70 МПа среднеобъемная температура по результатам численного расчета составляет 303.8 К, $\Delta t_{\text{ч}} = 2.07$ К. Аналитически получается $\Delta t_a = 2.16$ К. При диаметре форсунки 500 мкм, расходе 0.00445 кг/с и давлении перед форсункой 75 МПа $\Delta t_{\text{ч}} = 2.84$ К, а $\Delta t_a = 2.96$ К. Расхождение соответственно 4.17 и 4.05 %.

При максимальных значениях расхода воздуха ($135 \text{ м}^3/\text{с}$), давления (84 МПа) и расхода воды (1.5 т/ч) при использовании форсунки диаметром 500 мкм, когда капли воды полностью испаряются в тоннеле и не достигают контактного рельса, мощность насосного оборудования составит 50 кВт [22], производительность одного вентилятора $67.5 \text{ м}^3/\text{с}$, мощность 104 кВт.

Заключение

Предложено удаление теплоизбытков с помощью адиабатического охлаждения тоннельного воздуха. Для условий московского метрополитена удаление теплоизбытков путем увеличения подаваемого расхода воздуха требует установки шахтных вентиляторов с расходом воздуха до $279 \text{ м}^3/\text{с}$ и мощностью до 730 кВт, что приведет к высоким капитальным и эксплуатационным затратам. Проведено численное моделирование распыления воды в путевом пространстве тоннеля, определены режимы работы форсуночных устройств таким образом, чтобы испарение воды происходило до достижения частицами жидкости кожуха контактного рельса. При этом расхождение результатов численного моделирования с аналитическим решением составило от 4.05 до 4.86 %. Показано, что АОВ значительно снижает требования к вентиляторному – максимальная производительность одного вентилятора составит $67.5 \text{ м}^3/\text{с}$ при затрачиваемой мощности 104 кВт, мощность насосного оборудования не превысит 50 кВт при расходе воды $1.5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алферова Е. Л., Лугин И.В. К вопросу создания и поддержания требуемых параметров внутреннего воздуха в тоннелях метрополитена в теплый период года // ГИАБ. – №11. – 2018. – С. 63-69.
2. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. – Москва: Недра, 1975. – 237 с.
3. Krasnyuk A. M., Lugin I. V., P'yankova A. Yu. Delineation of soil body area exposed to thermal effect of subway stations and tunnels // Journal of Mining Science. – 2015. – Т. 51. – № 1. – P. 138-143.
4. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003.– Введ. 01-01-2013. Москва: [б.и.], 2012. – 267 с.
5. Мохирев Н. Н. Инженерные расчеты вентиляции шахт: Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра, 2007. – 324 с.

6. Вишнеvский Е. П. Адиабатическое охлаждение воздуха в современном ЦОДе // ИКС. – 2012. – №06. – С. 83-84.
7. Лугин И. В., Алферова Е. Л. Теоретические основы создания микроклимата помещений: учебн. пособие. – Новосибир. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2016. – Ч. 1. – 48 с.
8. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Захарова Ю.В. Моделирование гидрогазодинамических процессов в ПК ANSYS 17.0: учеб. Пособие. – Новосибир. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2016. – 168 с.
9. ANSYS Tutorial: Modeling Evaporation of Liquid Droplets in a Circular Channel
10. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Захарова Ю.В., Данилов М.Н. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
11. Моделирование распылительных устройств в ANSYS Fluent. /Научный канал «Аль-кулер». [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.youtube.com/watch?v=NI2mbIDcKPw>.
12. ANSYS Fluent Theory Guide. Published in the U.S.A/ 2014-2015 SAS IP , Inc.
13. H. Montazeri, B. Blocken, J.L.M. Hensen. Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis // Building and Environment. - 2015. –№83. –P.129-141.
14. Габарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. – СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
15. Ranz W.E., Marshal W.R., Jr. Evaporation from Drops. Part I and Part II // Chem. Eng. Prog. – 1952. – № 48(4). – P. 173-180.
16. Krasuyuk A.M., Lugin I.V., Alferova E.L., Kiyanitsa L.A. Evaluation of ventilation flow charts for double-line subway tunnels without air chambers // Journal of Mining Science. – 2016. – Т. 52. – № 4. – P. 740-751.
17. Lugin I.V., Alferova E.L. Integrated performance analysis of ventilation schemes for double-line subway tunnel // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. –P. 012043.
18. Промышленные увлажнители воздуха и генераторы тумана. Форсунки [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://par-tuman.ru/forsunka1>
19. Богословский В.Н. Отопление и вентиляция. Часть 2. Вентиляция. – М. : Стройиздат, 1976. – 439 с.
20. Красюк А. М., Лугин И. В. Вентиляция метрополитенов. – Новосибирск: СО РАН: Наука: Изд-во СО РАН, 2019. – 316 с.
21. Внутренние санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика. Ч.1. Отопление. Под ред. И. Г. Староверова, Ю. И. Шиллера. – М.: Интеграл, 2008. - 344 с.

© Е. Л. Алферова, 2021