

ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 621.45 + 628.8 + 622.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРОТЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ГОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Л. А. Кияница¹, И. В. Лугин¹, А. М. Красюк^{1,2}

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: krasuk@cn.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет,
ул. Геодезическая, 8, 630073, г. Новосибирск, Россия

Определена протяженность зоны переохлаждения обделки в протяженном железнодорожном горном тоннеле, подверженном значительному влиянию поршневого действия поездов. Выявлено распределение температуры воздуха в зоне контакта “наружный воздух – тоннельная обделка” в зависимости от скорости железнодорожного состава и наружной температуры в холодный период года. Выполнен анализ способов борьбы с обледенением внутренней поверхности обделки тоннеля: устройством обогрева при помощи греющего саморегулируемого кабеля; устройством неотапливаемой входной галереи и тепловой изоляцией. Исследовано распределение среднечасовой температуры воздуха протяженного железнодорожного тоннеля в зависимости от мест расположения тоннельных тепловентиляционных установок. Проведен анализ эффективности схем распределения тепловой мощности в тоннеле по критерию обеспечения требуемого температурного режима. Показано, что наиболее рациональным способом размещения тепловентиляционных установок для поддержания требуемой температуры тоннельного воздуха является их равномерное распределение по длине тоннеля, совмещенное с установкой припортальных воздушно-тепловых завес. Предложен критерий энергетического совершенства системы тепловентиляции.

Железнодорожный тоннель, вентиляция, теплообмен, распределение температур, тепловентиляционная установка, холодная галерея, греющий кабель, критерий энергетического совершенства

DOI: 10.15372/FTPRPI20210116

В Российской Федерации на территории Сибири и Дальнего Востока железнодорожный транспорт осуществляет значительную часть грузоперевозок. Особенно важны такие факторы, как надежность и бесперебойность функционирования железнодорожной инфраструктуры, весьма существенным элементом которой являются железнодорожные тоннели. Специфика данного региона — низкие температуры атмосферного воздуха в холодный период года и сложные геологические условия, в частности высокая обводненность вмещающих тоннели

грунтов. Опыт эксплуатации существующих тоннелей показывает, что температура воздуха в них в холодный период года падает ниже требуемой [1–2], согласно действующим нормативным документам [3], что вызывает необходимость пересмотра методологии проектирования тепловых режимов тоннелей и проведения дополнительных исследований закономерностей изменения температур в тоннеле.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТЯЖЕННОСТИ ЗОНЫ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР НА ПРИПОРТАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ

Для эксплуатируемых тоннелей БАМа одна из основных проблем, возникающих в холодный период года, — обмерзание и наледеобразование элементов пути и тоннельной обделки на припортальных участках тоннелей с закрывающимися припортальными воротами [1]. Из-за циклического воздействия температур наружного воздуха происходит постоянное замерзание и оттаивание поверхностного слоя тоннельной обделки, способствующие ее быстрому морозному разрушению. Попадание наружного холодного воздуха при входе поезда в тоннель вызывается действием зоны отрицательного статического давления, возникающей за хвостовым вагоном состава. При каждом выходе поезда из портала тоннеля наружу через зазор между поездом и обделкой тоннеля поступает значительное количество холодного атмосферного воздуха, соизмеримое с объемом проходящего состава.

Для обоснования способов борьбы с обмерзанием обделки в припортальной области у выходного портала тоннеля необходимо определить:

— протяженность зоны переохлаждения обделки от выходного портала вглубь тоннеля;

— распределение температуры внутреннего воздуха от выходного портала вглубь тоннеля в зависимости от технологических и климатических параметров тоннеля.

Эксперименты проводились методами вычислительной аэродинамики и теплообмена (метод контрольных объемов) в программной среде Ansys CFX. Использовалось решение следующих уравнений с применением $k - \varepsilon$ RNG модели турбулентности:

неразрывности —

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho \bar{u}) = 0, \quad (1)$$

сохранения импульса —

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial \tau} + \nabla(\rho \bar{u} \otimes \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \Lambda + S_M, \quad (2)$$

сохранения энергии —

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial \tau} - \frac{\partial p}{\partial \tau} + \nabla(\rho \bar{u} h) = \nabla(\lambda \nabla t) + \Lambda : \nabla \bar{u} + S_E. \quad (3)$$

Здесь $\Lambda = \mu[\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T - (2/3)\delta \nabla \bar{u}]$ — тензор сил трения; t — температура воздуха, °C; Γ — индекс, указывающий на кососимметричную матрицу; \bar{u} — векторное поле скоростей; τ — время, с; ∇ — векторный оператор Гамильтона; \otimes — оператор тензорного произведения; δ — дельта функция Кронекера; μ — динамическая вязкость, Па·с; ρ — плотность, кг/м³, p — давление, Па; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); h — энтальпия, Дж; S_M , S_E — точечные источники импульса и энергии (в том числе тепловой); $\Lambda : \nabla \bar{u}$ — диссипация энергии, характерная для вязких потоков жидкостей и газов [4].

Модель турбулентности $k - \varepsilon$ RNG описывается следующими уравнениями:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial \tau} + \nabla(\bar{u}k\rho) = \nabla \left(\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right] \nabla k \right) + P_k - \rho\varepsilon + P_{kb}, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \nabla(\bar{u}\varepsilon\rho) = \nabla \left(\left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right] \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1RNG} P_k - C_{\varepsilon 2RNG} \varepsilon \rho + C_{\varepsilon 1RNG} P_{eb}), \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где k — турбулентная кинетическая энергия, Дж/кг; ε — диссипация турбулентной кинетической энергии, Дж/(кг·с); μ , μ_t — динамическая вязкость и турбулентная динамическая вязкость, Па·с; $\sigma_k = 1$, $\sigma_{\varepsilon RNG} = 0.7179$, $C_{\varepsilon 2RNG} = 1.68$, $C_\mu = 0.09$ — постоянные модели турбулентности; P_k , P_{kb} , $C_{\varepsilon 1RNG}$, P_{eb} — величины, определяемые из решений дополнительных уравнений [4].

Конвективный теплообмен между тоннельным воздухом и поверхностью тоннельной обделки задается как граничное условие третьего рода:

$$q_k = \alpha(t - t_s), \quad (7)$$

q_k — тепловой поток, Вт/м²; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); t_s — температура поверхности тоннельной обделки, °С.

Геометрические характеристики модели тепломассообменных процессов при выходе поезда из тоннеля и краевые условия представлены на рис. 1. Модель включает в себя участок тоннеля длиной 6700 м в плоской 2D-постановке с движущимся составом длиной 1100 м. Размеры L_{tr} и L_{ton} приняты равными гидравлическому диаметру соответственно поезда и тоннеля (3.7 и 7.8 м). Скорость поезда 75 и 40 км/ч. Начальные условия: температура воздуха в тоннеле $t_0 = 4$ °С, скорость воздуха $v_{int} = 0.9$ м/с, температура наружного воздуха варьирует от -10 до -50 °С. Векторы скорости поезда v_t и скорости воздуха v_{int} показаны на рис. 1.

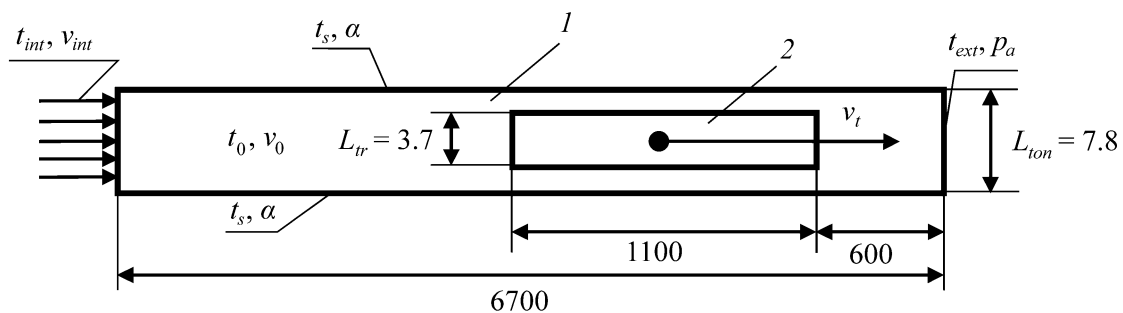


Рис. 1. Геометрические характеристики модели тепломассообменных процессов при выходе поезда из тоннеля и краевые условия: 1 — тоннель; 2 — поезд; t_0 , v_0 — начальная температура и скорость воздуха в тоннеле; t_{int} , v_{int} — температура и скорость воздуха, поступающего на расчетный участок; v_t — скорость поезда; t_{ext} , p_a — температура и давление наружного атмосферного воздуха; t_s , α — естественная температура обделки и коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности обделки к тоннельному воздуху

В эксперименте принят режим эксплуатации тоннеля, при котором ворота на одном из двух порталов закрыты. Эксперименты проведены для отношения площадей поперечного сечения поезда S_i к поперечному сечению тоннеля S , равного $S/S_i = 0.27$ (Северомуйский тоннель) и 0.36 (Байкальский тоннель). Тепловая мощность припортальной тепловентиляционной установки у выходного портала в данном вычислительном эксперименте не учитывается.

Шаг по времени $\Delta\tau = 0.1$ с определен с учетом условия, чтобы критерий Куранта в любой момент расчета был меньше 1 [5]. Под зоной переохлаждения понимается расстояние вглубь тоннеля от выходного портала, на протяжении которого температура воздуха не поднимается выше 0°C .

На рис. 2 приведены зависимости средней температуры воздуха и теплотери Q на нагрев врывающегося воздуха в различных сечениях тоннеля вблизи выходного портала при движении поезда со скоростью 75 км/ч и наружной температуре $t_{ext} = -50^\circ\text{C}$.

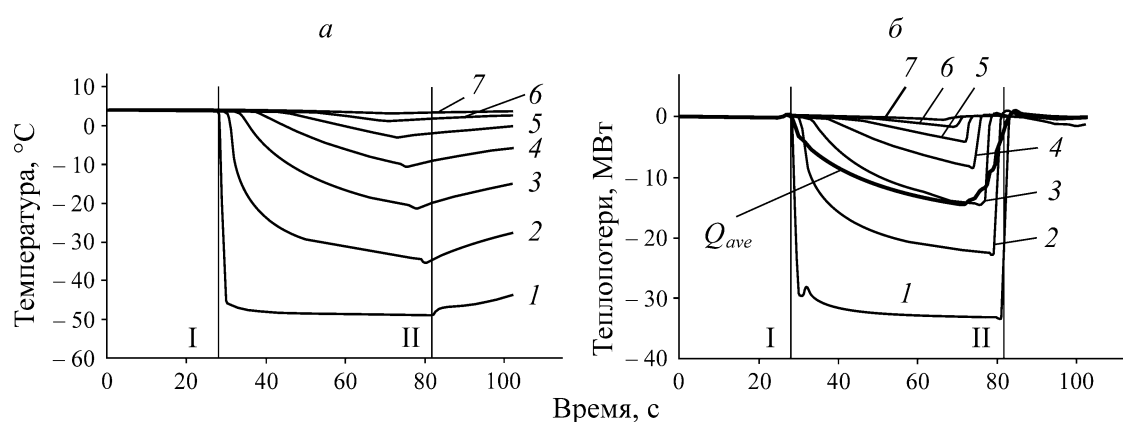


Рис. 2. Температура воздуха (а) и теплотери на нагрев врывающегося воздуха (б) в различных сечениях тоннеля: 1 — в выходном портале; 2 — в тоннеле на расстоянии 50 м от портала; 3–7 — то же на расстоянии соответственно 100, 150, 200, 250, 300 м; Q_{ave} — средние теплотери на участке переохлаждения; I — момент времени, когда головной вагон поезда въезжает в выходной портал; II — последний вагон поезда выезжает из портала

При выходе поезда из выходного портала в тоннель начинает поступать холодный атмосферный воздух, переохлаждая его тем сильнее, чем ближе к выходу находится сечение тоннеля (сечения 1–7 на рис. 2). Эксперимент показал, что на расстоянии 250 м от портала температура тоннельного воздуха не опускается ниже 0°C . После выхода последнего вагона поезда из тоннеля температура тоннельного воздуха постепенно повышается. Время восстановления расчетной температуры в тоннеле 4°C определяется скоростью воздуха, перемещаемого по тоннелю в попутном направлении из-за поршневого эффекта. На рис. 2б видно, что теплотери на нагрев врывающегося наружного воздуха значительны (до 33.2 МВт), но происходят в течение малого промежутка времени.

На рис. 3 показаны зависимости температуры тоннельного воздуха в момент выхода последнего вагона поезда из выходного портала от расстояния до выходного портала 0.27 и 0.36 для скоростей движения железнодорожного состава 75 и 40 км/ч. Протяженность зоны переохлаждения во всех случаях не превышает 245 м. При увеличении скорости и коэффициента перекрытия сечения тоннеля поездом зона переохлаждения растет, так как увеличивается скорость воздуха в зазоре между поездом и тоннельной обделкой. Температура атмосферного воздуха также влияет на протяженность зоны переохлаждения: чем выше температура наружного воздуха, тем меньше по протяженности эта зона.

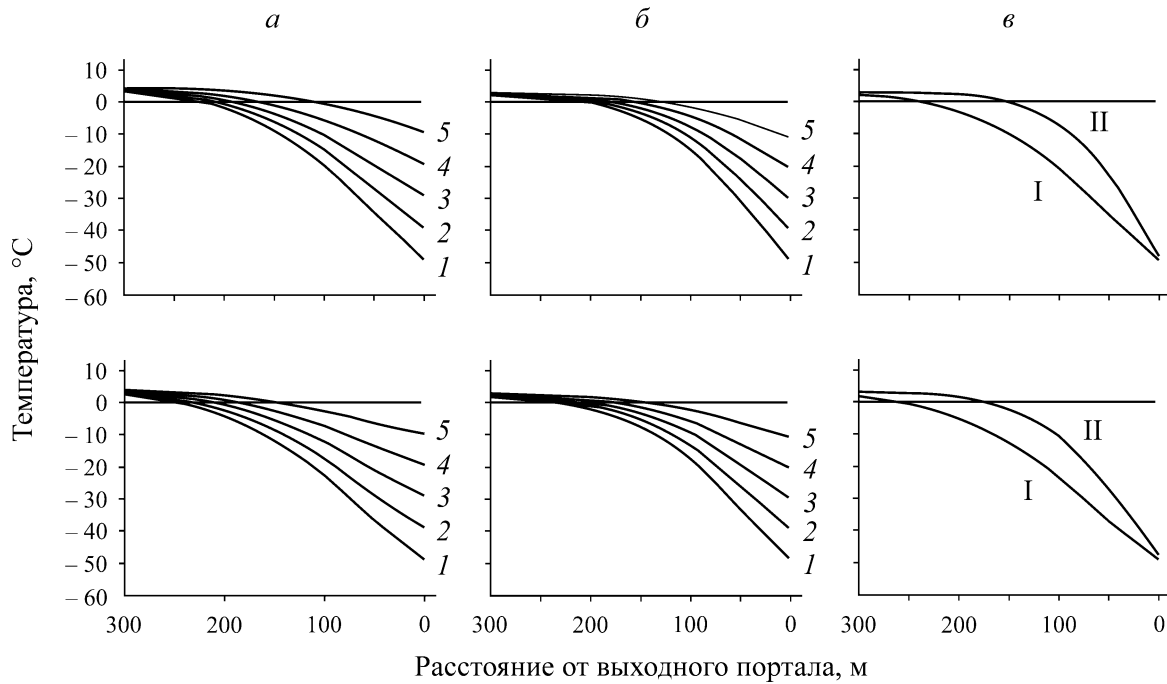


Рис. 3. Температура тоннельного воздуха в момент выхода последнего вагона поезда из выходного портала для коэффициента перекрытия сечения тоннеля поездом 0.27 (верхний ряд) и 0.36 (нижний) и скорости движения поезда 75 км/ч для режима эксплуатации с закрывающимися воротами (а); для скорости движения поезда 40 км/ч для режима эксплуатации с закрывающимися воротами (б); сравнение режимов эксплуатации с закрывающимися (I) и открытыми (II) воротами при $t_{ext} = -50\text{ °C}$ (в); 1 — $t_{ext} = -50\text{ °C}$; 2 — -40 ; 3 — -30 ; 4 — -20 ; 5 — -10 °C

Для аналитического описания протяженности зоны переохлаждения применена квадратичная интерполяция с помощью полинома Лагранжа (табл. 1, зависимость (8)).

ТАБЛИЦА 1. Протяженность зоны переохлаждения L_x (м) у выходного портала для скоростей поезда 75 и 40 км/ч и степени перекрытия сечения тоннеля поездом 0.27 и 0.36 в интервале температур наружного воздуха $-50 \div -10\text{ °C}$

S_t / S	v_t , км/ч	t_{ext} , °C				
		-50	-40	-30	-20	-10
0.27	75	224	210	193	169	119
	40	186	173	156	135	98
0.36	75	245	232	213	187	142
	40	204	191	175	149	111

Регрессионная нелинейная зависимость для протяженности зоны переохлаждения имеет вид

$$L_x = -51.54 - 5.17t_{ext} - 0.047t_{ext}^2 + 206.67\left(\frac{S_t}{S}\right) + 1.02v_t. \quad (8)$$

Для зависимости (8) критерий $R^2 = 0.99$, доверительная вероятность составляет 95 %, область применения находится в диапазонах $t_{ext} \in [-50; -10 \text{ }^\circ\text{C}]$, $S_i / S \in [0.27; 0.36]$, $v_i \in [40; 75 \text{ км/ч}]$. Зависимость (8) показывает, что протяженность зоны переохлаждения зависит от скорости движения состава, степени перекрытия сечения тоннеля поездом, режима работы припортальных ворот и температуры атмосферного воздуха. Протяженность зоны переохлаждения для тоннеля с закрывающимися воротами I больше, чем для тоннеля с открытыми воротами II (рис. 3в).

Таким образом, определены закономерности изменения температуры тоннельного воздуха от выходного портала вглубь тоннеля от времени прохождения поездом этого портала и от протяженности рассматриваемого участка вглубь тоннеля; протяженности зоны переохлаждения тоннельного воздуха в холодный период года от температуры наружного воздуха, степени перекрытия поездом живого сечения тоннеля и скорости движения железнодорожного состава.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ И МОРОЗНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТОННЕЛЬНОЙ ОБДЕЛКИ НА ПРИПОРТАЛЬНЫХ УЧАСТКАХ

Выходной участок портала в холодный период года подвержен воздействию переменных температур воздуха при движении поездов. В качестве мер по предотвращению охлаждения поверхности обделки ниже температуры $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ предлагается несколько способов с дальнейшим исследованием их эффективности: применение греющего кабеля; тепловая изоляция тоннельной обделки; устройство припортальной холодной галереи.

Применение саморегулируемого греющего кабеля. Принцип действия саморегулируемого греющего кабеля заключается в изменении электрического сопротивления и, соответственно, силы тока при нагреве или охлаждении кабеля, что позволяет поддерживать температуру обделки без применения внешних терморегуляторов. Кабель укладывается с определенным шагом в бетонную стяжку в наружном слое обделки и, при подключении к электросети, позволяет поддерживать температуру не ниже требуемого значения. Это позволяет экономить электрическую энергию на нагрев обделки, адаптируя тепловыделение кабеля в зависимости от фактической температуры воздуха у обделки тоннеля, от частоты движения поездов и фактической наружной температуры.

Наиболее важные характеристики греющего кабеля — его удельная тепловая мощность q_l , приведенная к единице длины кабеля, и температура кабеля t_k . Для определения q_l и t_k в зависимости от температуры наружного воздуха рассмотрены теплообменные процессы, протекающие на участке конструкции тоннеля с длиной, равной одному шагу укладки кабеля l_k . Геометрические характеристики модели теплообмена и краевые условия показаны на рис. 4.

Математическое моделирование процесса теплопереноса в многослойной ограждающей конструкции железнодорожного тоннеля основано на численном решении начально-краевой задачи для уравнения сохранения тепловой энергии [4, 6]:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla t) + S_E. \quad (9)$$

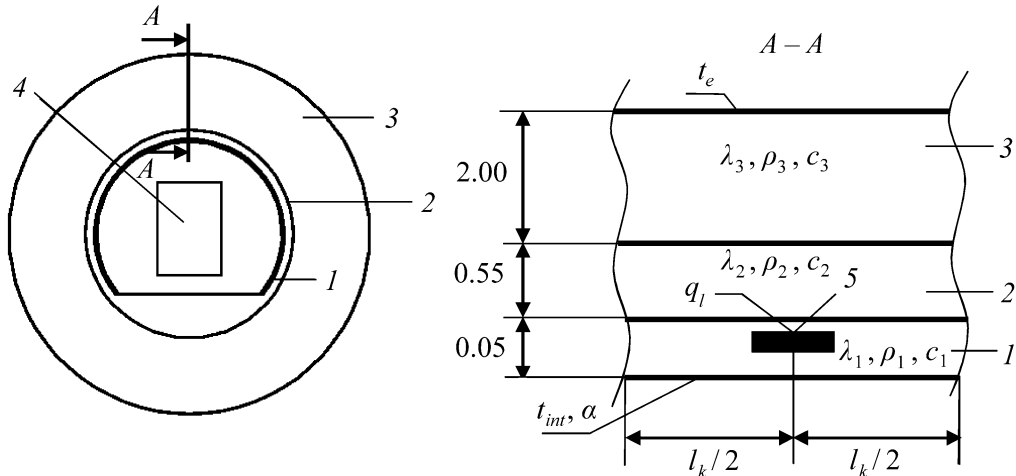


Рис. 4. Геометрические характеристики модели процесса теплообмена и краевые условия: 1 — слой бетонной стяжки; 2 — тубинг; 3 — грунт; 4 — поезд; 5 — греющий кабель; t_{int} , α — температура тоннельного воздуха и коэффициент теплоотдачи от тоннельной обделки к внутреннему тоннельному воздуху; t_e — естественная температура грунта; $\lambda_1, \rho_1, c_1, \lambda_2, \rho_2, c_2, \lambda_3, \rho_3, c_3$ — соответственно коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость бетонной стяжки (индекс 1), тубинга (индекс 2) и грунта (индекс 3)

Размер рассматриваемого участка мал по сравнению с радиусом тоннеля, поэтому кривизной участка пренебрегаем. Конструкция обделки, характерная для Северомуйского тоннеля, представляет собой многослойную ограждающую конструкцию, состоящую из: 1 — бетонной стяжки толщиной $\delta_2 = 0.05$ м, $\lambda_1 = 0.58$ Вт/м, $\rho_1 = 1800$ кг/м³, $c_1 = 840$ Дж/(кг·°С); 2 — железобетонного тубинга толщиной $\delta_2 = 0.55$ м, $\lambda_2 = 1.69$ Вт/м, $\rho_2 = 2500$ кг/м³, $c_2 = 840$ Дж/(кг·°С); 3 — окружающего грунта толщиной $\delta_3 = 2$ м, $\lambda_3 = 2.4$ Вт/м, $\rho_3 = 2560$ кг/м³, $c_3 = 1000$ Дж/(кг·°С) [7]. На внешней границе модели задана естественная температура грунта $t_e = 5$ °С. В зоне контакта бетонной стяжки с воздухом задавалась температура воздуха t_{int} от 0 до -50 °С с шагом 10 °С и коэффициент теплоотдачи α , составляющий 8.25–19.72 Вт/(м²·°С). Конвективный теплообмен между тоннельным воздухом и поверхностью обделки учитывался в соответствии с выражением (7). Так как рассмотрена не вся ограждающая конструкция тоннеля, а только ее часть, на боковых границах модели задано условие периодичности $f(t_{left}) = f(t_{right})$.

В результате проведенного вычислительного эксперимента получены значения удельной тепловой мощности q_l и температуры греющего кабеля t_k для шага укладки 0.1, 0.2, 0.3 м (рис. 5а, в). Для перехода от удельной тепловой мощности греющего кабеля q_l (Вт/м) к удельной тепловой мощности на обогрев обделки q_F (Вт/м²) применена формула $q_F = q_l / l_k$. Зависимость удельной тепловой мощности на обогрев обделки $q_F(t_{ext})$ приведена на рис. 5б.

Полученные результаты позволяют определить удельную тепловую мощность кабеля, при которой будет достигаться поддержание температуры обделки не менее 4 °С. Общая регрессионная зависимость удельной тепловой мощности на обогрев обделки q_F , в зависимости от шага укладки кабеля и температуры воздуха определяется как

$$q_F = -223.2l_k + 1539l_k^2 - 6.24t_{int} + 0.04t_{int}^2. \quad (10)$$

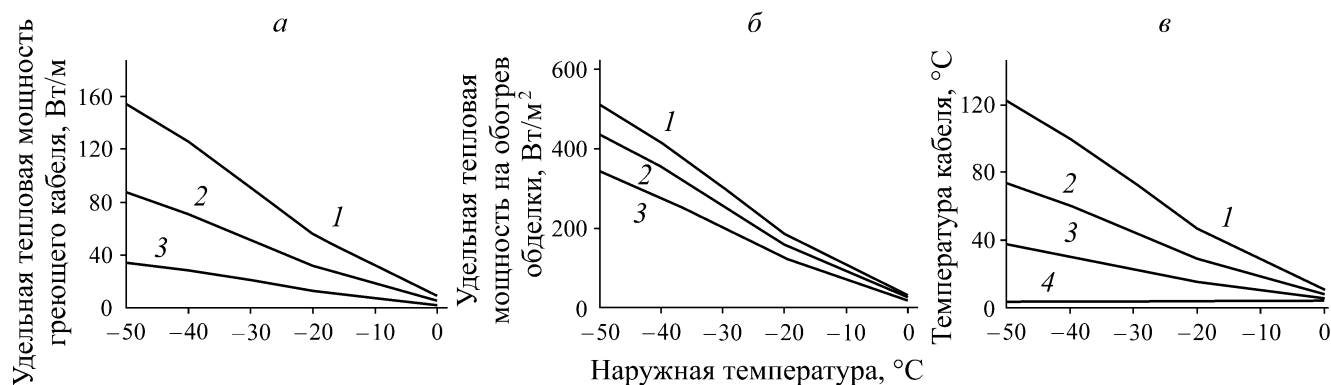


Рис. 5. Параметры греющего кабеля для поддержания температуры на поверхности обделки 4 °C: а — требуемая удельная тепловая мощность кабеля q_l в зависимости от наружной температуры воздуха; б — удельная тепловая мощность на обогрев обделки q_F ; в — температура кабеля; 1 — шаг укладки 0.3 м; 2 — 0.2; 3 — 0.1; 4 — требуемая температура поверхности тоннельной обделки 4 °C

Для зависимости (10) критерий $R^2 = 0.99$, доверительная вероятность составляет 95 %, область применения формулы (10) находится в диапазоне $t_{int} \in [-50; 0 \text{ °C}]$, $l_k \in [0.1; 0.3 \text{ м}]$.

Электрическая мощность, затрачиваемая на обогрев тоннельной обделки у выходного портала, находится по формуле

$$Q_k = q_F P_t L_x, \quad (11)$$

P_t — периметр поперечного сечения тоннеля, м.

Выбор греющего кабеля является оптимизационной задачей, характеризующейся следующими параметрами:

$$\begin{cases} t_o \geq t_o^{dem}, \\ t_k \rightarrow \min, \\ q_F \rightarrow \min, \\ C_k \rightarrow \min. \end{cases}$$

Здесь t_o — температура обделки тоннеля, °C; t_o^{dem} — требуемая температура обделки тоннеля, °C; t_k — температура греющего кабеля, °C; q_F — удельная тепловая мощность на обогрев обделки, Вт/м²; C_k — затраты на монтаж кабельной системы, руб. Отметим, что тепловая мощность греющего кабеля не учитывается в тепловом балансе тоннеля, так как тепловой поток от обделки тоннеля к внутреннему воздуху минимален вследствие незначительного перепада температур.

Тепловая изоляция внутренней поверхности тоннеля. Рассмотрим вариант теплоизоляции поверхности обделки тоннеля в границах зоны переохлаждения припортального участка. В данном варианте отсутствуют затраты электроэнергии на обогрев, при этом уменьшается внутренний габарит тоннеля. Для определения фактической температуры на поверхности тоннельной обделки в зависимости от толщины тепловой изоляции и наружной температуры разработана расчетная численная модель процессов теплообмена в конструкции обделки. Ее геометрические характеристики и краевые условия показаны на рис. 6.

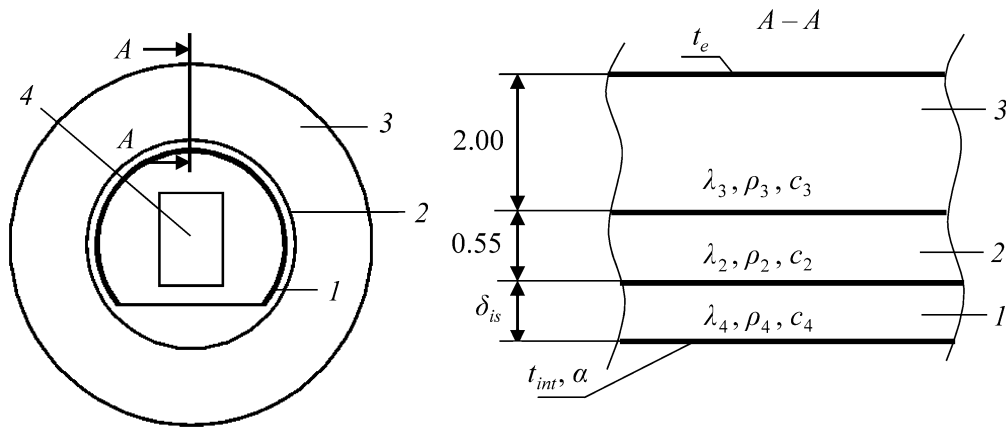


Рис. 6. Геометрические характеристики модели теплообмена и краевые условия: 1 — слой тепловой изоляции; 2 — туннель; 3 — грунт; 4 — поезд; t_{int} , α — температура тоннельного воздуха и коэффициент теплоотдачи от тоннельной обделки к внутреннему тоннельному воздуху; t_e — естественная температура грунта; $\lambda_4, \rho_4, c_4, \lambda_2, \rho_2, c_2, \lambda_3, \rho_3, c_3$ — соответственно коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость тепловой изоляции (индекс 4), туннеля (индекс 2) и грунта (индекс 3); δ_{is} — толщина теплоизоляционного слоя

Туннель соответствует конструкции обделки Северомуйского тоннеля. В качестве тепловой изоляции используем плиты из минеральной каменной ваты на синтетическом связующем с теплофизическими характеристиками: $\lambda_4 = 0.038$ Вт/м, $\rho_4 = 180$ кг/м³, $c_4 = 840$ Дж/(кг°С) [7]. В результате вычислительного эксперимента определена температура на поверхности тоннельной обделки в зависимости от толщины тепловой изоляции δ_{is} и температуры воздуха t_{int} (рис. 7).

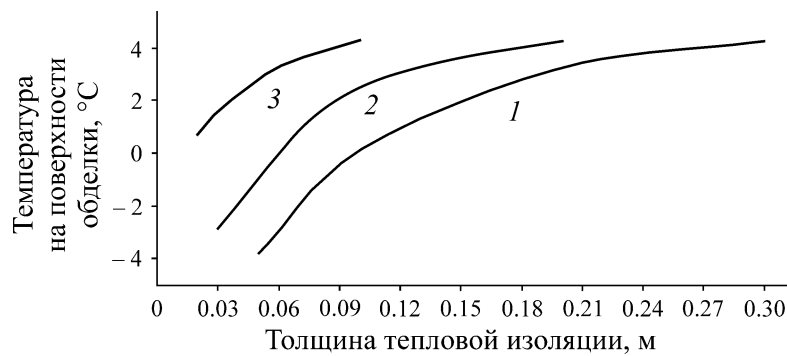


Рис. 7. Температура поверхности тоннельной обделки в зависимости от толщины теплоизоляционного слоя при наружной температуре $t_{int} = -50^\circ\text{C}$ (1), -30 (2) и -10 (3)

При толщине теплоизоляционного слоя больше 0.25 м достигается требуемая температура на границе “теплоизоляция – туннель” не ниже 4 °С. Регрессионная зависимость температуры на поверхности обделки в зависимости от толщины изоляции и температуры воздуха имеет вид

$$t_{obd} = 14.8 + 3.57 \ln(\delta_{is}) + 0.1368 t_{int} .$$

Для этой зависимости критерий $R^2 = 0.95$, доверительная вероятность составляет 95 %, область применения находится в диапазоне $t_{int} \in [-50; -10$ °С], $\delta_{is} \in [0.03; 0.30$ м]. Недостатком данного способа борьбы с морозным разрушением обделки является уменьшение внутреннего габарита тоннеля, что может влиять на его эксплуатацию.

Устройство холодной галереи. Припортальная холодная галерея — еще один способ снижения тепловых потерь на нагрев поступающего холодного воздуха при выходе поезда из тоннеля. Она служит продолжением тоннеля и представляет собой герметично примыкающую к порталу модульную конструкцию из металла либо полимерных материалов, не подверженных морозному разрушению.

Расчетная схема модели процессов теплообмена в галерее приведена на рис. 8. Идея использования холодной галереи заключается в том, что участок около выходного портала, подверженного действию отрицательных температур наружного воздуха, полностью приходится на галерею, при этом до конструкций обделки тоннеля холодный воздух не доходит. Поезд 2, проходя через выход 7 из галереи 5, засасывает атмосферный воздух с температурой t_{ext} в галерею (рис. 8). В галерее нет выделений влаги, поэтому переохлаждение ее конструкций до отрицательной температуры не вызывает обледенения и морозного разрушения конструкций стен галереи. При уходе поезда из галереи, во время интервала между поездами, она заполняется теплым воздухом из тоннеля с температурой t_{int} , идущим в направлении от 3 к 6.

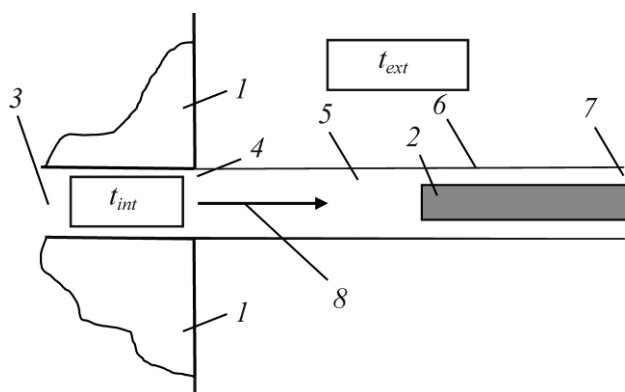


Рис. 8. Припортальная галерея: 1 — горный массив вокруг тоннеля; 2 — выходящий поезд; 3 — тоннель; 4 — выход из тоннеля; 5 — галерея; 6 — стенки галереи; 7 — выход из галереи; 8 — направление движения воздуха в галерее; t_{ext} — температура атмосферного воздуха; t_{int} — температура воздуха в тоннеле

В данной работе выполнена оценка изменения температуры воздуха по длине холодной галереи длиной $l_g = 500$ м в зависимости от скорости воздуха на примере Северомуйского тоннеля для двух вариантов ограждающей конструкции галереи:

— галерея неутепленная, стенка из листового металла $\delta_g = 0.005$ м;

— галерея дополнительно утеплена слоем минеральной ваты ($\lambda_{i,g} = 0.038$ Вт/(м°C), $\rho_{i,g} = 180$ кг/м³, $c_{i,g} = 840$ Дж/(кг°C), $\delta_{i,g} = 0.1$ м).

При штатной эксплуатации тоннеля в галерею со стороны тоннеля поступает воздух с температурой $t_{int} = 4$ °С, который полностью заполняет галерею и выходит наружу у открытого конца галереи. Скорость поступления теплого воздуха зависит от режима эксплуатации тоннеля, т. е. положения припортальных ворот (открыты или закрыты) и интервала времени между поездами.

Методами статического воздухораспределения получены характерные скорости движения воздуха в тоннеле:

- $v_{int} = 3.70$ м/с — максимальная скорость воздуха при частоте движения 6 поездов в час и интервалом между поездами 10 мин, когда в тоннеле открыты ворота и один поезд выходит из тоннеля, а второй поезд одновременно с первым входит в тоннель с максимальной эксплуатационной скоростью 75 км/ч;
- $v_{int} = 1.78$ м/с — средняя скорость воздуха в промежутке между проходами поезда с открытыми воротами, интервал движения между поездами меньше 10 мин;
- $v_{int} = 0.60$ м/с — минимальная скорость воздуха (посредством утечек через порталные ворота) при движении поезда в тоннеле с закрытыми воротами у порталов и интервалом между поездами 20 мин и более.

Расстояние, которое пройдет теплый воздух за временной интервал τ между поездами, составит: для $v_{int} = 3.70$ м/с $l_{air} = 2220$ м; для $v_{int} = 1.78$ м/с $l_{air} = v\tau = 1068$ м; для $v_{int} = 0.60$ м/с $l_{air} = 720$ м. При таких скоростях теплый воздух целиком заполнит галерею в течение временного интервала между поездами.

Исследования изменения температуры воздуха в тоннеле проведены для $v_{int} = 4^\circ\text{C}$, $t_{ext} = -45^\circ\text{C}$, скорости движения воздуха 0.60, 1.78 и 3.70 м/с в плоской осесимметричной постановке методами вычислительной аэродинамики и теплообмена в программной среде ANSYS Fluent. Решение базируется на совместном численном решении уравнений (1)–(3) с применением $k - \varepsilon$ RNG модели турбулентности:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i k \rho) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\varepsilon \rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \varepsilon \rho) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon, \quad (13)$$

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v}, \quad (14)$$

$$\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}, \quad (15)$$

$$C_v \approx 100. \quad (16)$$

В выражениях (12)–(16) u_i — векторное поле скоростей; ε — диссипация турбулентной кинетической энергии, Дж/(кг·с); μ_{eff} — эффективная динамическая вязкость, Па·с; $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_v = 100$, $\alpha_k = 1.193$ — константы модели турбулентности; G_k , G_b , Y_M , S_k , $C_{3\varepsilon}$, R_ε , S_ε — величины, определяемые из решений дополнительных уравнений [4]. Результаты расчета средней по поперечному сечению температуре воздуха в галерее t_g приведены на рис. 9 и в табл. 2.

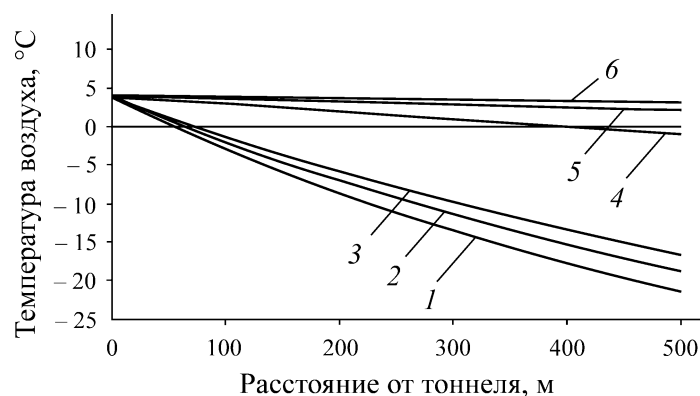


Рис. 9. Изменение температуры тоннельного воздуха при движении по галерее со скоростями, м/с: 1 — 0.60; 2 — 1.78; 3 — 3.70; 4 — 0.60 с теплоизоляцией; 5 — 1.78 с теплоизоляцией; 6 — 3.70 с теплоизоляцией; 0 м — выход из тоннеля в галерею; 500 м — выход из галереи в атмосферу

При использовании неутепленной галереи минимальная температура поступающего в тоннель воздуха при выходе поезда составит $-21.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре наружного атмосферного воздуха $t_{ext} = -45\text{ }^{\circ}\text{C}$, что дает снижение требуемой тепловой мощности припортальной тепловой завесы на 48.2%. При использовании теплоизолированных стен галереи средняя температура поступающего в тоннель воздуха при тех же условиях будет положительной. Это означает отсутствие теплотрат на нагрев врывающегося воздуха при выходе поезда из тоннеля. Холодный атмосферный воздух не достигает тоннеля, предотвращая наледообразование и морозное разрушение конструкции его обделки.

ТАБЛИЦА 2. Средняя температура воздуха в поперечном сечении по длине галереи t_g , $^{\circ}\text{C}$

Расстояние от выхода из тоннеля, м	Скорость движения воздуха v_{int} , м/с					
	Стенки с теплоизоляцией			Стенки без теплоизоляции		
	0.60	1.78	3.70	0.60	1.78	3.70
1	4.0	4.0	4.0	3.7	3.8	3.8
125	2.7	3.5	3.8	-4.5	-3.4	-2.6
250	1.4	3.0	3.5	-11.1	-9.2	-7.9
375	0.2	2.6	3.3	-16.8	-14.4	-12.6
500	-1.0	2.1	3.0	-21.4	-18.8	-16.7
Среднее	1.5	3.0	3.5	-10.0	-8.4	-7.2

Холодная галерея — эффективный способ борьбы с морозным разрушением обделки тоннеля. Однако в случае отсутствия гидроизоляции тоннеля она подвержена внутреннему обледенению вследствие того, что при охлаждении влажного тоннельного воздуха в галерее происходит конденсация влаги. Для предупреждения обледенения холодной галереи для рассматриваемого варианта необходима ее тепловая изоляция и устройство греющего кабеля на участке длиной 100 м от выхода из галереи (рис. 9).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ТОННЕЛЕ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Закономерности изменения температуры воздуха по длине тоннелей, эксплуатируемых в условиях Сибири и Дальнего Востока, остаются мало освещенными и не до конца изученными, что отрицательно влияет на качество проектирования теплового и температурного режима тоннелей и корректность выбора параметров тепловентиляционных установок. Существующие публикации по вентиляции протяженных транспортных тоннелей и транспортных узлов в основном посвящены оценке влияния поршневого действия от движущихся поездов и радиационного загрязнения тоннеля на функционирование системы вентиляции [8–17]. Также известны работы [18–20], посвященные исследованию теплообменных процессов в горных выработках, их охлаждению и искусственному замораживанию. Специфика объекта исследования в них — температурные поля в массиве вокруг горных выработок и строящихся шахт — не позволяет в полной мере использовать полученные результаты применительно к аэротермодинамическим процессам в транспортных горных тоннелях.

В [21] выполнен анализ составляющих теплового баланса тоннеля, в частности теплопотерь на нагрев поезда, однако изменение температуры воздуха по длине тоннеля не рассмотрено. В [22] исследованы фактические температуры воздуха в Северомуйском тоннеле и выявлено, что при температурах наружного воздуха $-25 \div -35$ °С температура воздуха в тоннеле колеблется около 0 °С, при этом расчетная температура для проектирования систем тепловентиляции тоннеля согласно [23] составляет -40 °С. В [24] обосновано место расположения и перспективы использования турбореактивных конвертируемых авиационных двигателей [25, 26], но закономерности изменения температуры воздуха по длине тоннеля до конца не изучены. В [27] рассмотрено радиальное распределение температур во вмещающем грунте и различных сечениях тоннеля Нань Шань провинции Цзилинь (Китай). Район расположения тоннеля характеризуется влажным умеренно-континентальным муссонным климатом с длинными холодными снежными зимами и прохладным влажным летом, самая низкая температура в регионе составляет -17 °С, что не позволяет применить результаты исследования к тоннелям БАМа. В [28] исследован температурный режим тоннеля в условиях грунтов с высокой температурой, в [29, 30] — поршневой эффект и распределение пыли в тоннеле. Известен ряд работ по тепловым режимам тоннелей и станций метрополитенов мелкого заложения [14, 31–33], в которых подробно освещены закономерности изменения температурных полей окружающего тоннель грунтового массива и тепловые потоки через ограждающие конструкции, однако зависимости изменения температур в тоннелях метрополитена нельзя напрямую использовать для конструкции и условий эксплуатации железнодорожного тоннеля.

Изучение температурного режима железнодорожного тоннеля для определения его зависимости от мест расположения тепловентиляционных установок позволит прогнозировать неблагоприятные области как с отрицательной температурой воздуха в тоннеле, так и со значительным перегревом. Исследование выполнено на примере Северомуйского тоннеля для режима эксплуатации, когда на одном из порталов ворота открыты, на втором — закрыты. Степень перекрытия поездом тоннеля $S_t/S=0.27$, длина тоннеля 15 357 м, частота движения принята максимальной и равна 6 пар/ч при интервале движения 10 мин, скорость поезда 75 км/ч, составы приняты грузовыми с количеством вагонов 71 шт. Математическое моделирование теплооб-

менных процессов проведено для одностороннего прямого и одностороннего обратного режимов движения поездов. Методика расчета температур воздуха в тоннеле основана на разбиении тоннеля на некоторое количество участков и определение температур тоннельного воздуха на их границах. Расчетная схема i -го участка тоннеля приведена на рис. 10.

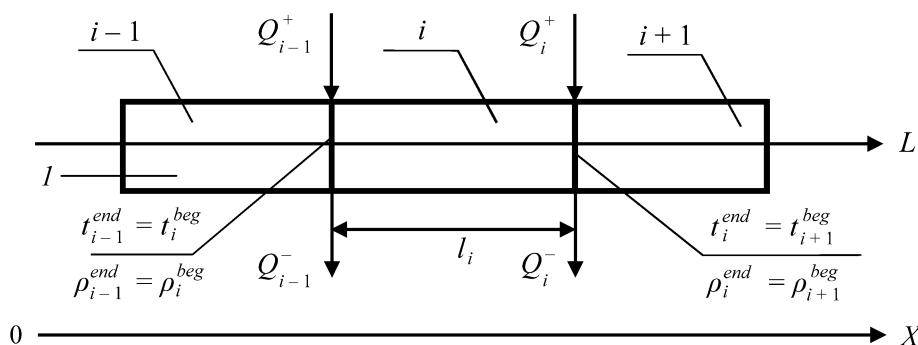


Рис. 10. Расчетная схема i -го участка тоннеля: $i - 1, i, i + 1$ — номера участков; L — расход воздуха в тоннеле; t^{beg}, t^{end} — начальная и конечная температура соответствующего участка; ρ^{beg}, ρ^{end} — конечная и начальная плотность воздуха соответствующего участка, °C; l_i — длина участка, м; Q^+, Q^- — среднечасовые теплопоступления (от тепловентиляционных установок) и среднечасовые теплопотери (от холодной стенки поезда, на нагрев воздуха у входного и выходного порталов) на соответствующем участке, Вт; l — тоннель; ось OX показывает направление пошагового расчета

Исследуемая среднечасовая температура воздуха в конце участка тоннеля вычисляется по формуле

$$t_i^{end} = t_i^{beg} + \frac{Q^{i,+} - Q^{i,-}}{c \rho_i L}.$$

Здесь t_i^{beg} — начальная температура воздуха на участке i , °C; $Q^{i,+}, Q^{i,-}$ — теплопоступления и теплопотери на участке i , Вт [19]; $c = 1005$ — теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C); ρ_i — средняя плотность воздуха на участке, кг/м³; L — расход воздуха через тоннель, м³/с. Расход L постоянен для всех участков тоннеля, для тоннеля с открытыми и закрывающимися воротами определен в [18].

В модели приняты следующие допущения: равномерно распределенные теплопотери по длине участка суммируются и приводятся к концу участка; при определении средней плотности воздуха на участке i используются температуры воздуха, полученные на участке $i - 1$; теплозатраты на нагрев стенки поезда, рассчитанные в [15], уточняются при помощи зависимости

$$Q_{tr,act}^{i,-} = Q_{tr}^{i,-} \frac{t_{tr,i}^{beg} - t_i^{beg}}{\Delta t_0},$$

Δt_0 — температурный напор между стенкой поезда и тоннельным воздухом, для которого найдены значения $Q_{tr}^{N,-}$ [19].

Температура поезда в начале расчетного участка $N t_{tr,N}^{beg}$ находится как

$$t_{tr,i}^{beg} = t_{tr,i-1}^{end} = t_{tr,i-1}^{beg} + \varphi \frac{(t_{tr,i-1}^{beg} - t_{i-1}^{end}) l_i}{v_{tr}},$$

где $t_{tr,i-1}^{end}$, $t_{tr,i}^{beg}$, $t_{tr,i-1}^{beg}$ — соответственно конечная температура стенки поезда на предыдущем участке, начальная температура стенки поезда на текущем и предыдущем участках, °С; t_{i-1}^{end} — конечная температура воздуха на предыдущем участке, °С; v_{tr} — скорость поезда на участке, м/с; $\varphi = 0.000237$ 1/с — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость изменения температуры тоннельного воздуха по длине участка.

Для участка $i = 1$ температура $t_{tr,i}^{beg}$ равна расчетной наружной температуре t_{ext} . Конечная температура воздуха t_i^{end} на участке i является начальной температурой воздуха t_i^{beg} на участке $i + 1$. Начальная температура для первого участка у входного портала принимается равной наружной температуре $t_i^{beg} = t_{ext} = -40$ °С. Расчет ведется последовательно от одного участка к другому в направлении движения поезда по тоннелю при различном расположении и количестве тепловентиляционных установок.

На рис. 11 представлены рассматриваемые компоновочные схемы расположения тепловентиляционных установок в тоннеле.

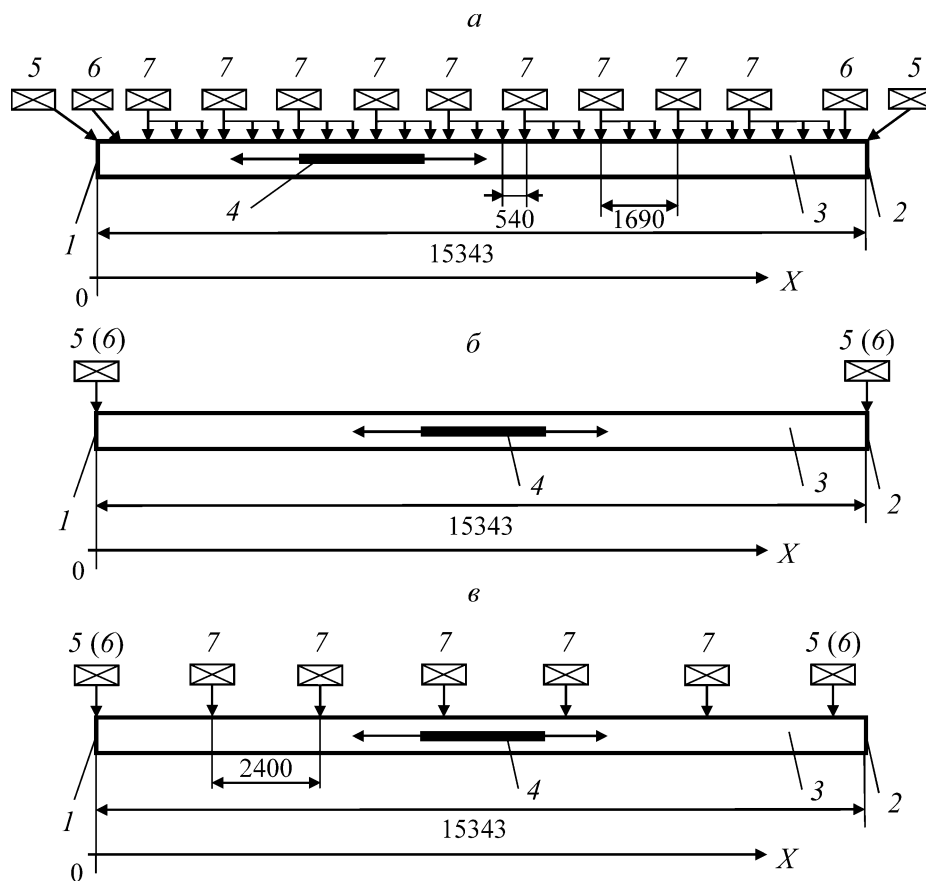


Рис. 11. Схемы расположения тепловентиляционных установок в тоннеле: а — воздушно-тепловые завесы у порталов, совмещенные с продольной поперечной схемой тепловентиляции (для одностороннего движения поезда); б — тепловентиляционные установки у входного и выходного порталов; в — равномерное распределение тепловой мощности тепловентиляционных установок по длине тоннеля с равным шагом; 1 — входной портал; 2 — выходной портал тоннеля; 3 — тоннель; 4 — поезд; 5 — тепловентиляционная установка у входного портала; 6 — тепловентиляционная установка у входного и выходного портала; 7 — местные тепловентиляционные установки

Для трех схем принята одинаковая суммарная тепловая мощность тепловентиляционных установок 13.095 МВт [21], равная потерям тепла в тоннеле, т. е. достигнут тепловой баланс. Схема *a* (рис. 11) — воздушно-тепловые завесы у порталов тоннеля, совмещенные с продольно-поперечной схемой воздушного отопления тоннеля. Расстояние между устройствами выпуска теплого воздуха определяется как длина пути, который пройдет нагретый воздух со скоростью v_{int} за интервал движения между поездами. В схеме *б* вся отопительная мощность концентрируется у порталов тоннеля и выделяется тепловыми завесами. По длине тоннеля дополнительные тепловентиляционные устройства не устанавливаются. В схеме *в* тепловентиляционные установки преимущественно одинаковой тепловой мощности размещаются через равные расстояния (2400 м) по длине тоннеля, которые больше, чем длина пути, который проходит нагретый воздух со скоростью v_{int} за интервал движения между поездами. Для схем *a–в* рассмотрен режим эксплуатации с односторонним движением составов и с двухсторонним (реверсивный режим).

Результаты исследования температуры внутреннего воздуха $t_{int} = t_i^{end}$ по длине тоннеля и температуры стенки движущихся составов $t_{tr,i}^{beg}$ при наружной температуре $t_{ext} = -40^\circ\text{C}$ отражены на рис. 12. При использовании схемы *a* (рис. 11) наблюдается равномерный прогрев тоннельного воздуха с экстремумом температур у выходного портала тоннеля до $32–36^\circ\text{C}$ (рис. 12*a*). Это связано с работой тепловой завесы, рассчитанной на нагрев врывающегося холодного воздуха при выходе поезда из выходного портала. При использовании схем тепловентиляции *б* и *в* (рис. 11) не достигается равномерный прогрев внутреннего пространства тоннеля:

- для схемы *б* (рис. 11) при реверсивном движении поездов наблюдается перегрев припортальных участков тоннеля с наличием зоны отрицательных температур на участке протяженностью 6 км по середине тоннеля; при одностороннем движении поездов начиная с 4800 м от входного портала вплоть до выходного портала температура внутреннего воздуха в тоннеле имеет отрицательные значения (до -30°C) (рис. 12*б*);

- при реверсивном движении по схеме *в* (рис. 11) отмечается недогрев воздуха у порталов тоннеля с наличием зоны перегрева воздуха до 30°C протяженностью 5 км по середине тоннеля; при одностороннем движении поездов на участке от входного портала до 5400 м наблюдается преимущественно отрицательная температура воздуха в тоннеле; на участке от 5400 м до выходного портала тоннельный воздух прогревается до температуры, значительно превышающей требуемые значения (до 60°C) (рис. 12*в*).

Для определения наиболее рациональной схемы установки тепловентиляционных устройств с точки зрения соответствия поддерживаемой температуры в тоннеле требуемому значению введен критерий энергетического совершенства системы тепловентиляции:

$$K = K_1 |K_2|. \quad (17)$$

Составляющие формулы (17) определяются следующим образом:

$$K_1 = \begin{cases} -1, & \text{если } t_{int}^{\min} < 0, \\ +1, & \text{если } t_{int}^{\min} \geq 0, \end{cases} \quad K_2 = \frac{1}{L t_{int}^{dem}} \int_0^L t_{int}(l) dl,$$

где t_{int}^{\min} — минимальная температура воздуха в тоннеле, $^\circ\text{C}$; t_{int} — температура воздуха на расчетном участке; t_{int}^{dem} — требуемая температура тоннельного воздуха (4°C); l , L — длина участка и тоннеля; $t_{int}(l)$ — зависимость изменения температуры внутреннего воздуха по длине тоннеля.

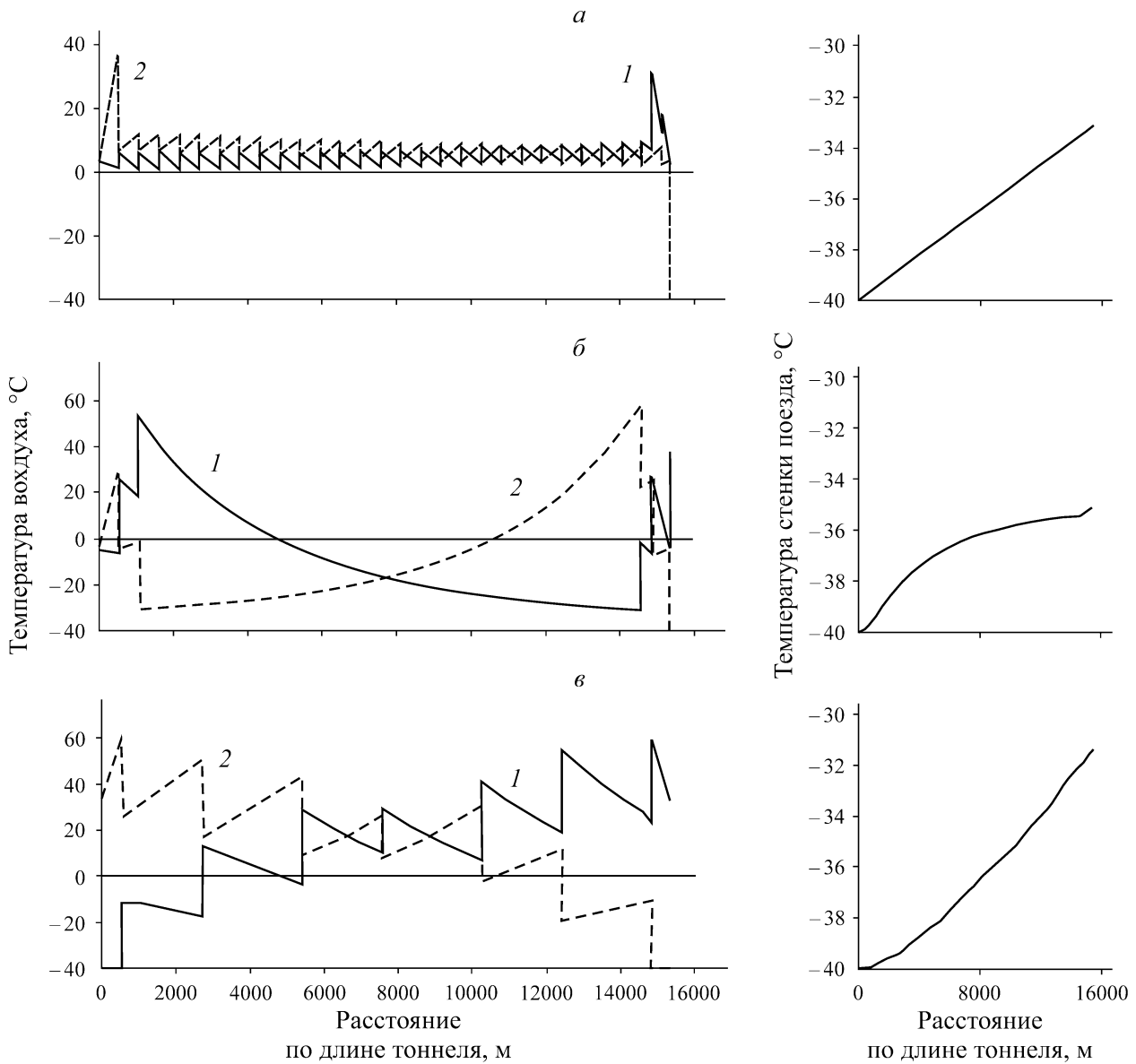
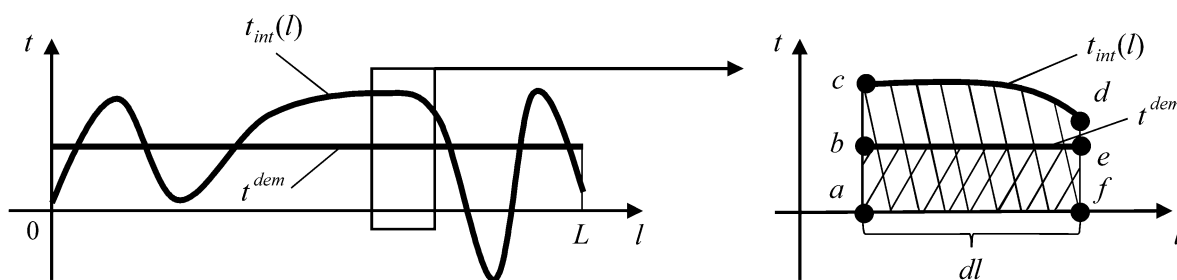


Рис. 12. Температура тоннельного воздуха (слева) и стенки поезда (справа) при его движении по тоннелю для трех схем а–в; 1, 2 — прямой и обратный режим движения

Коэффициент K_1 в формуле (17) показывает обоснованность применения системы тепло-вентиляции. Если K_1 имеет отрицательное значение, то система не в состоянии поддерживать положительную температуру воздуха в тоннеле и не может использоваться. Коэффициент K_2 — отношение количества фактически затраченной энергии на подогрев воздуха в тоннеле к требуемому количеству энергии из условия поддержания температуры внутреннего воздуха t_{int}^0 . Его геометрический смысл заключается в отношении площадей фигур $abcdef$ и $abef$ на рассматриваемом участке тоннеля (рис. 13). В идеальном случае коэффициент K должен равняться 1. Это означает, что требуемая положительная температура поддерживается на всем протяжении тоннеля и затраты теплоты на подогрев воздуха в тоннеле соответствуют теплотерям, т. е. в тоннеле достигнут баланс теплотер и теплоступлений.

Рис. 13. К определению коэффициента K_2

Коэффициенты K_1 , K_2 , K для схем a – $в$ (рис. 11) системы тепловентиляции тоннеля приведены в табл. 3. Наиболее близкий к единице критерий имеет схема a . Схемы b и $в$ не могут использоваться для тепловентиляции тоннеля, так как:

— для схемы b коэффициенты K_1 и K_2 отрицательны, в тоннеле наблюдаются участки с отрицательными температурами воздуха и фактическое количество затраченной тепловой энергии меньше требуемого количества;

— для схемы $в$ коэффициент K_1 отрицателен, в тоннеле имеются участки с отрицательными температурами воздуха.

ТАБЛИЦА 3. Значения критерия энергетического совершенства для разных схем системы тепловентиляции тоннеля

Критерий	Схема a	Схема b	Схема $в$
K_1	1.00	–1.00	–1.00
K_2	1.24	–1.80	3.69
K	1.24	–1.80	–3.69

ВЫВОДЫ

Определена зависимость протяженности зоны переохлаждения тоннельной обделки вглубь железнодорожного тоннеля от выходного портала, возникающая при выходе из него поезда, от температуры внутреннего тоннельного воздуха, температуры атмосферного воздуха, степени перекрытия поездом живого сечения тоннеля и скорости его движения. Рассмотрены способы борьбы с обмерзанием железнодорожного тоннеля, обоснованы их технические и конструктивные параметры.

В однопутном тоннеле для прямого и обратного режимов движения составов выявлены закономерности изменения температуры внутреннего воздуха в холодный период года в зависимости от схемы расположения тепловентиляционных установок в тоннеле. Предложен критерий энергетического совершенства системы тепловентиляции, показывающий эффективность применения выбранной схемы расположения тепловентиляционных установок. Установлено, что схема с установкой всех отопительных мощностей у порталов и схема с установкой тепловентиляционных устройств через равные расстояния по длине тоннеля не обеспечивают требование по поддержанию положительной температуры в тоннеле. Наиболее эффективна схема с совмещением воздушно-тепловых завес у порталов тоннеля с тепловентиляционными установками, размещенными равномерно по длине тоннеля через интервалы, равные длине пути, который проходит поток теплого воздуха между соседними тепловентиляционными устройствами за время отсутствия поезда в тоннеле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лугин И. В., Витченко А. А.** Поддержание требуемого температурного режима в Северомуйском тоннеле в холодный период года средствами тоннельной вентиляции // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2014. — Т. 1. — № 1. — С. 210–214.
2. **Гендлер С. Г.** Основные направления модернизации системы вентиляции Байкальского железнодорожного тоннеля // *ГИАБ*. — 2013. — Отд. вып. № 1. — С. 288–296.
3. **СП 122.13330.2012.** Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-2007: утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012, дата введения 01.01.2013. — М., 2012. — 132 с.
4. **Ansys user's help viewer.** Version 2019 R3.
5. **Батурин О. В., Батурин Н. В., Матвеев В. Н.** Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent. — Самара: СамГАУ, 2009. — 151 с.
6. **Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В.** Основы работы в ANSYS 17. — М.: ДМК “Пресс”, 2017. — 210 с.
7. **СП 50.13330.2.12.** Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003: утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012, дата введения 01.01.2013. — М., 2013. — 96 с.
8. **Гендлер С. Г., Плескунов В. А.** Выбор рациональной схемы проветривания Кузнецовского железнодорожного тоннеля // *ГИАБ*. — 2009. — № S13. — С. 81–89.
9. **Гендлер С. Г., Кастанеда В. А., Белен А. Г.** Управление естественными вентиляционными потоками в транспортных тоннелях // *ГИАБ*. — 2012. — № 4. — С. 138–149.
10. **Гендлер С. Г., Смирняков В. В., Соколов В. А.** Первые результаты натурных испытаний системы вентиляции Северомуйского железнодорожного тоннеля // *ГИАБ*. — 2005. — № S2. — С. 272–281.
11. **Гендлер С. Г., Мироненкова Н. А.** Выбор рациональных схем вентиляции железнодорожных тоннелей, расположенных в суровых климатических условиях, по радиационному фактору // *ГИАБ*. — 2008. — № S5. — С. 298–306.
12. **Гендлер С. Г., Савенков Е. А.** Использование струйных вентиляторов для проветривания железнодорожных тоннелей // *ГИАБ*. — 2015. — № S7. — С. 26–31.
13. **DIN EN 14067.** Bahnanwendungen. Aerodynamik. Teil 3: Aerodynamik im Tunnel. Deutsche fassung EN 14067-3, 2003. — 14 p.
14. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., and Pavlov S. A.** Experimental research into air distribution in a terminal subway station, *Tunnelling and Underground Space Technol.*, 2019, Vol. 85. — P. 21–28.
15. **Красюк А. М., Лугин И. В., Алферова Е. Л., Кияница Л. А.** Обоснование технологической схемы вентиляции двухпутных тоннелей метрополитенов без перегонных вентиляционных камер // *ФТПРПИ*. — 2016. — № 4. — С. 117–130.
16. **Yueming Wen, Jiawei Leng, Xiaobing Shen, Gang Han, Lijun Sun, and Fei Yu.** Environmental and health effects of ventilation in subway stations: A literature review, *Int. J. of Environmental Res. and Public Health*, 2020, Vol. 1084, No. 117. — 37 p.
17. **Yueming Wen, Jiawei Leng, Fei Yu, and Chuck Wah Yu.** Integrated design for underground space environment control of subway stations with atriums using piston ventilation, *Indoor and Built Environment*, 2020, Vol. 16, No. 1. — 16 p.
18. **Семин М. А., Левин Л. Ю., Желнин М. С., Плехов О. А.** Исследование естественной конвекции в обводненном породном массиве в условиях искусственного замораживания // *ФТПРПИ*. — 2020. — № 2. — С. 151–163.

19. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 172–184.
20. Каймонов М. В., Хохолов Ю. А. Выбор состава льдопородных закладочных массивов // ФТПРПИ. — 2019. — № 5. — С. 179–188.
21. Лугин И. В., Алферова Е. Л. Теплотери при движении поезда по подземному тоннелю при различных условиях эксплуатации // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — № 2. — Т. 6. — С. 181–185.
22. Гендлер С. Г., Белов М. Р. Основные направления модернизации тепловентиляционной системы Северомуйского тоннеля при увеличении размера движения подвижного состава // ГИАБ. — 2019. — Отд. вып. № 4/6. — С. 45–57.
23. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*: утв. Приказом Минрегион РФ 28.11.2018, дата введения 29.05.2019. — М., 2019. — 113 с.
24. Красюк А. М., Лугин И. В., Куликова О. А. О применении двухконтурного турбореактивного двигателя для обеспечения теплового режима железнодорожных тоннелей в суровых климатических условиях // ГИАБ. — 2018. — № 2. — С. 103–110.
25. Постников А. М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. — Самара: СНЦ РАН, 2002. — 286 с.
26. Гриценко Е. А., Данильченко В. П., Лукачев С. В., Резник В. Е., Цыбизов Ю. И. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. — Самара: СНЦ РАН, 2004. — 266 с.
27. Xiaohan Zhou, Yanhua Zeng, and Lei Fan. Temperature field analysis of a cold-region railway tunnel considering mechanical and train-induced ventilation effect, Applied Thermal Eng., 2016, Vol. 100. — P. 114–124.
28. Yanhua Zeng, Liangliang Tao, Xuqian Ye, Xiaohan Zhou, Yong Fanga, Lei Fan, Xinrong Liu, and Zongxian Yang. Temperature reduction for extra-long railway tunnel with high geotemperature by longitudinal ventilation, Tunnelling and Underground Space Technol., 2020, Vol. 99. — 16 p.
29. Jiqiang Niu, Yang Sui, Qiujuan Yu, Xiaoling Cao, and Yanping Yuan. Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research, Energy and Built Environment, 2020, Vol. 1, Issue 4. — P. 351–375.
30. Wenjie Zhou, Wen Nie, Xiaofei Liu, Cunhou Wei, Changqi Liu, Qiang Liu, and Shuai Yin. Optimization of dust removal performance of ventilation system in tunnel constructed using shield tunneling machine, Building and Environment, 2020, Vol. 173. — 56 p.
31. Красюк А. М., Лугин И. В., Пьянкова А. Ю. Определение размеров массива грунта, подверженного тепловому влиянию подземных станций и тоннелей метрополитена // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 122–128.
32. Красюк А. М., Лугин И. В., Пьянкова А. Ю. Исследование температур грунта, окружающего станцию метрополитена мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 64–74.
33. Кияница Л. А. К вопросу определения аналитических зависимостей теплового потока в грунт из подземных сооружений станций закрытого типа метрополитена мелкого заложения с двухпутным тоннелем // ГИАБ. — 2018. — № 2. — С. 89–102.

Поступила в редакцию 05/XI 2020

После доработки 10/XII 2020

Принята к публикации 15/I 2021