

Научная статья

УДК 532.542.4

doi: 10.17223/19988621/93/12

Численное исследование тепловентиляционного состояния припортального тамбура тоннеля в зимнее время года

Андрей Александрович Оберемок¹, Алексей Юрьевич Крайнов²,
Леонид Леонидович Миньков³

^{1, 2, 3} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ oberemokaa@minesoft.ru

² akrainov@ftf.tsu.ru

³ lminkov@ftf.tsu.ru

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования тепловентиляционного состояния припортального тамбура тоннеля в зимнее время года, выполненного в приближении турбулентного вязкого теплопроводного сжимаемого газа. Рассмотрены два режима работы тепловентиляционных установок, расположенных в тамбурном пространстве, – прямой и обратный. Показано, что обратный режим работы тепловентиляционных установок дает возможность обеспечить относительно равномерное движение воздуха по высоте проема портала и не позволяет холодному наружному воздуху проникать более чем на 10 м вглубь тамбура.

Ключевые слова: вентиляция, тоннель, припортальный тамбур, тепловое состояние, математическое моделирование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0036.

Для цитирования: Оберемок А.А., Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численное исследование тепловентиляционного состояния припортального тамбура тоннеля в зимнее время года // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 93. С. 140–159. doi: 10.17223/19988621/93/12

Original article

A numerical study of the heat-ventilation state of a portal tambour of a tunnel in winter

Vasiliy A. Poryazov¹, Oleg G. Glotov², Aleksey Yu. Krainov³,
Dmitriy A. Krainov⁴, Ivan V. Sorokin⁵, Grigory S. Surodin⁶

^{1, 2, 3} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ oberemokaa@minesoft.ru

² akrainov@ftf.tsu.ru

³ lminkov@ftf.tsu.ru

Abstract. Numerical simulation of the heat-ventilation state of a portal tambour of a tunnel in winter is performed using the model of turbulent viscous heat-conducting compressible gas. The direct and reverse operating modes of heat-ventilation units (HVUs) located in the tambour are considered. The air intake and exhaust from the openings for the HVUs in the tambour occur at a 45° angle with respect to the plane of the wall. The following phenomena are taken into account when calculating the thermal state of the air mass in the tambour: air heating in the tambour due to operating HVUs; heat exchange between the air flowing from the outside into the tambour and the air in the tunnel; and heat exchange between the air flowing from the portal side into the tambour and the air in the tunnel. It is assumed that external cold air with a temperature of -43°C is flowing into the tambour at a volumetric flow rate of $100\text{ m}^3/\text{s}$. The reverse operation mode of the HVUs ensures relatively uniform air flow along the height of the gate opening and does not allow cold air to penetrate from the outside into the tambour down to a depth of more than 10 m.

Keywords: ventilation, tunnel, portal tambour, thermal state, mathematical modeling

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment No. FSWM-2020-0036).

For citation: Oberemok, A.A., Krainov, A.Yu., Min'kov, L.L. (2025) A numerical study of the heat-ventilation state of a portal tambour of a tunnel in winter. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 93. pp. 140–159. doi: 10.17223/19988621/93/12

Введение

Основной проблемой эксплуатации тоннелей в зимнее время в суровых климатических условиях является образование наледи на его стенках и контактных проводах, проходящих в тоннеле. Для устранения данного негативного фактора используют тепловентиляционные установки (ТВУ) и закрывающиеся в автоматическом режиме порталные ворота, что позволяет повышать температуру в тоннеле до приемлемых значений. Требуемая температура воздуха внутри тоннеля поддерживается за счет тепла, выделяемого калориферами ТВУ, и конвективного теплообмена между воздухом и стенками тоннеля. Для определения мощности ТВУ необходимо знать величину воздухообмена в тоннеле, которая определяется как скоростью прохождения железнодорожных составов, так и их количеством.

Экспериментально-теоретическое исследование влияния конвекции воздушного потока и теплопроводности материала стенки тоннеля на изменение температуры внутри тоннеля в зависимости от скорости воздушного потока с низкой температурой на входе проводилось в работах [1, 2]. Результаты показали, что температура воздушного потока и окружающей породы быстро падает в начале процесса и замедляется со временем. Температура воздушного потока и окружающей породы колеблется в зависимости от изменения температуры на входе, и это колебание является гистерезисным.

В работе [3] показано, что система вентиляции существенно влияет на температуру воздуха внутри тоннеля и распределение температуры в пристенной

окружающей породе. Важным фактором, определяющим процесс теплообмена, является среда, заполняющая трещины в горных выработках. Вопросы оптимизации системы вентиляции сверхдлинных тоннелей обсуждаются в работах [4, 5].

Процессы теплообмена в протяженных заглубленных тоннелях и вопросы, связанные с охлаждением воздуха в них, исследовались в работах [6, 7]. Показано, что использование технологий вентиляции и распылительного охлаждения является перспективным в местах с высокими температурами благодаря своему удобству и экологичности.

В работе [8] представлен обзор исследований аэродинамических эффектов, возникающих в тоннелях при прохождении в них поездов, в том числе высокоскоростных, и связанных с этим таких проблем, как аэродинамическое сопротивление, скольжение, волна давления и волна микродавления.

Исследование воздушного распределения в протяженных железнодорожных тоннелях длиной 3 и 6 км от поршневого действия поездов проводилось в работах [9–11] с помощью численного моделирования в программном пакете ANSYS Fluent. Показано, что основным эксплуатационным фактором, влияющим на воздухообмен, инициированный поршневым действием движущихся поездов в протяженном железнодорожном тоннеле, – это длина поезда. Динамика расхода воздуха в тоннеле при прохождении по нему поезда является линейной во время входа поезда в тоннель, степенной после полного вхождения поезда в тоннель и линейной во время выхода поезда из тоннеля.

Разработка технических решений для модернизации систем вентиляции и подогрева воздуха в Северомуйском тоннеле, связанной с увеличением интенсивности движения железнодорожных составов в зимний период, рассматривалась в работе [12]. В частности, были проведены расчет мощности калориферных установок для подогрева воздуха и определение мест их размещения по длине тоннеля, а также получено распределение температуры воздуха по длине тоннеля.

Исследование зон переохлаждения в тоннелях, приводящих к образованию наледей на стенках тоннеля, проводилось в работах [13, 14]. Показано, что наиболее рациональным способом размещения тепловентиляционных установок для поддержания требуемой температуры тоннельного воздуха является их равномерное распределение по длине тоннеля, совмещенное с установкой припортовых воздушно-тепловых завес [13, 15]. Была доказана энергетическая эффективность размещения ворот на порталах тоннеля, и обосновано расположение относительно портала мест подачи в тоннель подогретого в калориферах воздуха и удаления из него охлажденного воздуха, обеспечивающее максимальный энергетический эффект [14, 16, 17].

В работе [18] представлены результаты исследования распределения температуры воздуха по длине протяженного железнодорожного тоннеля в зависимости от различных конфигураций и мест расположения тепловентиляционных установок. Показано, что наиболее рациональным способом является равномерное размещение тепловентиляционных установок по длине тоннеля, совмещенное с устройством припортовых воздушно-тепловых завес. Это позволяет обеспечить положительную температуру воздуха на всех участках по длине тоннеля.

В работах [16, 19] рассмотрены различные проблемы проветривания транспортных тоннелей. В частности, утверждается, что создание в железнодорожных тоннелях положительного теплового режима за счет подогрева подаваемого

в выработки наружного воздуха является одним из наиболее надежных способов предотвращения образования наледей.

Исследование теплотерь в тоннеле на нагревание холодного поезда проводилось в работах [11, 20]. Методами вычислительной аэродинамики в стационарной и нестационарной постановках изучена динамика воздухораспределения от поршневого действия поездов в протяженных железнодорожных тоннелях [21].

Интенсификация движения железнодорожных составов в тоннелях в зимнее время года, с одной стороны, создает трудности в работе порталных ворот, на открытие и закрытие которых требуется определенное время, а с другой стороны, вызывает обмерзание порталных ворот. Увеличение пропускной способности тоннеля ведет к изменению нормативных требований, предъявляемых к количеству и месту расположения ТВУ. Одним из путей решения задачи обеспечения положительного теплового баланса тоннеля в холодное время года являются отказ от порталных ворот и постройка специального тамбура перед порталом с дополнительными ТВУ, обеспечивающими подогрев втекающего холодного воздуха.

Цель данной работы – исследование воздухообмена и температурного поля в тамбурном сооружении для двух схем функционирования ТВУ, расположенных в нем, в холодное время года.

Физическая постановка задачи

Исследуется тепловентиляционный процесс в области (рис. 1), состоящей из тамбурного сооружения (тамбур) 1, порталного сооружения (портал) 2, после которого расположен транспортный тоннель. В тамбуре и портале с каждой боковой стороны находятся проемы для забора воздуха в ТВУ 3 и проемы для выброса нагретого воздуха из ТВУ 4. Площадь поперечного сечения тамбура составляет 34.44 м², портала 49.28 м², тоннеля 37.1 м². Длина тамбура – 60 м, длина портала – 20 м.

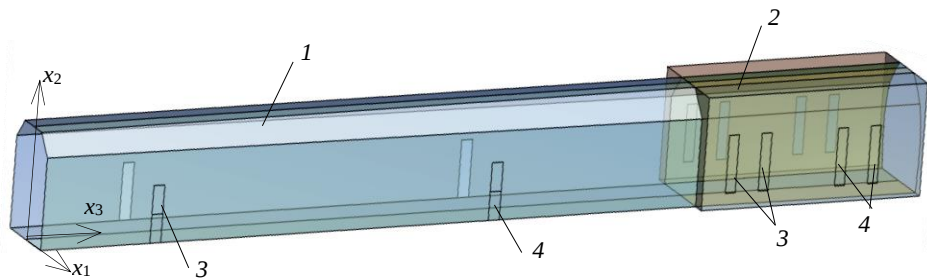


Рис. 1. Схема тамбурного и порталного сооружений:

1 – тамбур, 2 – портал, 3 – входной проем ТВУ, 4 – выходной проем ТВУ

Fig. 1. Design of the tambour and portal buildings: 1, tambour; 2, portal;

3, entrance opening of the heat-ventilation unit (HVU); and 4, exit opening of the HVU

Через входное сечение тамбура затекает холодный воздух с температурой –43 С и объемным расходом 100 м³/с. Для нагрева такого воздуха до 0 С требуется мощность источников тепла, равная 6.45 МВт ($\rho Q c_p \Delta T = 1.5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \times 100 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \times 1\,000 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \times 43 \text{ К}$).

В тамбуре находятся четыре ТВУ с общей мощностью 4.5 МВт (по 1.125 МВт на каждую ТВУ). В портале находятся также четыре ТВУ, но с общей мощностью 2 МВт (по 0.5 МВт на каждую ТВУ). Забор воздуха и выброс воздуха из проемов для ТВУ в тамбуре происходит под углом 45° к плоскости стены и под углом 90° в портале. Площадь поперечного сечения каждого входного (выходного) проема для забора воздуха в ТВУ и выброса воздуха из ТВУ для тамбура равна 1.8 м^2 , а для портала 3.24 м^2 .

Для обогрева тамбурного помещения с помощью ТВУ рассматриваются следующие две схемы:

1. ТВУ расположены параллельно (друг над другом; рис. 2, *a*). Вентиляторы ТВУ работают в прямом режиме. Забор воздуха происходит из тамбура через входной проем на расстоянии 10.5 м после входа в тамбур, и после подогрева воздух выбрасывается в тамбурное пространство на расстоянии 18.5 м перед входом в портал (расстояние между входными и выходными проемами составляет 31 м).

2. Расположение ТВУ такое же, как и в схеме 1, но вентиляторы работают в реверсивном режиме. Забор воздуха происходит из тамбурного пространства на расстоянии 18.5 м от порталных ворот, и после подогрева воздух выбрасывается на расстоянии 10.5 м от входа в тамбур (рис. 2, *b*).

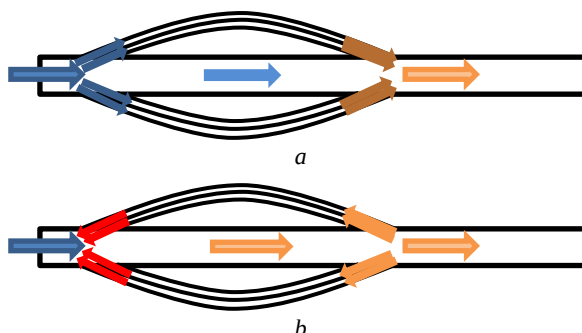


Рис. 2. Схема работы ТВУ в тамбуре: *a* – прямой режим; *b* – реверсивный режим

Fig. 2. Scheme of the HVU operation in the tambour: (*a*) direct and (*b*) reverse modes

При расчете теплового состояния воздушной массы тамбура учитываются следующие явления:

- нагрев воздуха в тамбуре за счет работающих тепловентиляционных установок;
- теплообмен между наружным воздухом, затекающим в тамбур, и воздухом, находящимся в тоннеле;
- теплообмен между воздухом, затекающим в тамбур со стороны портала, и воздухом, находящимся в тоннеле.

Математическая постановка задачи

Уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^6 \Delta p_i \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) + \rho g_i. \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial u_j (\rho E + p)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{ij, eff} \right) + \sum_{i=1}^6 Q_i \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i). \quad (3)$$

Уравнение состояния идеального газа

$$p = \rho RT, \quad (4)$$

где $E = H - \frac{p}{\rho}$, $H = h + \frac{u_i u_i}{2}$, $h = h^0(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T c_p dT$, $\tau_{ij, eff} = \mu_{eff} \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] -$

тензор эффективных напряжений, $\lambda_{eff} = \lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$ – эффективный коэффициент

теплопроводности газа, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ – эффективный коэффициент вязкости, R – газовая постоянная, g_i – ускорение свободного падения, μ – коэффициент молекулярной вязкости газа, μ_t – коэффициент турбулентной вязкости газа, λ – молекулярный коэффициент теплопроводности газа, c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Q_i – тепловой поток от радиатора, Δp_i – перепад давления на вентиляторе, $\delta(\mathbf{x})$ – дельта-функция Дирака, $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3\}$.

Модель турбулентности

В данной работе использовалась realizable k - ε -модель турбулентности, преимущество которой перед другими k - ε -моделями турбулентности состоит в том, что она позволяет более точно предсказывать скорость распространения как плоских, так и круглых струй [22].

Уравнение турбулентной энергии

$$\frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon. \quad (5)$$

Уравнение удельной скорости диссипации турбулентной энергии

$$\frac{\partial \rho \varepsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho \varepsilon \left(C_1 S - C_2 \frac{\varepsilon}{k + \sqrt{\mu \varepsilon \rho^{-1}}} \right) + C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} G_b \frac{\varepsilon}{k}, \quad (6)$$

где $G_k = \mu_t S^2$ – производство турбулентной кинетической энергии, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ –

модуль тензора скоростей деформации, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right)$,

$\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$, $C_2 = 1.9$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $G_b = -\frac{\mu_t}{\rho Pr_t} g_i \frac{\partial p}{\partial x_i}$, $C_{3\varepsilon} = \text{th} \left| \frac{V}{U} \right|$, V , U – соответ-

ственно параллельная и перпендикулярная компоненты вектора скорости вектору

гравитации; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = \left(A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon} \right)^{-1}$, $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}}$, $\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) -$

тензор завихренности; $A_0 = 4.04$, $A_s = 6\cos(\phi)$, $\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W)$, $W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}$,
 $\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$, $Pr_t = 0.85$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$.

Граничные условия

Граничные условия для турбулентной кинетической энергии на **стенке** задаются следующим образом:

$$\partial k / \partial n = 0,$$

скорость диссипация турбулентной кинетической энергии ε в пристенной области рассчитывается из условия равенства производства кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее диссипации и предположения о логарифмическом распределении средней скорости газа:

$$\varepsilon_p = C_\mu^{0.75} k_p^{1.5} / (\kappa y_p),$$

где $\kappa = 0.42$. Величина y_p – это расстояние от центра пристенной ячейки до стенки, если $y_p > \mu y^* / (\rho C_\mu^{0.25} k_p^{0.5})$, в противном случае $y_p = \mu y^* / (\rho C_\mu^{0.25} k_p^{0.5})$. Здесь $y^* = 11.225$.

Граничные условия **на входе** в область:

$$u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = U_0, T = T_{in}, \varepsilon = C_\mu^{0.75} k^{1.5} / (0.07 D_h), k = 1.5(U_0 \cdot I)^2,$$

где I – интенсивность турбулентных пульсаций, принималась равной 0.05; U_0 – скорость затекания воздуха в тамбур, 2.9 м/с; T_{in} – температура затекающего воздуха в тамбур, 230 К; D_h – гидравлический размер входного участка области, 7 м.

Граничные условия на **выходе** из области: $p = p_n - \rho g x_2$. Давление на нижней границе выхода $p_n = 101\,325$ Па, $g = 9.81$ м/с².

На стенках задавались условия прилипания $u_i = 0$. Предполагалось, что стенки тамбура являются адиабатическими, а стенки портала имеют постоянную температуру, равную 277 К.

Метод решения

Система уравнений (1)–(6) решалась численно с привлечением вычислительного пакета Ansys-Fluent. Для дискретизации по пространству использовалась противопоточная схема второго порядка аппроксимации. Расчет давления на гранях ячеек выполнялся с помощью схемы PRESTO! (PREssure STaggering Option). Связь между скоростью и давлением осуществлялась на основе алгоритма SIMPLE.

Для исследования влияния разностной сетки на результаты численного решения рассчитывалась среднемассовая температура в поперечных сечениях тамбура с координатами $x_3 = 5, 11, 17, 23, 29, 35, 41, 47, 53, 59$ м. Расчеты выполнялись на последовательности разностных сеток с шагом 0.25, 0.125 и 0.0625 м в направлении либо x_1 , либо x_2 , либо x_3 . Базовая разностная сетка имела характерный шаг, равный 0.25 м.

На рис. 3 показано изменение среднемассовой температуры вдоль тамбура в случае ТБУ, работающих в прямом режиме. Как видно, измельчение сетки

в продольном направлении тамбура практически не влияет на результаты расчета (рис. 3, *a*). Измельчение сетки в вертикальном направлении, ведет к снижению температуры на 1–2°C на промежутке от 23 до 35 м (рис. 3, *b*). Существенное влияние размер шага разностной сетки оказывает на распределение среднемассовой температуры в поперечном направлении (рис. 3, *c*). Из рисунка видно, что различие в среднемассовой температуре, полученной на разностных сетках с шагами 0.125 и 0.0625 м, существенно ниже, чем на разностных сетках 0.25 и 0.125 м, что свидетельствует о сходимости численного решения.

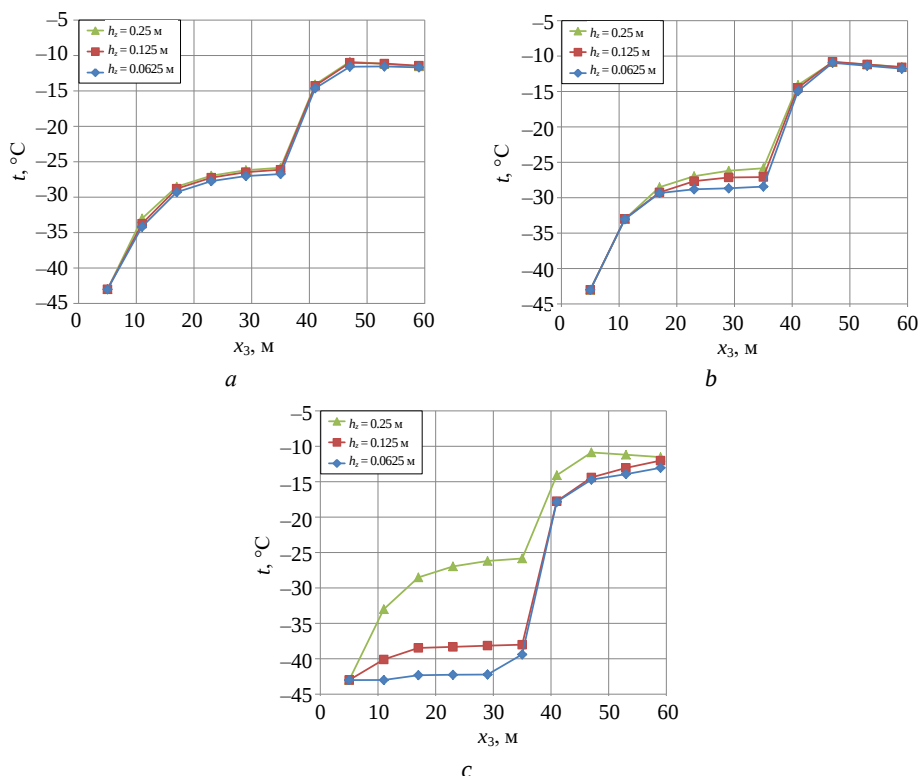


Рис. 3. Влияние шага разностной сетки на изменение среднемассовой температуры вдоль тамбура. Сгущение сетки в направлениях: *a* – продольном (x_3), *b* – вертикальном (x_2), *c* – поперечном (x_1)

Fig. 3. Effect of the difference grid step on the variation of the mass-average temperature along the tambour. Fine grid in the (a) longitudinal x_3 , (b) vertical x_2 , and (c) transverse x_1 directions

Влияние шага разностной сетки на распределение среднемассовой температуры вдоль тамбура в случае ТВУ, работающих в реверсивном режиме, несущественно. Результаты расчетов показывают, что среднее отклонение среднемассовых температур, полученных на сетках с шагом 0.25 и 0.0625 м, не превосходит 0.9°C по любому направлению, а среднее отклонение среднемассовых температур, полученных на сетках с шагом 0.125 и 0.0625 м, не превосходит 0.5°C.

Дальнейшие расчеты выполнялись на разностной сетке с шагом 0.0625 м в направлении x_1 , шагом 0.125 м в направлении x_2 и шагом 0.25 м в направлении x_3 .

Результаты расчетов и их обсуждение

Тепловое состояние тамбура для ТВУ, работающих в прямом режиме

На рис. 4, *a* показано поле температуры воздуха в поперечных сечениях тамбура, расположенных через каждые 6 м, в центральном вертикальном продольном сечении и в плоскости, соответствующей полу тамбура. На рис. 4, *b* показано поле температуры воздуха в центральном вертикальном продольном сечении. Поле векторов скоростей воздуха в центральном вертикальном продольном сечении показано на рис. 4, *c*. Цветовая палитра векторов скоростей соответствует температуре воздуха.

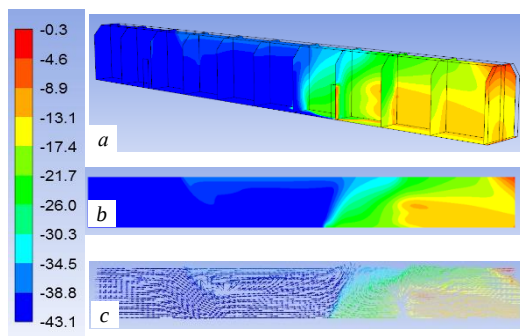


Рис. 4. Распределение параметров в тамбуре при работе ТВУ в прямом режиме:

a – поле температур в тамбуре; *b*, *c* – поле температур и векторов скоростей соответственно в центральном вертикальном продольном сечении

Fig. 4. Distribution of parameters in the tambour when the HVU operates in direct mode: (*a*) temperature field in the tambour; (*b*), (*c*) fields of temperature and velocity vectors, respectively, in the central vertical longitudinal section

Видно, что при параллельной организации работы ТВУ в прямом режиме холодный воздух проникает в тамбур по всей его высоте до места расположения проемов для забора воздуха в ТВУ, и далее холодный воздух движется до места выхода нагретого воздуха из ТВУ. Вследствие того, что холодный воздух затягивается в проемы 3 и в их окрестности реализуется опускное течение, холодный воздух смешивается с нагретым в ТВУ воздухом, и часть его продолжает движение в сторону портала, а другая часть поднимается вверх и движется в обратную сторону к месту расположения проемов для забора воздуха в ТВУ, где блокирует движение холодного воздуха в верхней части тамбура. Между проемами для забора воздуха в ТВУ 3 и выбросом воздуха из ТВУ 4 образуется циркуляционная зона. При этом основная масса нагретого воздуха движется в сторону портала. При этом часть воздуха поступает из верхней части портала.

На рис. 5 показано распределение среднemasовой температуры воздуха вдоль тамбура, вычисленной в поперечных сечениях, приведенных на рис. 4, *a*. Повышение температуры происходит в окрестности проемов 4, откуда в тамбур поступает нагретый воздух. На участке длиной 25 м от входа в тамбур температура практически не изменяется. Основное повышение температуры от -40 до -18°C происходит на участке от 35 до 41 м в результате работы ТВУ. Далее, по мере

продвижения воздушной массы к выходу из тамбура в портал, ее температура плавно повышается до -13°C .

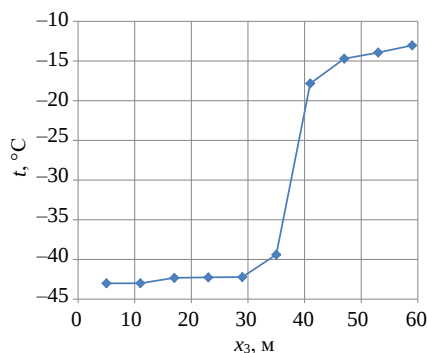


Рис. 5. Изменение среднemasовой температуры вдоль тамбура
Fig. 5. Variation of the mass-average temperature along the tambour

На рис. 6 приведены поля продольной скорости в горизонтальных сечениях, расположенных на высотах от 1 до 5 м, с шагом 1 м, над уровнем пола. Можно выделить три основных участка: начальный участок (от входа в тамбур до проема для забора воздуха в ТВУ), скорость движения воздуха на котором около $2\text{--}3 \text{ м/с}$; промежуточный участок (участок между проемами для забора воздуха в ТВУ и для выброса воздуха из ТВУ), скорость движения воздуха на котором составляет от -2 до $+2 \text{ м/с}$; участок струйного течения (от проема для выброса воздуха из ТВУ до входа в портал), скорость движения воздуха на котором может достигать $16\text{--}17 \text{ м/с}$. На высоте 5 м скорость воздуха на третьем участке падает до $7\text{--}9 \text{ м/с}$.

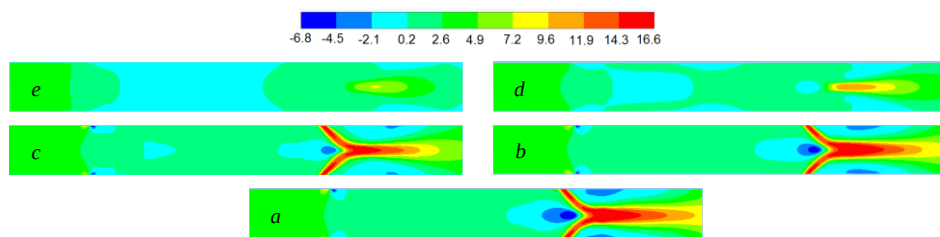


Рис. 6. Распределение продольной скорости на горизонтальных плоскостях тамбура:
 $a - y = 1 \text{ м}; b - 2 \text{ м}; c - 3 \text{ м}; d - 4 \text{ м}; e - 5 \text{ м}$

Fig. 6. Longitudinal velocity distribution on the horizontal planes of the tambour:
 $y = (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, \text{ and } (e) 5 \text{ м}$

На рис. 7 приведены поля продольной скорости в центральном вертикальном продольном сечении.

На высотах от 0 до 2 м воздух движется в сторону портала, при этом скорость воздуха не превосходит 3 м/с практически по всей длине тамбура, за исключением третьего участка, где течение имеет струйный характер в силу выбрасываемого нагретого воздуха из выходных проемов работающих ТВУ. На этом участке продольная скорость движения воздуха имеет как отрицательные значения до -8.6 м/с , так и положительные до 16 м/с . На входе в портал на высоте от 5 м и выше при-

существует участок с отрицательной скоростью, где воздух поступает из портала в тамбур (см. рис. 4 с).

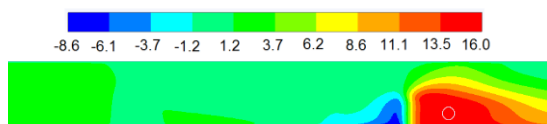


Рис. 7. Распределение продольной скорости в центральном вертикальном продольном сечении

Fig. 7. Longitudinal velocity distribution in the central vertical longitudinal section

На рис. 8 показана зависимость объемного расхода воздуха в разных поперечных сечениях тамбура от места положения этих сечений. На входе в тамбур объемный расход составляет $100 \text{ м}^3/\text{с}$. После прохождения проемов для забора воздуха в ТВУ объемный расход в тамбуре падает до $15 \text{ м}^3/\text{с}$ и остается неизменным вплоть до проема, служащего для выброса нагретого воздуха из ТВУ, после чего на участке длиной 12 м его значение монотонно повышается и достигает величины $112.5 \text{ м}^3/\text{с}$. Увеличение объемного расхода воздуха на выходе из тамбура по сравнению с объемным расходом на входе в тамбур объясняется повышением температуры воздуха за счет ТВУ, при этом массовый расход воздуха остается неизменным и равным $153 \text{ кг}/\text{с}$.

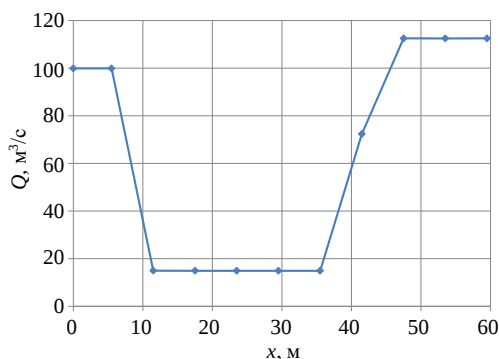


Рис. 8. Изменение объемного расхода воздуха вдоль тамбура

Fig. 8. Variation of the volumetric air flow rate along the tambour

На рис. 9, а–с показаны распределения температуры в характерных сечениях расчетной области: выход из тамбура, выход из портала, крайнее сечение тоннеля. Видно, что на выходе из тамбура перепад температуры по высоте достаточно велик и составляет 15°C (см. рис. 9, а). Вблизи пола тамбура температура может достигать -14°C , а вверху под крышей 1°C . Среднее значение температуры в этом сечении равно -13°C . После прохождения портала средняя температура воздуха повышается и достигает 0.7°C на выходе из портала, при этом перепад температур по высоте уменьшается и достигает 4°C (см. рис. 9, б). После прохождения 70 м участка транспортного тоннеля средняя температура воздуха немного повышается за счет обогрева о стенки тоннеля и достигает значения 1.0°C , при этом достигается еще большее выравнивание поля температуры по сечению (см. рис. 9, с).

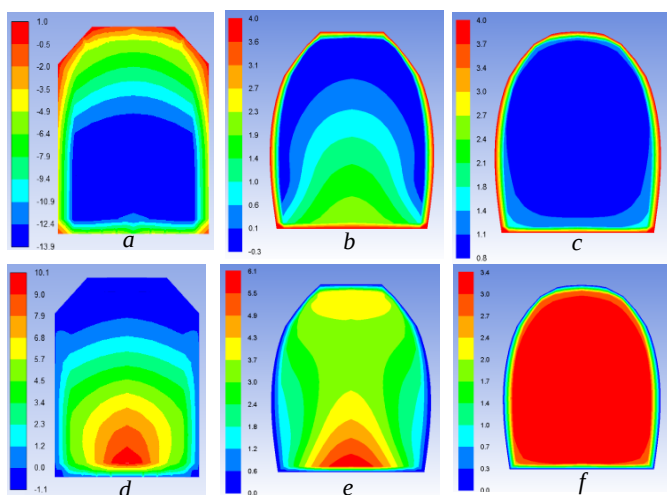


Рис. 9. Распределение параметров в характерных сечениях:
 а – выход из тамбура, б – выход из портала, с – сечение тоннеля;
 а, б, с – температура; d, e, f – продольная скорость;

Fig. 9. Distribution of parameters in the characteristic sections:
 (a) exit from the tambour, (b) exit from the portal, (c) section of the tunnel;
 (a), (b), (c) temperature; (d), (e), (f) longitudinal velocity

На рис. 9 d–f показаны распределения продольной скорости в характерных сечениях расчетной области: выход из тамбура, выход из портала, крайнее сечение тоннеля. Поле продольной скорости в выходном сечении тамбура характеризуется большими градиентами. Скорость воздуха в нижней части сечения достигает 9–10 м/с, в средней части имеет умеренные значения от 2 до 3 м/с, тогда как в верхней части воздух движется в противоположную сторону, его скорость отрицательна и равна –1 м/с (см. рис. 9, d). На выходе из портала скорость воздуха во всем сечении имеет положительные значения. В нижней части сечения значение продольной скорости повышено и достигает 6 м/с, тогда как в остальной части равна 2–4 м/с (см. рис. 9, e). После прохождения 70 м тоннеля распределение продольной скорости выравнивается и ее значение становится равным 3.4 м/с (см. рис. 9, f).

Тепловое состояние тамбура для ТВУ, работающих в реверсивном режиме

На рис. 10, а показано поле температуры воздуха в поперечных сечениях тамбура, расположенных через каждые 6 м, в центральном вертикальном продольном сечении и в плоскости, соответствующей полу тамбура. На рис. 10, б показано поле температуры воздуха в центральном вертикальном продольном сечении.

Видно, что при параллельной организации работы ТВУ в реверсивном режиме, в отличие от прямого режима, холодный воздух проникает в тамбур по всей его высоте только до места расположения проемов для выброса нагретого воздуха в ТВУ, которые находятся на расстоянии 10.5 м от входа в тамбур. Здесь холодный воздух смешивается с нагретым воздухом из ТВУ, и далее отепленный воздух движется в сторону расположения проемов для забора воздуха и далее в сторону портала.

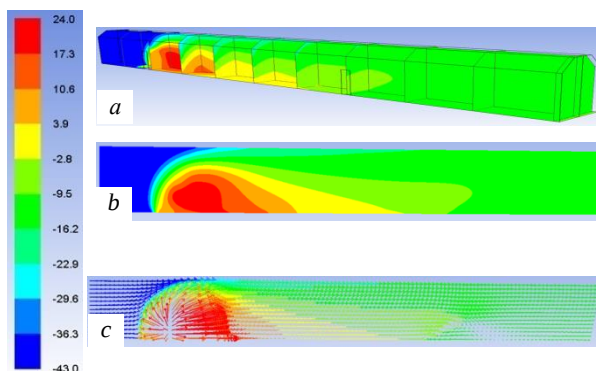


Рис. 10. Распределение параметров в тамбуре при работе ТВУ в реверсивном режиме:
 а – поле температур в тамбуре; б, с – поле температур и векторов скоростей
 соответственно в центральном вертикальном продольном сечении

Fig. 10. Distribution of parameters in the tambour when the HVU operates in reverse mode:
 (a) temperature field in the tambour; (b), (c) fields of temperature and velocity vectors,
 respectively, in the central vertical longitudinal section

Поле векторов скоростей воздуха в центральном вертикальном продольном сечении показано на рис. 10, с. Цветовая палитра векторов скоростей соответствует температуре воздуха. Здесь, в отличие прямого режима работы ТВУ, между проемами для выброса воздуха из ТВУ и забора воздуха в ТВУ циркуляционной зоны не образуется. Имеется небольшая вихревая зона вблизи проема для забора воздуха в ТВУ, после которой воздух движется практически параллельно полу тамбура с постоянной температурой около -14°C .

На рис. 11 показано распределение среднемассовой температуры воздуха вдоль тамбура, вычисленной в поперечных сечениях, приведенных на рис. 10, а. Повышение температуры происходит одноступенчато с -43 до -7°C за счет выброса нагретого воздуха из ТВУ.

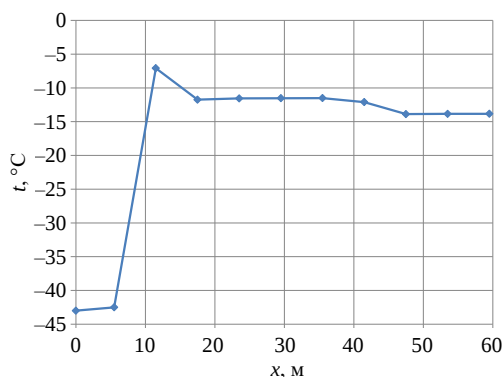


Рис. 11. Изменение среднемассовой температуры вдоль тамбура

Fig. 11. Variation of the mass-average temperature along the tambour

Далее температура снижается на 5°C из-за перемешивания с холодным воздухом и остается постоянной до точки забора воздуха в ТВУ, после чего происходит

понижение температуры воздуха на 3°C . К выходу из тамбура в портал значение температуры достигает -13°C .

На рис. 12 приведены поля продольной скорости в горизонтальных сечениях, расположенных на высотах от 1 до 5 м, с шагом 1 м, над уровнем пола. Здесь, как и для прямого режима работы ТВУ, можно выделить три основных участка: начальный участок (от входа в тамбур до проема для выброса воздуха из ТВУ), скорость движения воздуха на котором около 2–3 м/с; промежуточный участок (участок между проемами для выброса воздуха из ТВУ и для забора воздуха в ТВУ), скорость движения воздуха на котором изменяется от 2 до 15 м/с в зависимости от высоты горизонта; участок (от проема для забора воздуха в ТВУ до входа в портал), скорость движения воздуха на котором находится в пределах от –3 до 3 м/с.

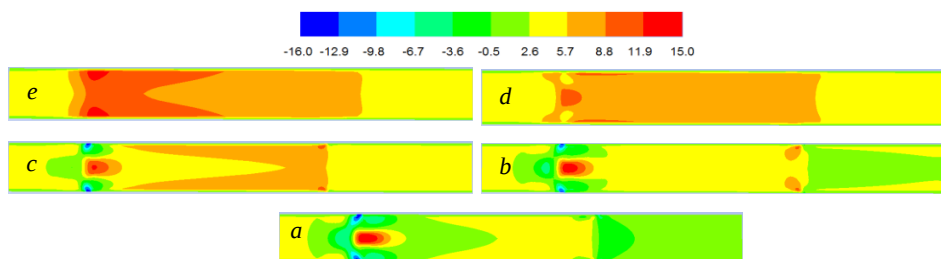


Рис. 12. Распределение продольной скорости на горизонтальных плоскостях тамбура:

$a - y = 1$ м, $b - 2$ м, $c - 3$ м, $d - 4$ м, $e - 5$ м

Fig. 12. Longitudinal velocity distribution on the horizontal planes of the tambour:

$y = (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4$, and $(e) 5$ m

На рис. 13 приведены поля продольной скорости в центральном вертикальном продольном сечении.

Видно, что на всех горизонтах на уровне места выброса воздуха из ТВУ в центральной части тамбура формируется зона с высоким значением продольной скорости, до 11–15 м/с. За этой зоной скорость воздуха понижается с уменьшением высоты. На границе первого участка и второго, на высотах от 1 до 3 м, имеют место области, где воздух движется навстречу основному потоку (струйный характер течения (синий цвет на рис. 10, $a-c$)) и скорость достигает 16 м/с.

На горизонте 1 м в окрестности точки забора воздуха в ТВУ формируется зона с отрицательным значением продольной скорости до –16 м/с, после которой на всех горизонтах воздух движется в сторону портала со скоростью 2–3 м/с.



Рис. 13. Распределение продольной скорости в центральном вертикальном продольном сечении тамбура

Fig. 13. Longitudinal velocity distribution in the central vertical longitudinal section of the tambour

На рис. 14 показана зависимость объемного расхода воздуха в разных поперечных сечениях тамбура от местоположения этих сечений. На входе в тамбур объемный расход составляет $100 \text{ м}^3/\text{с}$. После прохождения проемов для выброса

воздуха из ТВУ объемный расход в тамбуре возрастает до $206.4 \text{ м}^3/\text{с}$ и остается неизменным вплоть до проема, служащего для забора подогретого воздуха в ТВУ, после чего на участке длиной 12 м его значение монотонно понижается и достигает величины $112.5 \text{ м}^3/\text{с}$. Увеличение объемного расхода воздуха на выходе из тамбура по сравнению с объемным расходом на входе в тамбур объясняется повышением температуры воздуха за счет ТВУ, при этом массовый расход воздуха остается неизменным и равным $153 \text{ кг}/\text{с}$.

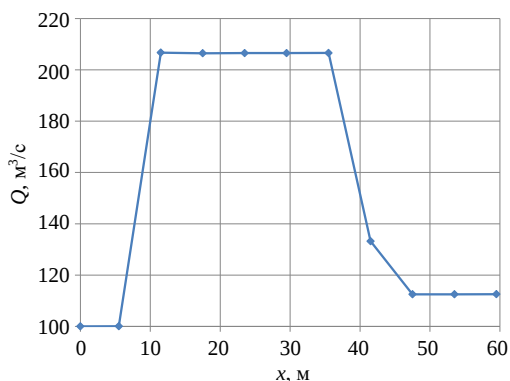


Рис. 14. Изменение объемного расхода воздуха вдоль тамбура
Fig. 14. Variation of the volumetric air flow rate along the tambour

На рис. 15, а–с показаны распределения температуры в характерных сечениях расчетной области: выход из тамбура, выход из портала, крайнее сечение тоннеля. Видно, что на выходе из тамбура перепад температуры по высоте небольшой и составляет 3°C (см. рис. 15, а). Вблизи пола тамбура температура достигает -13°C , а вверху под крышей -15°C . Среднее значение температуры в этом сечении равно -13.8°C . Незначительный перепад температуры по высоте объясняется лучшими условиями перемешивания холодного и нагретого воздуха по сравнению со схемой обогрева 1, поскольку место перемешивания находится дальше от входа в портал на 30 м.

После прохождения портала средняя температура воздуха повышается и достигает 0°C на выходе из портала, при этом перепад температур по высоте увеличивается за счет работы ТВУ в портале и достигает 4.6°C (см. рис. 15, б). После прохождения 70 м участка транспортного тоннеля средняя температура воздуха немного повышается за счет обогрева о стенки тоннеля и достигает значения 0.6°C , при этом перепад температур не превышает 1.5°C (см. рис. 15, в).

Распределения продольной скорости в характерных сечениях расчетной области показаны на рис. 15, d–f: выход из тамбура, выход из портала, крайнее сечение тоннеля. Поле продольной скорости в выходном сечении тамбура характеризуется умеренными градиентами. Воздух в каждой точке сечения движется в сторону портала. Обратное течение, что имело место для схемы 1, отсутствует. Скорость воздуха в нижней части сечения равна $1\text{--}2 \text{ м}/\text{с}$, в средней части имеет умеренные значения от 3 до $4 \text{ м}/\text{с}$, тогда как в верхней части скорость движения воздуха достигает $4.8 \text{ м}/\text{с}$ (см. рис. 15, d). На выходе из портала скорость во всем сечении имеет положительные значения.

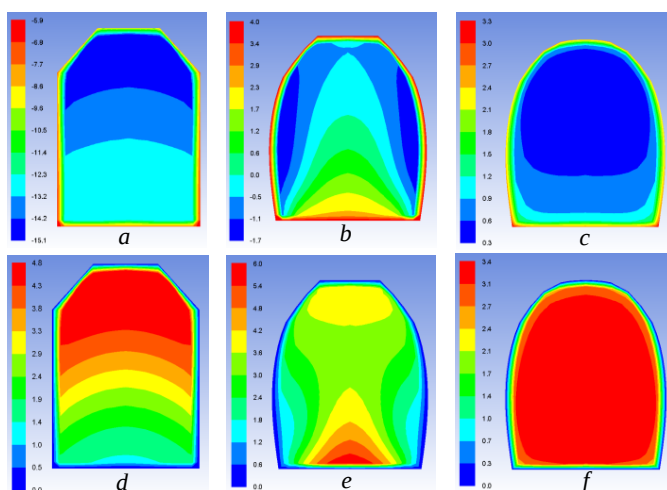


Рис. 15. Распределение параметров в характерных сечениях:

a – выход из тамбура, *b* – выход из портала, *c* – сечение тоннеля;

a, b, c – температура; *d, e, f* – продольная скорость

Fig. 15. Distribution of parameters in the characteristic sections:

(a) exit from the tambour, *(b)* exit from the portal, *(c)* section of the tunnel;

(a), (b), (c) temperatures; *(d), (e), (f)* longitudinal velocity

В нижней части сечения значение продольной скорости повышено и достигает 6 м/с, тогда как в остальной части равна 2–4 м/с (см. рис. 15, *e*). После прохождения 70 м тоннеля распределение продольной скорости выравнивается и ее значение становится равным 3.4 м/с (рис. 15, *f*).

Заключение

1. Схема обогрева 1 с прямым режимом работы ТВУ в тамбуре не позволяет обеспечить равномерное движение воздуха по высоте проема порталных ворот, при этом около пола продольная скорость достигает 10 м/с, а вверху ворот формируется возвратная зона течения с отрицательной продольной скоростью от –1 до –2 м/с. В случае реализации схемы 1 перепад температур по высоте ворот достигает 15°C, причем зона холодного воздуха может находиться вблизи пола.

2. Схема обогрева 2 с реверсивным режимом работы ТВУ в тамбуре обеспечивает относительно равномерное движение воздуха по высоте проема порталных ворот, причем значение продольной скорости увеличивается от 1 до 5 м/с по мере подъема от пола вверх. Схема обогрева 2 обеспечивают равномерное распределение температуры в сечении порталных ворот с перепадом температур 3°C.

3. При реверсивной схеме 2 обогрева тамбура средняя температура на входе в портал составляет –13.8°C, а для прямой схемы обогрева 1 эта температура равна –13°C.

4. В случае реверсивной схемы 2 обогрева тамбура холодный наружный воздух проникает не более чем на 10–15 м вглубь тамбура по всей его высоте, тогда как для прямой схемы 1 обогрева воздух может проникать вглубь до 30 м и более.

Список источников

1. Zhou X., Zeng Y., Fan L. Temperature field analysis of a cold-region railway tunnel considering mechanical and train-induced ventilation effects // *Applied Thermal Engineering*. 2016. V. 100. P. 114–124. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.070
2. Zeng Y., Liu K., Zhou X., Fan L. Tunnel temperature fields analysis under the couple effect of convection-conduction in cold regions // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 120. P. 378–392. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.143
3. Liu C., Li P., Wang X., Yu H., Lyu M., Wu H., Guo Z. Thermal environment analysis for the deep-buried TBM construction tunnel considering the influences of surrounding rock heat transfer and ventilation system // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024. V. 48. Art. 102406. doi: 10.1016/j.tsep.2024.102406
4. Tao Y., Hu H., Zhang H., Zhang G., Hao Z., Wang L. A new ventilation system for extra-long railway tunnel construction by using the air cabin relay: A case study on optimization of air cabin parameters length // *Journal of Building Engineering*. 2022. V. 45. Art. 103480. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103480
5. Гендлер С.Г., Савенков Е.А. Использование струйных вентиляторов для проветривания железнодорожных тоннелей // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № S7. С. 26–31.
6. Zeng Y., Tao L., Ye X., Zhou X., Fang Y., Fan L., Liu X., Yang Z. Temperature reduction for extra-long railway tunnel with high geotemperature by longitudinal ventilation // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. V. 99. Art. 103381. doi: 10.1016/j.tust.2020.103381
7. Zhang G., Jiang Z., Wang H., Jing X., Si M., Zeng F., Yang B., Yang X., Feng R. The coupled cooling effect of ventilation and spray in the deep-buried high-temperature tunnel // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. V. 45. Art. 103011. doi: 10.1016/j.csite.2023.103011
8. Niu J., Sui Y., Yu Q., Cao X., Yuan Y. Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research // *Energy and Built Environment*. 2020. V. 1 (4). P. 351–375. doi: 10.1016/j.enbenv.2020.03.003
9. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Alferova E.L. Air distribution in long transportation tunnels of the Baikal Amur Mainline (BAM) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 523. Art. 012011. doi: 10.1088/1755-1315/523/1/012011
10. Красюк А.М., Лугин И.В., Алферова Е.Л. Исследование воздухораспределения в протяженных транспортных тоннелях БАМ // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019. Т. 2, № 4. С. 114–121. doi: 10.33764/2618-981X-2019-2-4-114-121
11. Лугин И.В., Алферова Е.Л. Теплотери при движении поезда по подземному тоннелю при различных условиях эксплуатации // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2019. Т. 6, № 2. С. 181–185. doi: 10.15372/FPVGN2019060231
12. Гендлер С.Г., Белов М.Р. Основные направления модернизации тепловентиляционной системы Северомуйского тоннеля при увеличении размера движения подвижного состава // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № S6. С. 45–57. doi: 10.25018/0236-1493-2019-4-6-45-57
13. Кияница Л.А., Лугин И.В., Красюк А.М. Исследование тепловых режимов протяженных железнодорожных горных тоннелей в холодный период года // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021. Т. 57, № 1. С. 169–188. doi: 10.15372/FTPRPI20210116
14. Гендлер С.Г., Синявина С.В. Методика определения параметров системы подогрева воздуха в железнодорожных тоннелях, расположенных в суровых климатических условиях // *Записки Горного института*. 2017. Т. 224. С. 215–222. doi: 10.18454/PMI.2017.2.215
15. Кияница Л.А., Лугин И.В., Красюк А.М. Пути обеспечения температурных режимов протяженных транспортных тоннелей БАМ в холодный период года // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2020. Т. 7, № 1. С. 298–303. doi: 10.15372/FPVGN2020070147

16. Гендлер С.Г., Синявина С.В. Особенности управления вентиляционным режимом нового Байкальского железнодорожного тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 11. С. 173–179.
17. Гендлер С.Г., Смирняков В.А., Терентьев Р.П. Повышение эффективности обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожных тоннелей в суровых климатических условиях // Записки Горного института. 2001. Т. 147. С. 86–94.
18. Kiyantsa L.A., Lugin I.V., Krasnyk A.M. Means of providing temperature regimes for extended transport tunnels of the Baikal-Amur Railway in the cold period of the year // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 991. Art. 012033. doi: 10.1088/1755-1315/991/1/012033
19. Гендлер С.Г. Проблемы проветривания транспортных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № S2. С. 282–295.
20. Куликова О.А., Лугин И.В. Исследование интенсивности процесса теплообмена при движении поезда по протяженному железнодорожному тоннелю в холодный период года // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 2, № 2. С. 85–88.
21. Lugin I.V. Mathematical modeling of air distribution dynamics due to piston effect of trains in long railway tunnels // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 991. Art. 012034. doi: 10.1088/1755-1315/991/1/012034
22. Shih T.-H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A New Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows // Computers Fluids. 1995. V. 24 (3). P. 227–238. doi: 10.1016/0045-7930(94)00032-T

References

1. Zhou X., Zeng Y., Fan L. (2016) Temperature field analysis of a cold-region railway tunnel considering mechanical and train-induced ventilation effects. *Applied Thermal Engineering*. 100. pp. 114–124. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.070
2. Zeng Y., Liu K., Zhou X., Fan L. (2017) Tunnel temperature fields analysis under the couple effect of convection-conduction in cold regions. *Applied Thermal Engineering*. 120. pp. 378–392. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.143
3. Liu C., Li P., Wang X., Yu H., Lyu M., Wu H., Guo Z. (2024) Thermal environment analysis for the deep-buried TBM construction tunnel considering the influences of surrounding rock heat transfer and ventilation system. *Thermal Science and Engineering Progress*. 48. Article 102406. doi: 10.1016/j.tsep.2024.102406
4. Tao Y., Hu H., Zhang H., Zhang G., Hao Z., Wang L. (2022) A new ventilation system for extra-long railway tunnel construction by using the air cabin relay: A case study on optimization of air cabin parameters length. *Journal of Building Engineering*. 45. Article 103480. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103480
5. Gendler S.G., Savenkov E.A. (2015) Ispl'zovanie struynykh ventilyatorov dlya provetrivaniya zhelezнодорожных tonneley [Usage pattern of jet fans for ventilation of railway tunnels]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) – Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. S7. pp. 26–31.
6. Zeng Y., Tao L., Ye X., Zhou X., Fang Y., Fan L., Liu X., Yang Z. (2020) Temperature reduction for extra-long railway tunnel with high geotemperature by longitudinal ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 99. Article 103381. doi: 10.1016/j.tust.2020.103381
7. Zhang G., Jiang Z., Wang H., Jing X., Si M., Zeng F., Yang B., Yang X., Feng R. (2023) The coupled cooling effect of ventilation and spray in the deep-buried high-temperature tunnel. *Case Studies in Thermal Engineering*. 45. Article 103011. doi: 10.1016/j.csite.2023.103011
8. Niu J., Sui Y., Yu Q., Cao X., Yuan Y. (2020) Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research. *Energy and Built Environment*. 1(4). pp. 351–375. doi: 10.1016/j.enbenv.2020.03.003

9. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Alferova E.L. (2020) Air distribution in long transportation tunnels of the Baikal Amur Mainline (BAM). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 523. Article 012011. doi: 10.1088/1755-1315/523/1/012011
10. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Alferova E.L. (2019) Issledovanie vozdukhoraspredeleniya v protyazhennykh transportnykh tonnellyakh BAM [Study of air distribution at elongated transport tunnels of Baikal-Amur mainline]. *Interexpo Geo-Sibir*. 2(4). pp. 114–121. doi: 10.33764/2618-981X-2019-2-4-114-121
11. Lugin I.V., Alferova E.L. (2019) Teplopoteri pri dvizhenii poezda po podzemnomu tonnelu pri razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii [Heat losses during train movement in an underground tunnel under various operating conditions]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk – Fundamental and Applied Issues of Mining*. 6(2). pp. 181–185. doi: 10.15372/FPVGN2019060231
12. Gendler S.G., Belov M.R. (2019) Osnovnye napravleniya modernizatsii teploventilyatsionnoy sistemy Severomuyskogo tonnela pri uvelichenii dvizheniya podvizhnogo sostava [Main directions of upgrading Severomuysky railway tunnel ventilation when there is an increase of the amount of traffic of the rolling stock]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. S6. pp. 45–57. doi: 10.25018/0236-1493-2019-4-6-45-57
13. Kiyanita L.A., Lugin I.V., Krasnyuk A.M. (2021) The analysis of thermal conditions in extra-long railway tunnels during the cold season. *Journal of Mining Science*. 57(1). pp. 154–170. doi: 10.1134/S1062739121010166
14. Gendler S.G., Sinyavina S.V. (2017) Method of determining characteristics for air heating system in railway tunnels in harsh climatic conditions. *Journal of Mining Institute*. 224. pp. 215–222. doi: 10.18454/PMI.2017.2.215
15. Kiyanita L.A., Lugin I.V., Krasnyuk A.M. (2020) Puti obespecheniya temperaturnykh rezhimov protyazhennykh transportnykh tonney BAM v kholodnyy period goda [Means of providing temperature regimes for extended transport tunnels of the Baikal-Amur railway in the cold period of the year]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk – Fundamental and Applied Issues of Mining*. 7(1). pp. 298–303. doi: 10.15372/FPVGN2020070147
16. Gendler S.G., Sinyavina S.V. (2015) Osobennosti upravleniya ventilyatsionnym rezhimom novogo Baykal'skogo zheleznodorozhnogo tonnela [Features of control of the new Baykalsk railway tunnel ventilating mode]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) – Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 11. pp.173–179.
17. Gendler S.G., Smirnyakov V.V., Terent'ev R.P. (2001) Povyshenie effektivnosti obespecheniya bezopasnoy ekspluatatsii zheleznodorozhnykh tonney v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [Improving the efficiency of safe operation of railway tunnels in severe climatic conditions]. *Zapiski gornogo instituta – Journal of Mining Institute*. 147. pp. 86–94.
18. Kiyanita L.A., Lugin I.V., Krasnyuk A.M. (2022) Means of providing temperature regimes for extended transport tunnels of the Baikal-Amur Railway in the cold period of the year. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 991. Article 012033. doi: 10.1088/1755-1315/991/1/012033
19. Gendler S.G. (2005) Problemy provetrivaniya transportnykh tonney [Ventilation problems in transport tunnels]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' – Mining Information Analytical Bulletin*. S2. pp. 282–295.
20. Kulikova O.A., Lugin I.V. (2017) Issledovanie intensivnosti protsessa teploobmena pri dvizhenii poezda po protyazhennomu tonnelu v kholodnyy period goda [Investigation into heat exchange intensity in freight train motion at a long-extended railway tunnel in cold season period]. *Interexpo Geo-Sibir*. 2(2). pp. 85–88.
21. Lugin I.V. (2022) Mathematical modeling of air distribution dynamics due to piston effect of trains in long railway tunnels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 991. Article 012034. doi: 10.1088/1755-1315/991/1/012034

22. Shih T.-H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. (1995) A new eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers Fluids*. 24(3). pp. 227–238. doi: 10.1016/0045-7930(94)00032-T

Сведения об авторах:

Оберемок Андрей Александрович – аспирант кафедры математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: oberemokaa@minesoft.ru

Крайнов Алексей Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Миньков Леонид Леонидович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: lminkov@ftf.tsu.ru

Information about the authors:

Oberemok Andrey A. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: oberemok@minesoft.ru

Krainov Aleksey Yu. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Min'kov Leonid L. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lminkov@ftf.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 22.04.2024; принята к публикации 07.02.2025

The article was submitted 22.04.2024; accepted for publication 07.02.2025