



**ПУТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПРОТЯЖЕННЫХ  
ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ БАМ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА**

**Л. А. Кияница, И. В. Лугин, А. М. Красюк**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: lavrentij.kijanitz@yandex.ru, ivlugin@misd.ru, krasuk@cn.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

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 припортальных воздушно-тепловых завес. Это позволяет обеспечить положительную температуру воздуха на всех участках по длине тоннеля.

*Железнодорожный тоннель, вентиляция, теплообмен, распределение температур, тепловентиляционная установка*

**MEANS OF PROVIDING TEMPERATURE REGIMES FOR EXTENDED TRANSPORT TUNNELS  
OF THE BAIKAL-AMUR RAILWAY IN THE COLD PERIOD OF THE YEAR**

**L. A. Kiyantsa, I. V. Lugin, and A. M. Krasuk**

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

The paper presents the results of studying the distribution of air temperature along the length of an extended railway tunnel depending on various configurations and locations of tunnel heating and ventilation units. It is shown that the most rational way is the uniform arrangement of heating and ventilation units along the length of the tunnel combined with the installation of air-thermal curtains. This allows ensuring a positive air temperature in all sections along the length of the tunnel.

*Railway tunnel, ventilation, heat exchange, temperature distribution, heating and ventilation unit*

Обеспечение безаварийной работы протяженных железнодорожных тоннелей — основная задача для поддержания стабильности и постоянного потока грузоперевозок. Большое внимание уделяется тоннелям Байкало-Амурской магистрали, которые эксплуатируются в условиях экстремально низких температур. Система вентиляции и отопления таких тоннелей является одним из элементов обеспечения безопасности (аварийные режимы проветривания) и поддержания приемлемых микроклиматических условий (штатные режимы проветривания) [1], особенно в холодный период года, когда появляется наледообразование на внутренней поверхности обделки тоннеля [2], вызванное постоянным притоком грунтовых вод и их замерзанием на этой поверхности. При этом приток грунтовых вод дополнительно несет радиационное загрязнение [3].

В работах [4–14], посвященных штатным и аварийным вентиляционным режимам протяженных транспортных тоннелей и анализу поршневого эффекта от движущихся поездов тепловые процессы в тоннеле исследованы недостаточно. В [15] определены теплопотери на нагрев стенки поезда для различных начальных температур поезда при его движении по тоннелю, причем рас-

считается только температура стенки поезда без учета температуры воздуха в тоннеле. В [16] обоснованы месторасположения и возможность использования турбореактивных конвертированных авиационных двигателей в качестве тепловентиляционной установки [17, 18], но закономерности изменения температуры воздуха по длине тоннеля остаются не до конца изученными.

Цель работы — исследование температурного режима протяженного транспортного железнодорожного тоннеля в зависимости от мест расположения тепловентиляционных установок для обоснования мер обеспечения требуемых температурных режимов протяженных транспортных тоннелей БАМ в холодный период года, которое позволит прогнозировать области как с отрицательной температурой воздуха в тоннеле, так и со значительным перегревом.

**Расчетная модель и методы исследования.** Протяженные транспортные тоннели БАМ оборудованы воротами на обоих порталах. Практика показывает, что при высокой частоте движения поездов хотя бы одни ворота из двух всегда открыты. В связи с этим к расчету примем тоннель с одними закрытыми и одними открытыми воротами. Моделирование проводилось на примере наиболее протяженного Северомуйского тоннеля, для которого степень перекрытия тоннеля поездом составляла 0.27, протяженность тоннеля — 15357 м, частота движения — 6 пар/ч (интервал движения 10 мин), скорость поезда — 75 км/ч, составы грузовые — 71 вагон.

Методика расчета температур воздуха в тоннеле предполагает разбиение тоннеля на некоторое количество участков и определение исследуемой величины на их границах. Расчетная схема  $N$ -го участка тоннеля приведена на рис. 1.

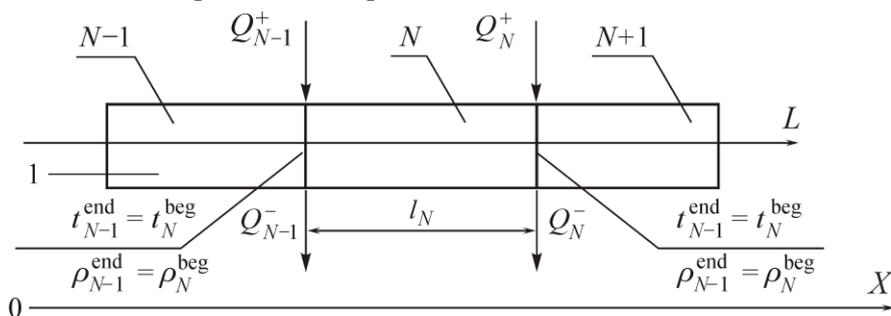


Рис. 1. Расчетная схема  $N$ -го участка тоннеля:  $N-1, N, N+1$  — номера участков;  $L$  — расход воздуха в тоннеле,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $t^{\text{beg}}, t^{\text{end}}$  — начальная и конечная температура участка,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho^{\text{beg}}, \rho^{\text{end}}$  — конечная и начальная плотность воздуха на участке,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $l_N$  — длина участка, м;  $Q^+, Q^-$  — среднечасовые тепlopоступления (от тепловентиляционных установок) и тепlopотери (от холодной стенки поезда, на нагрев воздуха у входного и выходного порталов), Вт. Ось  $OX$  показывает направление пошагового расчета

Среднечасовая температура воздуха в конце участка тоннеля вычисляется по формуле:

$$t_N^{\text{end}} = t_N^{\text{beg}} + \frac{Q^{N,+} - Q^{N,-}}{c \rho_N L}, \quad (1)$$

где  $t_N^{\text{beg}}$  — начальная температура воздуха на участке  $N$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Q^{N,+}, Q^{N,-}$  — тепlopоступления и тепlopотери на участке  $N$ , Вт, определены в [15];  $c = 1005$  — теплоемкость воздуха,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\rho_N$  — средняя плотность воздуха на участке,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $L$  — расход воздуха через тоннель,  $\text{м}^3/\text{с}$  постоянен для всех участков тоннеля, для тоннеля с открытыми и закрывающимися воротами определен в [8].

Приняты следующие допущения: равномерно распределенные тепlopотери по длине участка суммируются и приводятся концу участка; при определении средней плотности воздуха на участке  $N$  используются температуры воздуха, полученные на участке  $N-1$  и тепlopотраты на нагрев стенки поезда, рассчитанные в [15], уточняются при помощи зависимости

$$Q_{n,\phi}^{N,-} = Q_n^{N,-} \cdot \frac{t_{n,N}^{\text{beg}} - t_N^{\text{beg}}}{\Delta t_0}, \quad (2)$$

где  $\Delta t_0$  — температурный напор между стенкой поезда и тоннельным воздухом, °С, для которого найдены значения  $Q_n^{N-}$  [6]. Значение  $t_{n,N}^{\text{beg}}$  определяется по формуле:

$$t_{n,N}^{\text{beg}} = t_{n,N-1}^{\text{end}} = t_{n,N-1}^{\text{beg}} + \varphi \frac{(t_{n,N-1}^{\text{beg}} - t_{N-1}^{\text{end}}) l_N}{v_n}, \quad (3)$$

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

Конечная температура воздуха  $t_N^{\text{end}}$  на участке  $N$  является начальной температурой воздуха  $t_{N+1}^{\text{beg}}$  на участке  $N+1$ . Начальная температура для первого участка у входного портала принимается равной наружной температуре  $t_j^{\text{beg}} = -40^\circ \text{C}$ . Расчет ведется последовательно от одного участка к другому в направлении движения поезда по тоннелю при различном расположении и количестве тепловентиляционных установок.

На рис. 2 представлены зависимости изменения температуры внутреннего воздуха  $t_N^{\text{end}}$  по длине тоннеля: схема 1 — расположение воздушно-тепловых завес у порталов, их действие совмещено с продольной поперечной схемой тепловентиляции в тоннеле и распределенной подачей нагретого воздуха для восполнения теплопотерь на нагрев стенки; схема 2 — расположение тепловентиляционной установки (ТВУ) у входного и выходного порталов, по длине тоннеля они отсутствуют; схема 3 — рассредоточенное (на значительное расстояние) распределение тепловой мощности ТВУ по длине тоннеля с равным шагом. Для всех трех схем принята одинаковая суммарная тепловая мощность ТВУ, равная 13.095 МВт, которая по абсолютной величине равна теплопотерям в тоннеле (в тоннеле достигнут тепловой баланс).

Из рис. 2а видно, что использование припортальных воздушно-тепловых завес совместно с продольно-поперечной схемой тепловентиляции для восполнения теплонедостатков в тоннеле позволяет обеспечить относительно равномерный прогрев воздуха по длине тоннеля, что является гарантией отсутствия зон обледенения и морозного разрушения тоннельной обделки. Расположение всей требуемой для обогрева тепловой мощности у порталов тоннеля нерационально, так как в этом случае наблюдается значительная неравномерность температуры воздуха по длине тоннеля. У порталов происходит перегрев тоннельного воздуха до  $+55^\circ \text{C}$  и более (рис. 2б). Рассредоточенное расположение ТВУ со значительным по величине шагом не обеспечивает поддержание положительных температур воздуха на припортальных участках (рис. 2в).

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

$$K = K_1 |K_2|. \quad (4)$$

Составляющие формулы (4) находятся следующим образом:

$$K_1 = \begin{cases} -1, & \text{если } t_{\text{int}}^{\text{min}} < 0, \\ +1, & \text{если } t_{\text{int}}^{\text{min}} \geq 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{1}{L t_{\text{int}}^{\text{dem}}} \sum_{i=1}^N l_N t_{\text{int}}^N, \quad (6)$$

где  $t_{\text{int}}^{\text{min}}$  — минимальная температура воздуха в тоннеле, °С;  $t_{\text{int}}^N$  — температура воздуха на расчетном участке, °С;  $t_{\text{int}}^{\text{dem}}$  — требуемая температура тоннельного воздуха ( $+4^\circ \text{C}$ ).

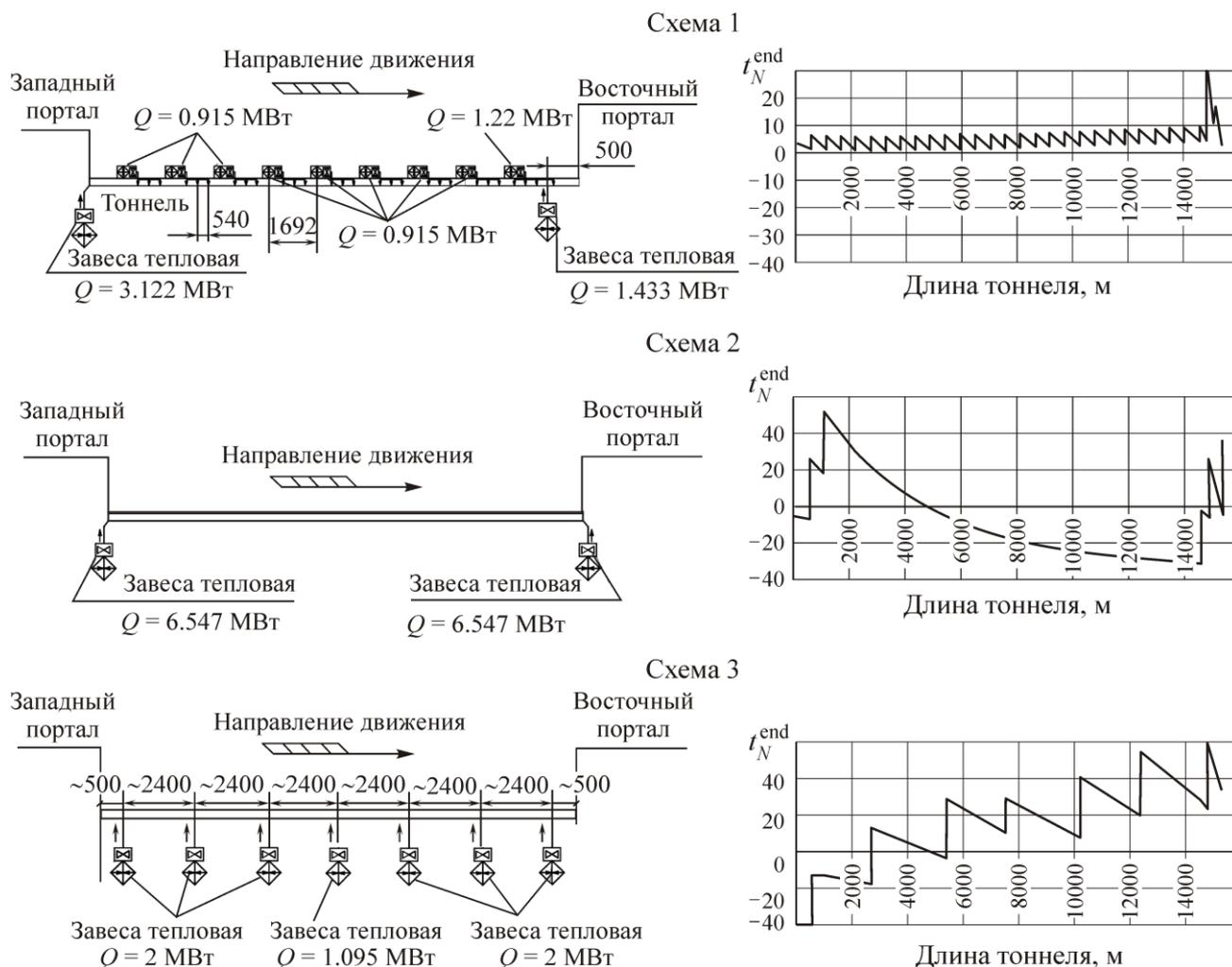


Рис. 2. Схемы расположения тепловентиляционных установок ТВУ в тоннеле и зависимости температуры внутреннего воздуха  $t_N^{\text{end}}$  по длине тоннеля

Коэффициент  $K_1$  показывает допустимость такой системы тепловентиляции. Если он имеет отрицательное значение, то система не в состоянии поддерживать положительную температуру воздуха в тоннеле и не может быть применена. Коэффициент  $K_2$  представляет отношение количества фактически затраченной энергии на подогрев воздуха в тоннеле к количеству энергии, необходимой для поддержания требуемой температуры тоннельного воздуха  $t_{\text{int}}^{\text{dem}}$ . В идеальном случае коэффициент  $K$  должен быть равен 1, что означает равенство фактической и требуемой температур воздуха в тоннеле и отсутствие перерасхода тепловой энергии на его обогрев. При  $K < 0$  эксплуатация такой системы тепловентиляции недопустима.

Коэффициенты для рассмотренных схем системы тепловентиляции тоннеля следующие: схема 1 —  $K_1 = 1$ ,  $K_2 = K = 1.24$ ; схема 2 —  $K_1 = -1$ ,  $K_2 = K = -1.8$ ; схема 3 —  $K_1 = -1$ ,  $K_2 = 3.69$ ,  $K_3 = -3.69$ . Наиболее близкий к 1 критерий имеет схема 1. Использование схем 2 и 3 недопустимо, так как они подразумевают наличие зон с температурой ниже  $0^\circ\text{C}$ ,  $K < 0$ .

## ВЫВОДЫ

В результате исследований распределения температуры воздуха в протяженных железнодорожных тоннелях разработана схема рационального размещения тепловентиляционного оборудования в тоннелях БАМ, даны практические рекомендации по их расположению. Анализ зависимостей изменения среднечасовой температуры воздуха по длине тоннеля для различных

схем ТВУ показывает, что наиболее эффективной схемой с точки зрения поддержания положительной температуры воздуха на всей протяженности тоннеля является схема с устройством воздушно-тепловых завес у порталов с продольно-поперечной схемой теплоventилиации в тоннеле. При использовании других схем образуются зоны как с перегретым выше необходимой температуры воздухом, так и с недогретым до положительной температуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Set of rules** 122.13330.2012. Tunnels railway and road, set of rules, Moscow, Ministry of Regional Development, 2012, 132 pp. [СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-2097: утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012: дата введ. 01.01.2013. — М.: [б.и.], 2012. — 132 с.]
2. **Lugin I. V. and Vitchenko A. A.** Maintaining the required temperature in the North Muisky tunnel during the cold season by means of tunnel ventilation, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 210–214. [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*. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2014. — Т. 1. — № 1. — С. 210–214].
3. **Gendler S. G.** The main directions of modernization of the ventilation system of the Baikal iron-road tunnel, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2013, no. 1, pp. 288–296. [Гендлер С. Г. Основные направления модернизации системы вентиляции Байкальского железнодорожного тоннеля // *ГИАБ*. — 2013. — № 1. — С. 288–296.]
4. **Lugin I. V. and Alferova E. L.** Features of air distribution and ventilation schemes of extended transport tunnels BAM, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 142–146. [Лугин И. В., Алферова Е. Л. Особенности воздухораспределения и схемы вентиляции протяженных транспортных тоннелей БАМ // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2017. — № 1. — Т. 4. — С. 142–146.]
5. **Lugin I. V. and Alferova E. L.** The study of aerodynamic processes during train movement in long railway tunnels, *Interexpo Geosibir*, 2018, vol. 5, pp. 155–160. [Лугин И. В., Алферова Е. Л. Исследование аэродинамических процессов при движении поезда в протяженных железнодорожных тоннелях // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. — Новосибирск, 2018. — Т. 5. — С. 155–160.]
6. **Gendler S. G., Castaneda V. N. and Belen A. G.** Management of natural ventilating streams in transport tunnels, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2012, no. 4, pp. 138–149. [Гендлер С. Г. Кастанеда В. Н., Белен А. Г. Управление естественными вентиляционными потоками в транспортных тоннелях // *ГИАБ*. — 2012. — № 4. — С. 138–149.]
7. **Gendler S. G., Smirnyakov V. V., and Sokolov V. A.** The first results of full-scale tests of the ventilation system of the Severomuisk railway tunnel, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2005, no. S2, pp. 272–281. [Гендлер С. Г., Смирняков В. В., Соколов В. А. Первые результаты натурных испытаний системы вентиляции Северомуйского железнодорожного тоннеля // *ГИАБ*. — 2005. — № S2. — С. 272–281.]
8. **Gendler S. G. and Mironenkova N. A.** The selection of rational ventilation schemes for railway tunnels located in severe climatic conditions, by the radiation factor, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2008, № S5, pp. 298–306. [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.]
9. **Gendler S. G. and Savenkov E. A.** The use of jet fans for ventilation of railway tunnels, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2015, no. S7, pp. 26–31. [Гендлер С. Г., Савенков Е. А. Использование струйных вентиляторов для проветривания железнодорожных тоннелей // *ГИАБ*. — 2015. — № S7. — С. 26–31].

10. **Gendler S. G. and Pleskunov V. A.** The choice of a rational ventilation scheme of the Kuznetsovsky railway tunnel, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2009, no. S13, pp. 81–89. [**Гендлер С. Г. Плескунов В. А.** Выбор рациональной схемы проветривания Кузнецовского железнодорожного тоннеля // ГИАБ. — 2009. — № S13. — С. 81–89.]
11. **Gendler S. G. and Savenkov E. A.** Features of ensuring aerodynamic safety of the construction and operation of underground transport structures, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2015, no. 4, separate issue 17, pp. 3–8. [**Гендлер С. Г., Савенков Е. А.** Особенности обеспечения аэродинамической безопасности сооружения и эксплуатации подземных сооружений транспортного назначения // ГИАБ. Спец. вып. 17. — 2015. — № 4. — С. 3–8.]
12. **Gendler S. G. and Savenkov E. A.** The technique of selecting the parameters of jet fans for ventilation of transport tunnels, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2015, no. 4, separate issue 17, pp. 9–14. [**Гендлер С. Г., Савенков Е. А.** Методика выбора параметров струйных вентиляторов для проветривания транспортных тоннелей // ГИАБ. — 2015. — № 4. — Спец. вып. 17. — С. 9–14.]
13. **Pat. 24471074 RF**, Ventilation system for the railway tunnel, Marongio Lucio, *Bull. of inventions*, 2012, no. 27. [**Пат. 24471074 РФ.** Система вентиляции для железнодорожного тоннеля / Л. Маронджу // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 27.]
14. **Pat. 24511184 RF**. A method of ventilating railroad tunnels through which diesel-powered vehicles are driven, S. G. Gendler, V. A. Pleskunov, *Bull. of inventions*, 2012, no. 14. [**Пат. 24511184 РФ.** Способ проветривания железнодорожных тоннелей, по которым осуществляется движение транспортных средств на дизельной тяге / С. Г. Гендлер, В. А. Плескунов // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 14.]
15. **Lugin I. V. and Alferova E. L.** Heat loss during train movement through an underground tunnel under various operating conditions, *Fundamental and applied issues of mining*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 181–185. [**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.]
16. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., and Kulikova O. A.** On the use of a dual-circuit turbojet engine to ensure the thermal regime of railway tunnels in harsh climatic conditions, *Mountain News and Analysis Bulletin*, 2018, no. 2, pp. 103–110. [**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.]
17. **Postnikov A. M.** Reducing nitrogen oxides in the exhaust gas of a gas turbine plant, Publishing House of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2002, 286 pp. [**Постников А. М.** Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. — Самара: СНЦ РАН, 2002. — 286 с.]
18. **Gritenko E. A., Danilchenko V. P., Lukachev S. V., Reznik V. E., and Tsybizov Yu. I.** Conversion of aircraft gas turbine engines to gas turbine installations of land application, House of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2004, pp. 266. [**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.]