



**ТЕПЛОПТЕРИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОЕЗДА ПО ПОДЗЕМНОМУ ТОННЕЛЮ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

И. В. Лугин, Е. Л. Алферова

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

Представлены результаты численного моделирования процесса теплообмена между поездом и тоннельным воздухом в холодный период года для тоннелей, эксплуатируемых в условиях резко континентального климата Сибири и Дальнего Востока. Моделирование проведено в нестационарной плоской осесимметричной постановке. Получены зависимости для составляющих теплового баланса транспортных тоннелей от температуры наружного воздуха и технологических режимов работы порталного оборудования тоннелей.

Железнодорожный тоннель, тоннельная вентиляция, метод конечных объемов, тепловой поток, теплопотери, наледообразование

**HEAT LOSSES DURING TRAIN MOVEMENT IN AN UNDERGROUND TUNNEL
UNDER VARIOUS OPERATING CONDITIONS**

I. V. Lugin and E. L. Alferova

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

The results of numerical simulation of heat exchange between a train and tunnel air in the cold season are presented for the tunnels operated in severely continental climate of Siberia and the Far East. The simulation was carried out in an unsteady plane axisymmetric formulation. The dependences for the heat balance components of transport tunnels on the outdoor temperature and portal equipment operating modes are obtained.

Railway tunnel, tunnel ventilation, finite volume method, heat flow, heat losses, aufeis formation

В протяженных железнодорожных тоннелях, эксплуатируемых в Сибири и на Дальнем Востоке, в холодный период года образуются наледи на внутренней обделке. К протяженным будем относить тоннели длиной более двух длин среднестатистического грузового состава, т. е. свыше 2 км. Наледообразование в них происходит при достаточно низких температурах атмосферного воздуха вследствие замерзания грунтовых вод, поступающих в тоннель через неплотности обделки. Для борьбы с переохлаждением, например, в пятнадцатикилометровом Северомуйском тоннеле порталы оборудованы воротами [1], открывающимися при проходе поездов и закрывающимися за ними, и воздушно-тепловыми завесами с суммарной тепловой мощностью около 3 МВт [2]. Оказалось, что этого недостаточно: при температуре атмосферного воздуха ниже -20°C количество образующегося льда, удаляемого и вывозимого из тоннеля за одну ремонтную смену, достигает 5 м^3 . Кроме того, из-за многократных циклов замерзания и оттаивания обделки увеличивается скорость морозного разрушения, что может привести к аварийной ситуации. Поэтому задача исследования теплопотерь из тоннеля как причины его переохлаждения является актуальной. Значения теплопотерь как на нагрев холодного поезда, так и на нагрев врывающегося в тоннель холодного атмосферного воздуха необходимы для определения требуемой мощности теплового оборудования вентиляционных систем.

При движении холодного поезда по тоннелю его обтекает теплый воздух. При движении по тоннелю с воротами скорость воздуха через зазор между поездом и стенкой тоннеля зависит от объемного расхода воздуха, выталкиваемого поездом в зазор, который направлен противоположно движению поезда и равен произведению скорости поезда на площадь его поперечного сечения. В случае открытого тоннеля такой расход наблюдается только в начальный момент времени при входе поезда в тоннель. Далее расход через зазор снижается и в тоннеле устанавливается попутный поезду поток воздуха, поскольку поезд поршневым действием разгоняет его в объеме тоннеля.

В ранее проведенных вычислительных экспериментах рассчитывались расходы воздуха через тоннель и через зазор между поездом и стенкой тоннеля для трех- и шестикилометрового тоннеля без ворот на порталах [3]. При этом решалась нестационарная задача с подвижным поездом и перестраиваемой сеточной областью в плоской осесимметричной постановке в модуле расчета аэродинамики Fluent Ansys [4]. Принимались исходные данные: эквивалентный внутренний диаметр тоннеля 8 м, эквивалентный диаметр поезда 3.5 м, скорость движения поезда 11.1 м/с, длина поезда 1 км, площадь миделева сечения поезда 9.62 м², площадь зазора 40.62 м². Эти усредненные данные получали из статистического анализа эксплуатационных характеристик тоннелей и поездов на железных дорогах Сибири и Дальнего Востока [5–9]. Для статистики рассматривались составы из грузовых вагонов, цистерн и полувагонов, а также тоннели БАМ: Северомуйский, Байкальский, Кузнецовский.

В случае тоннеля с воротами принято допущение, что ворота полностью закрывают порталы и весь объем воздуха, выталкиваемый поездом, проходит через зазор, поэтому во время равномерного движения поезда по тоннелю скорость воздуха в зазоре постоянна. Для исследования термодинамических процессов теплообмена между холодным поездом и тоннельным воздухом и определения переохлаждения тоннеля в холодный период года разработанная расчетная аэродинамическая модель [3] дополнена элементами, описывающими теплофизические свойства тоннельного воздуха, материалов конструкции поезда, перевозимого груза, обделки тоннеля и породного массива вокруг тоннеля. В качестве груза принят каменный уголь, материал конструкции вагона — сталь, материал обделки — бетон, породный массив, вмещающий тоннель, — гранит.

В проведенных ранее вычислительных экспериментах для тоннелей длиной до 6 км время расчета на кластере из 48 ядер Сибирского суперкомпьютерного центра при использовании Ansys Fluent 14.5 составило 46 сут. Для снижения затрат машинного времени и мощностей при моделировании полной длины тоннеля разработана аэротермодинамическая модель, которая не требует перестройки сетки при движении поезда и включает участок тоннеля длиной не более длины поезда. Для построения такой модели сделан переход от системы координат, связанной с неподвижной стенкой тоннеля, к системе координат, связанной с неподвижной стенкой поезда. Обтекание поезда задается скоростью движения воздуха в зазоре, движение поезда по тоннелю — обратным по направлению движением стенки тоннеля со скоростью, равной скорости поезда. На рис. 1а приведены эпюры осевых скоростей воздуха в зазоре при движении поезда в тоннеле длиной 6 км, полученные ранее и в доработанной модели с системой координат, связанной с неподвижным поездом. Место замера — середина поезда. Видно, что качественно и количественно эпюры совпадают, некоторое количественное различие обусловлено тем, что в доработанной модели рассматривается вариант при температуре наружного воздуха –20°С, поэтому воздух в зазоре около середины поезда уже охлажден, т. е. его объемная плотность больше и, соответственно, меньше объемный расход и скорость. Поскольку характер теплообмена между поездом и тоннельным воздухом осуществляется в основном путем вынужденной конвекции, тождество количественно-качественных условий обтекания поезда приводит к тождеству процессов теплообмена.

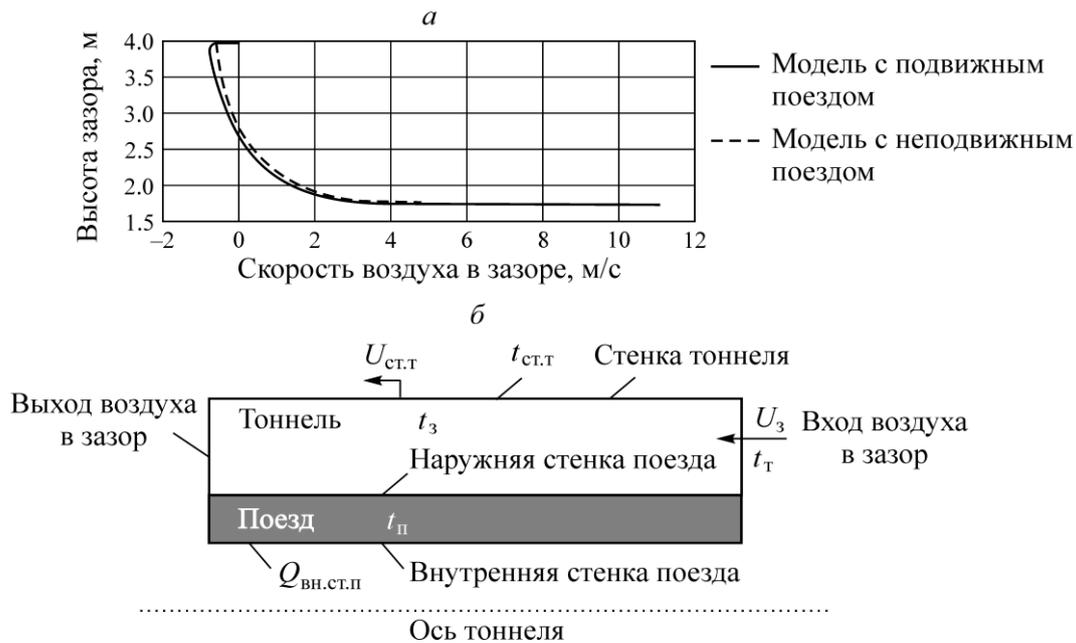


Рис. 1. Эпюры осевых скоростей воздуха в зазоре между поездом и тоннелем в середине поезда (а) и схема модели аэротермодинамических процессов обтекания поезда воздухом во время прохождения тоннеля (б); $t_{п}$ — начальная температура поезда, °С; t_3 — температура воздуха в зазоре, °С

Приведем полное описание доработанной модели. Как и в исследовании аэродинамики при движении поезда в тоннеле, задача решается в осесимметричной нестационарной постановке. Схема для расчета аэротермодинамических процессов показана на рис. 1б. Геометрически модель представляет собой продольный разрез участка тоннеля с поездом. Движение поезда происходит слева направо. Для снижения сеточного объема рассмотрен не весь вагон поезда, а его наружная часть толщиной 0.5 м груза (каменный уголь) и 0.005 м стенки вагона (сталь). Эта толщина заведомо превышает величину прогретой зоны вагона за время его движения по тоннелю длиной меньше 15 км, поэтому задано адиабатическое условие на границе внутренней стенки поезда $Q_{вн.ст.п} = 0$ Вт, где $Q_{вн.ст.п}$ — тепловой поток на внутренней стенке поезда (непрогретая зона). Начальная температура поезда (конструкции и груза) $t_{п}$ равна температуре наружного воздуха, поскольку при вхождении в тоннель поезд длительное время находится снаружи и контактирует с атмосферным воздухом. Принято, что поезд полностью остыл за время движения до тоннеля по открытой местности. Обделка тоннеля задается подвижной стенкой со скоростью $U_{ст.т}$ (м/с), равной скорости движения поезда, и постоянной температурой стенки тоннеля $t_{ст.т} = +5$ °С, так как поезд все время перемещается на участок с неохлажденной стенкой. Поезд в зазоре обтекается потоком теплого тоннельного воздуха, приходящего справа, со скоростью воздуха в зазоре U_3 (м/с) и температурой воздуха в тоннеле $t_T = +5$ °С. Скорость U_3 определяется как разность между реальной скоростью поезда и скоростью воздуха в зазоре, найденной по расходу в зазоре. Для тоннеля с воротами она постоянна, для открытого тоннеля — переменна.

В результате исследований определен нестационарный тепловой поток от тоннельного воздуха к холодному поезду, т. е. теплопотери, которые нужно компенсировать для поддержания в тоннеле заданной положительной температуры $+5$ °С. Эти теплопотери рассчитаны для температур наружного воздуха $-20, -30, -40$ и -50 °С, которые приняты на основе данных [10].

На рис. 2 показаны суммарные теплопотери для открытого тоннеля без ворот и тоннеля с воротами, которые включают в себя теплопотери на нагрев стенки поезда и поступающего в тоннель холодного наружного воздуха. Видно, что в открытом тоннеле без ворот теплопотери могут достигать 18 633 кВт при температуре наружного воздуха -50 °С, причем большую их часть будут составлять теплопотери на нагрев холодного воздуха, проникающего через входной

портал. Теплотери в тоннеле длиной 6 км меньше, чем в тоннеле длиной 3 км за счет меньшего количества поступающего в тоннель холодного воздуха, что объясняется большим аэродинамическим сопротивлением тоннеля.

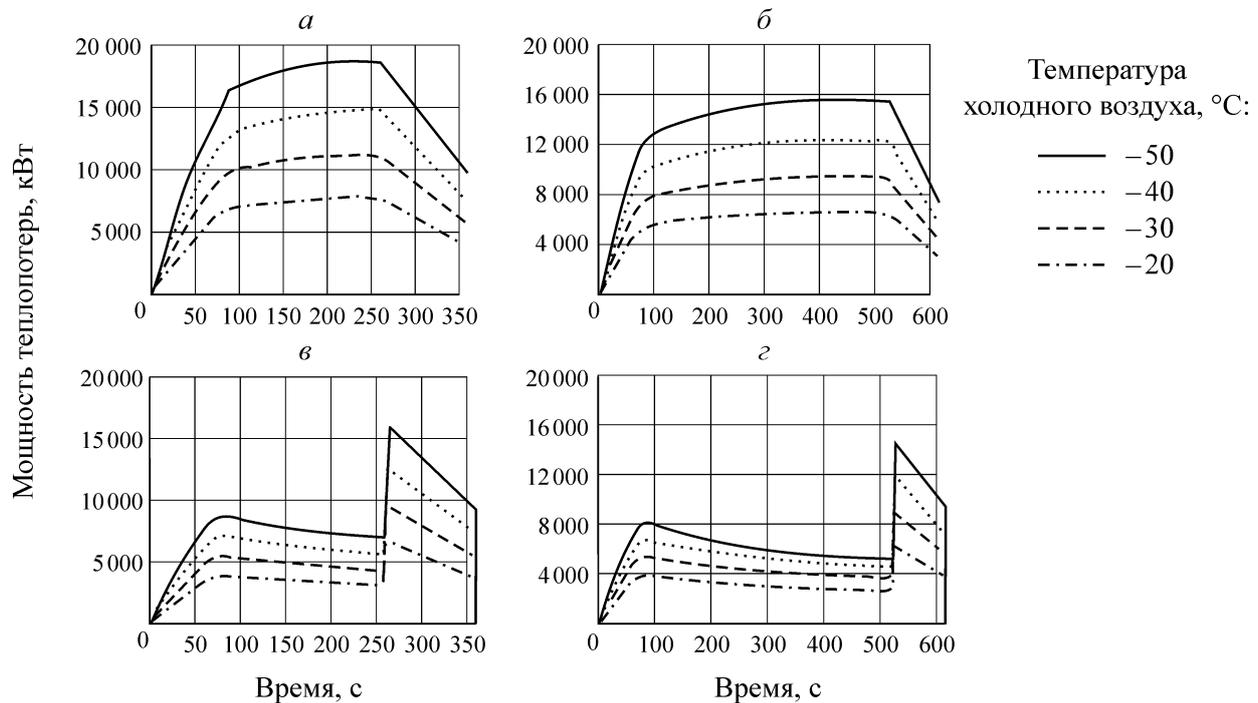


Рис. 2. Суммарные теплотери в тоннеле: а, б — без ворот; в, г — с воротами

В тоннеле с воротами в течение большей части времени движения поезда по тоннелю тепло теряется только на нагрев поезда. При выходе поезда из тоннеля появляются дополнительные теплотери на нагрев холодного воздуха, проникающего через выходной портал. В итоге максимальные суммарные теплотери достигают 15 934 кВт и носят пиковый характер. Мощности суммарных теплотерь, осредненные за время движения поезда по тоннелю, приведены в таблице.

Средняя мощность суммарных теплотерь, кВт

Длина, тип тоннеля	Температура наружного воздуха, °C			
	-20	-30	-40	-50
3 км, без ворот	6 134	8 826	11 678	14 713
3 км, с воротами	3 696	5 251	6 856	8 520
6 км, без ворот	5 565	7 986	10 537	13 236
6 км, с воротами	3 290	4 654	5 859	7 480

ВЫВОДЫ

Исследования показали, что мощность теплотерь на нагрев поезда в тоннеле с воротами больше, чем без ворот, поскольку в тоннеле с воротами коэффициент теплоотдачи выше за счет большей скорости обтекания поезда тоннельным воздухом. Чем длиннее тоннель без ворот, тем меньше мощность теплотерь на нагрев поезда. Это объясняется образованием попутного поезду потока воздуха в тоннеле, снижающего скорость обтекания воздухом поезда в зазоре.

Для железнодорожных тоннелей длиной 6 км, не оборудованных вентиляционными воротами на порталах, теплотери на нагрев поезда меньше, чем в тоннелях длиной 3 км, а теплотери на нагрев поступающего через порталы холодного воздуха больше. Максимальная сум-

марная мощность теплопотерь в тоннеле длиной 3 км без вентиляционных ворот при температуре наружного воздуха -50°C составляет 18.6 МВт. В тоннелях, оборудованных вентиляционными воротами, мощность теплопотерь на нагрев поезда больше, чем в тоннеле без ворот вследствие того, что коэффициент теплоотдачи выше за счет большей скорости обтекания поезда, а теплопотери на нагрев врывающегося холодного воздуха ниже из-за перекрытия порталов воротами. В результате осредненная по времени движения по тоннелю суммарная мощность теплопотерь в тоннелях с вентиляционными воротами в два раза меньше, чем без них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Gendler S. G.** Problems of ventilation of transport tunnels, Mining Information Analytical Bulletin, Thematic application Security, 2005, pp. 281–295 [**Гендлер С. Г.** Проблемы проветривания транспортных тоннелей. Тематическое приложение. Безопасность // ГИАБ. — 2005. — С. 281–295.]
2. **Lugin I. V. and Vitchenko A. A.** Maintaining the required temperature in the Severomuysky tunnel in the cold period of the year 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. — 2014. — Т. I. — № 1. — С. 210–214.]
3. **Lugin I. V. and Alferova E. L.** Investigation of aerodynamics processes in case of a train moving in extended subway 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-ГеоСибирь. — 2018. — Т. 5. — С. 155–160.]
4. **ANSYS Fluent.** 15th ed., Canonsbury, PA. ANSYS Inc, 2013.
5. **Project documentation.** The construction of the new Baikal tunnel on the stretch Delicija–Daban East-Siberian railway. Section 3. Technological and constructive decisions of linear object. Artificial construction. JSC “Stroy-Trest”, 2014 [**Проектная документация.** Строительство нового Байкальского тоннеля на перегоне Дельбичинда–Дабан Восточно-Сибирской железной дороги. Разд. 3. Технологические и конструктивные решения линейного объекта. Искусственные сооружения. ОАО “Строй-Трест”, 2014.]
6. **Gendler S. G. and Pleskunov V. A.** The choice of a rational scheme of ventilation of the Kuznetsovsky railway tunnel, Mining Information Analytical Bulletin, Aerology, 2009, Separate issue no. 13, pp. 81–89 [**Гендлер С. Г., Плескунов В. А.** Выбор рациональной схемы проветривания Кузнецовского железнодорожного тоннеля // ГИАБ. Аэрология. — 2009. — Отд. вып. № 13: — С. 81–89.]
7. **SR 122.13330.2012.** Railways and highway tunnels, Updated version of ВСaR 32-04-97, Moscow, 2013 [СНП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция. СНиП 32-04-97. Введ. 2013–01–01. — М., 2013.]
8. **GOST 9238-2013.** Dimensions of railway rolling stock and approaching buildings [**ГОСТ 9238-2013.** Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. Введ. 2014–07–01. — М., 2014.]
9. **Bamtonnelstroï.** Objects [Electronic resource]. [**Бамтоннельпроект.** Объекты [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.btpnsk.ru/objects>]
10. **SR 131.13330.2012.** Construction climatology. Updated version of ВСaR 23-01-99 [СНП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. Введ. 2013–01–01. — М., 2013.]