

**С.Г. Гендлер, С.В. Синявина**

## **ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫМ РЕЖИМОМ НОВОГО БАЙКАЛЬСКОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТОННЕЛЯ**

*Изложен принцип работы системы подогрева воздуха на железнодорожных тоннелях. Отмечена связь конечной температуры подогреваемого воздуха от его общего количества, начальной температуры и мощности калориферных установок. Говорится о возможности сокращения количества воздуха, поступающего в тоннель, за счет установки на его порталах вентиляционных ворот. Приведены результаты натурных исследований по оценке влияния вентиляционных ворот на вентиляционный режим тоннеля. Экспериментально определен коэффициент местного сопротивления ворот. Осуществлено математическое моделирование аэродинамики Байкальского тоннеля при установке на его порталах вентиляционных ворот и работе струйных вентиляторов при действии естественной тяги. Осуществлен прогнозный расчет количества воздуха, который будет поступать в Байкальский тоннель, при отсутствии и движении поездов. Дана оценка мощности калориферного оборудования.*

*Ключевые слова: система подогрева, железнодорожный тоннель, поезд, естественная тяга, калорифер, ворота, местное сопротивление, расход воздуха, математическое моделирование, струйные вентиляторы.*

**П**одогрев воздуха наружного воздуха, поступающего в железнодорожные тоннели, является радикальным средством обеспечения безопасности движения поездов в зимний период времени в условиях сурового климата [1]. Его следует применять в случаях высокой дебитов подземных вод и невозможности полного исключения их взаимодействия с холодным наружным воздухом, результатом которого является промерзания пород, приводящее к выходу из строя устройств заблочного дренажа, что инициирует образование наледей и образование трещин в обделке тоннеля вплоть до частичного или полного разрушения ее конструктивных элементов, предназначенных для гидроизоляции тоннелей от напорных подземных вод (например, металлоизоляция). В настоящее время три железнодорожных тоннеля оборудованы системами подогрева наружного воздуха.

Подогрев наружного воздуха осуществляется по схеме, которая предусматривает подачу части поступающего в тоннель холодного наружного воздуха в калориферы, где его температура повышается до значения, обеспечивающего после смешения с другой частью наружного воздуха, имеющего отрицательную температуру, положительную температуру всего объема воздуха [2]. Величина конечной температуры зависит от общего количества воздуха, поступающего в тоннель  $Q_{\text{вх}}$ , его начальной температуры (температура наружного воздуха) и мощности калориферных установок. В свою очередь, на величину  $Q_{\text{вх}}$  влияет наличие или отсутствие в тоннеле подвижного состава, а также положение вентиляционных ворот на порталах тоннеля. Максимально возможное снижение количества воздуха, поступающего в тоннель, приведет к сокращению мощности калориферных установок. Для

оценки эффективности различных способов снижения количества воздуха был осуществлен комплекс экспериментальных и теоретических исследований.

Первый этап этих исследований, состоящий в оценке влияния вентиляционных ворот на расход воздуха [3], был осуществлен на восточном портале Северо-Муйского тоннеля в период выполнения пуско-наладочных работ перед его сдачей в эксплуатацию.

В процессе исследований определялись потери давления при движении воздушного потока через ворота при различных величинах перекрытия сечения тоннеля  $F_{от}$ . Величина  $F_{пер}$  рассчитывалась как отношение разности сечения тоннеля  $F_T$  в месте установки ворот и сечения, свободного для прохода воздуха  $F_{пр}$ , к сечению тоннеля, т.е.  $F_{пер} = (F_T - F_{пр})/F_T$  [3].

Анализ экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы: при величине перекрытия порталного сечения тоннеля  $F_{пер}$ , не превышающем 0,75, потери давления незначительны.

Вместе с тем, увеличение величины перекрытия до 0,85–0,95 приводит к повышению потерь давления в 10 раз, что определяет соответствующее сокращение расхода воздуха, поступа-

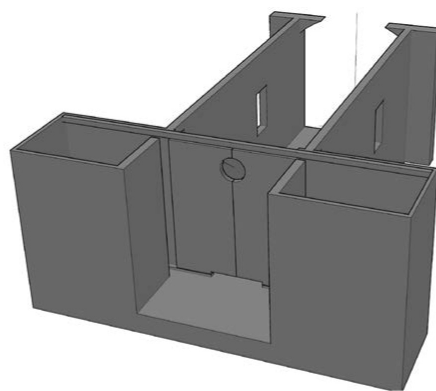
ющего в тоннель. Для количественной оценки влияния аэродинамического сопротивления ворот на количество воздуха использован коэффициент местного сопротивления ворот  $\zeta_{м.в.}$ , величина которого повышается с увеличением перекрытия порталного сечения тоннеля. При полностью закрытых воротах (открытым остается только отверстие для пропускания контактного провода) величина коэффициента местного сопротивления составила  $\zeta_{м.в.} = 698$ . Это значение было использовано в дальнейшем для вычисления количества воздуха, который будет поступать в Байкальский тоннель в результате действия естественной тяги, величина которой может составлять 50–500 Па. (рис. 5, точки на графике).

Для подтверждения результатов инженерных расчетов было осуществлено математическое моделирование аэродинамики движения воздушного потока в новом Байкальском тоннеле. Для моделирования была использована технология вычислительной гидрогазодинамики (computational fluid dynamics – CFD), реализованная на основе программного комплекса Ansys. Вычислительный эксперимент был осуществлен для следующих условий:

- протяженность тоннеля 6678 м;
- сечение тоннеля 52,3 м<sup>2</sup>;



**Рис. 1.** Внешний вид порталных ворот на Северо-Муйском тоннеле



**Рис. 2.** Принятая для моделирования схема расположения порталных ворот



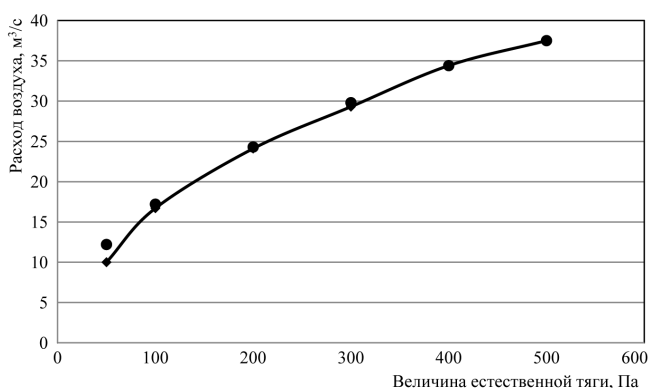
**Рис. 3. Распределение скорости воздуха в сечении, прилегающем к вентиляционным воротам у западного портала при значении естественной тяги 400 Па**

- периметр 25,6 м;
- величина естественной тяги изменяется от 50 до 500 Па;
- западный и восточный порталы тоннеля перекрыты воротами, имеющими отверстия для пропуска контактного провода и зазоры между нижней кромкой ворот и рельсами (рис. 2).

Математическая формулировка задачи записывается в виде осредненных по Рейнольдсу нерегулярных уравнений Навье-Стокса, которые для снижения вычислительного ресурса дополняются  $k-\varepsilon$ -моделью турбулентности [7].

Результаты расчетов представлены в виде полей скорости в сечении тоннеля, прилегающем к воротам (рис. 3), и графической зависимости расхода воздуха, поступающего в тоннель, от величины естественной тяги (см. рис. 4, сплошная линия).

Сопоставительный анализ результатов математического моделирования и инженерных расчетов с экспериментально определенным коэффициентом местного сопротивления (см. рис. 4) с одной стороны подтверждает правоту принятой для численных расчетов



**Рис. 4. Зависимость расхода воздуха, поступающего в Байкальский тоннель, от величины естественной тяги:** сплошная линия – результаты математического моделирования; точки – данные расчетов при экспериментальном определенном коэффициенте местного сопротивления

расчетной схемы (расхождение не превышает 5%), а с другой обосновывает возможность выполнения вычислений по известным инженерным зависимостям.

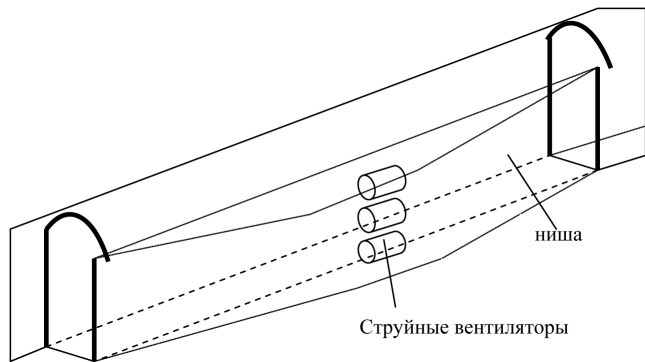
Как показывали результаты натурных исследований, использование порталных вентиляционных ворот может позволить значительно снизить количество воздуха, поступающее в тоннель, не только при отсутствии, но и при движении подвижного состава ( $Q_{п.ср}$ ). Для прогнозной оценки расходов воздуха, которые могут посту-

пать в новый Байкальский тоннель при движении грузовых поездов по методике, изложенной в работе [4], осуществлена серия расчетов. При этом была принята следующая процедура функционирования порталных ворот:

- вентиляционные ворота устанавливаются на восточном и западном порталах тоннеля;
- нормальное положение вентиляционных ворот при отсутствии в тоннеле подвижного состава – «закрыто»;
- при подъезде поезда к ближайшему разъезду у западного портала вентиляционные ворота на портале приводятся в положение «открыто». При времени движения поезда от ближайшего разъезда до портала 5 мин. и времени открытия ворот 1 мин. общее время, в течение которого ворота на восточном портале перед входом поезда в тоннель будут открыты, равно 6 мин. При этом ворота на западном портале остаются в положении «закрыто»;

- после входа в тоннель поезда на полную длину и приближение его к вентиляционному стволу ворота на восточном портале приводятся в положение «закрыто». В то же самое время вентиляционные ворота на западном портале приводятся в положение «открыто».

Кроме того, все расчеты выполнялись для случая совпадения направлений движения поездов и действия



**Рис. 5. Расположение струйных вентиляторов в новом Байкальском тоннеле**

естественной тяги. Результаты расчетов представлены в табл. 1, где  $H_e$  – величина естественной тяги,  $Q_e$  – расход воздуха при отсутствии поезда в тоннеле,  $Q_{п.ср}$  – средний расход воздуха при движении поезда по тоннелю,  $Q_{ср}$  – средняя величина расхода воздуха.

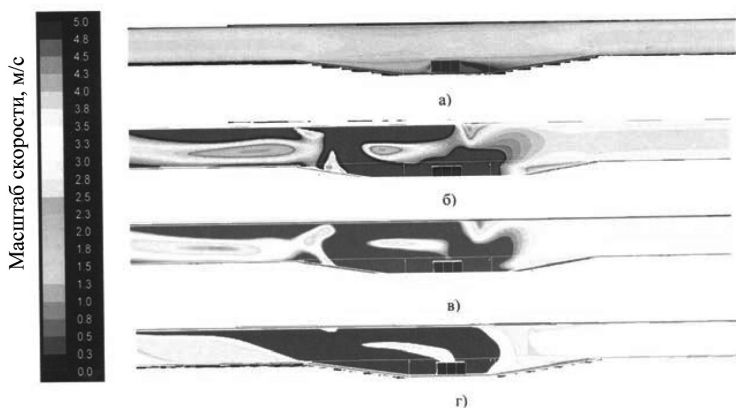
Дополнительным резервом для снижения количества воздуха, поступающего в тоннель при действии естественной тяги, является использование струйных вентиляторов, которые устанавливаются в тоннеле с возможностью формирования воздушной струи в направлении обратной действию естественной тяги [5] (рис. 5).

Для анализа влияния струйных вентиляторов на количество воздуха, поступающего в тоннель, по технологии описанной выше было осуществлено CFD моделирование аэродинамических процессов. Исходные данные для проведения численного эксперимента

Таблица 1

**Расходы воздуха в тоннеле при движении подвижного состава и его отсутствия при закрытых порталных воротах**

П-р \ $H_e, Pa$	50	100	150	200	250	300	350	400
$Q_e, m^3/c$	12,2	17,2	21,1	24,3	27,2	29,8	32,2	34,4
$Q_{п.ср}, m^3/c$	57,8	61,3	64,2	66,7	69,4	71,2	73,2	75,1
$Q_{ср}, m^3/c$	22,7	27,3	31,1	34,1	36,9	39,3	41,6	43,8



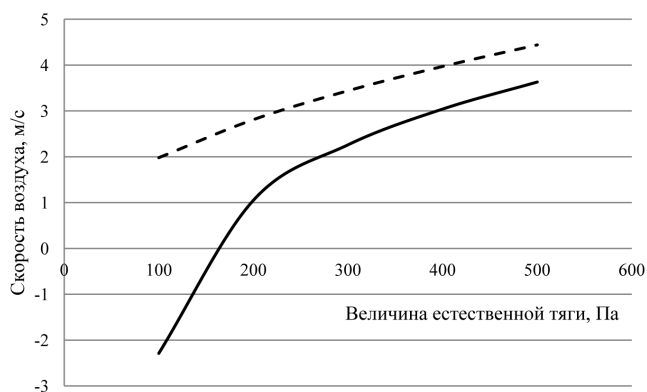
**Рис. 6. Скорости воздушного потока на участке расположения струйных вентиляторов: а) неработающие струйные вентиляторы; б) на высоте 5 м от уровня железнодорожного полотна; в) на высоте 3 м от уровня железнодорожного полотна; г) на высоте 1 м от уровня железнодорожного полотна**

соответствовали данным, приведенным в работе [5]. Результаты моделирования получены в виде распределения скоростей воздуха на участке тоннеля, где расположена ниша, в которой установлены струйные вентиляторы (рис. 6), и зависимости средних по сечению тоннеля скоростей воздуха  $V_a$  от величины естественной тяги (рис. 7).

Сравнение графиков на рис. 7 свидетельствует о том, что, с увеличением величины естественной тяги эффективность действия струйных вентиля-

торов уменьшается. Начиная с величины естественной тяги 400 Па, разница между скоростями воздуха в тоннеле при работе струйных вентиляторов и без них становится ниже 30%.

Влияние сокращения количества холодного наружного воздуха, поступающего в тоннель, на снижение мощности калориферной установки было установлено на основании расчетного анализа, выполненного по методике [6]. Вычисления были проведены для периода наиболее холодной пятидневки



**Рис. 7. Зависимость скорости воздуха в тоннеле от депрессии естественной тяги: сплошная линия – при работе струйных вентиляторов; прерывистая линия – скорость воздуха только при действии естественной тяги**

без применения струйных вентиляторов для снижения количества воздуха, поступающего в тоннель, и при использовании различных сочетаний струйных вентиляторов, имеющих разные аэродинамические характеристики.

Были рассмотрены следующие варианты управления естественными воздушными потоками, отличающихся отсутствием или применения различных типов струйных вентиляторов:

1. Без применения струйных вентиляторов;

Таблица 2

**Суммарные энергетические затраты на тепловентиляционную систему и снижение количества наружного воздуха поступающего в тоннель**

№ варианта Ест. тяга	1			2			3			4		
	200	300	400	200	300	400	200	300	400	200	300	400
Мощность калориферов, кВт	2189	2466	2708	871	1641	2178	1153	1929	2328	860	885	1769
Мощность струйных вентиляторов, кВт	–	–	–	300	300	300	360	360	360	660	660	660
Общая мощность, кВт	2189	2466	2708	1171	1941	2478	1513	2289	2688	1520	1545	2429

2. Четырех вентилятора 4 JZR 14–75/4;

3. 12 вентиляторов 12 JZR 10–30/4;

4. Одновременно четыре вентилятора 4 JZR 14–75/4 и 12 вентиляторов 12 JZR 10–30/4.

Общие энергетические затраты на подогрев воздуха с учетом мощностей, затрачиваемых на снижение количества воздуха, поступающего в тоннель, равны (табл. 2).

Таким образом, из рассмотренных вариантов поддержания требуемого теплового режима в новом Байкальском тоннеле наиболее рациональным является вариант № 4, предусматривающий

совместное использование для снижения количества воздуха, поступающего в тоннель за счет действия естественной тяги, четырех вентиляторов 4 JZR 14–75/4 и 12 вентиляторов 12 JZR 10–30/4. Максимальная мощность электрических калориферов выбрана для значения естественной тяги, составляющей 400 Па, и равна 1800 кВт. Это значение мощности соответствует количеству воздуха, поступающего в тоннель при отсутствии в нем подвижного состава, закрытых воротах и неработающих струйных вентиляторах, равного 34,4 м<sup>3</sup>/с. При этом, температура наружного воздуха составляет -35 °С.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гендлер С.Г., Соколов В.А. Выбор режимов эксплуатации для поддержания необходимого качества воздуха в Северо-Муйском железнодорожном тоннеле / Материалы 11-го международного симпозиума по аэродинамике и вентиляции транспортных тоннелей. – Люцерн. Швейцария, 2003. – С. 289–308.

2. Гендлер С.Г., Макаров В.А., Рохлин А.Е., Соловьев А.Н., Самсонов Е.Я., Комиссар О.Н., Шабалин В.Н. Вентиляционный затвор для железнодорожного тоннеля. Патент РФ на изобретение № 2191264, 2002.

3. Гендлер С.Г., Соколов В.А. Результаты натурных испытаний вентиляции при эксплуатации Северо-Муйского тоннеля / Материалы 12-го международного симпозиума по аэродинамике и вентиляции транспортных

тоннелей. Порторож. Словения. – 2006. – С. 451–461.

4. Гендлер С.Г., Плескунов В.А. Выбор рациональной схемы проветривания Кузнецовского железнодорожного тоннеля // Горный информационный бюллетень. ОВ 13. Аэрология. – 2009. – С. 81–89.

5. Гендлер С.Г., Савенков Е.А., Соколов В.А. Особенности использования струйных вентиляторов для вентиляции железнодорожных тоннелей / 6-ая международная конференция «Безопасность тоннелей и вентиляция – Новые тенденции в обеспечении тоннельной безопасности. Грац. Технологический университет. 23–25 апреля 2012. – С. 116–123.

6. Гендлер С.Г., Синявина С.В. Управление тепловым режимом железнодорожных



тоннелей, расположенных в суровых климатических условиях // Горный информационный бюллетень. ОВ 7. Промышленная безопасность предприятий минеральносырьевого комплекса в XXI веке. – 2015. – С. 32–38.

7. Лаундер В., Спалдинг Д.В. Лекции по математическим моделям турбулентности. – Лондон: Академическое издание, 1972. – 169 с. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

---

Гендлер С.Г. – доктор технических наук, профессор,

e-mail: sgendler@mail.ru,

Синявина С.В. – аспирант, e-mail: ssv.1207@yandex.ru,

Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

---

UDC 625.712.35

## **FEATURES OF CONTROL OF THE NEW BAYKALSK RAILWAY TUNNEL VENTILATING MODE**

Gendler S.G.<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sgendler@mail.ru,

Sinyavina S.V.<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: ssv.1207@yandex.ru,

<sup>1</sup> National Mineral Resource University «University of Mines», Saint-Petersburg, Russia.

---

*The principle of heating system of air operation on railway tunnels is developed. Connection of final temperature of the warmed-up air from its total quantity, reference temperature and power of heater installations is noted. It is told about possibility of reduction of amount of the air coming to a tunnel due to installation on its portals of ventilating gate. Results of natural researches on estimates of influence of ventilating gate on the ventilating mode of a tunnel are given. The coefficient of local resistance of gate is experimentally defined. Mathematical modeling of aerodynamics of the Baikal tunnel at installation on its portals of ventilating gate and operation of jet fans at action of natural draft is carried out. Prediction calculations of air amount which will come to the Baikal tunnel, at absence and train movements are performed. The assessment of power of the heater equipment is given.*

*Key words.* System of heating, railway tunnel, train, natural draft, heater, gate, local resistance, air consumption, mathematical modeling, jet fans.

## **REFERENCES**

1. Gendler S.G., Sokolov V.A. *Materialy 11-go mezhdunarodnogo simpoziuma po aerodinamike i ventilatsii transportnykh tonneley* (Materials of 11th International symposium aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels), Luzern, Switzerland, 2003, pp. 289–308.

2. Gendler S.G., Makarov V.A., Rokhlin A.E., Solov'ev A.N., Samsonov E.Ya., Komissar O.N., Shabalin V.N. *Patent RU 2191264*, 2002.

3. Gendler S.G., Sokolov V.A. *Materialy 12-go mezhdunarodnogo simpoziuma po aerodinamike i ventilatsii transportnykh tonneley* (Materials of 12th International symposium aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels), Portoroz, Slovenia, 2006, pp. 451–461.

4. Gendler S.G., Pleskunov V.A. *Gornyy informatsionnyy byulleten'*. Special issue 13. Aerologiya. 2009, pp. 81–89.

5. Gendler S.G., Savenkov E.A., Sokolov V.A. *Bezopasnost' tonneley i ventilyatsiya Novye tendentsii v obespechenii tonnel'noy bezopasnosti. 6-aya mezhdunarodnaya konferentsiya 23–25 aprelya 2012* (Tunnel safety and Ventilation – New Developments in Tunnel Safety. 6th International Conference 23–25 April 2012), Graz University of Technology, 2012, pp. 116–123.

6. Gendler S.G., Sinyavina S.V. *Gornyy informatsionnyy byulleten'*. Special issue 7. Promyshlennaya bezopasnost' predpriyatiy mineral'nosyr'evogo kompleksa v XXI veke, 2015, pp. 32–38.

7. Launder V., Spalding D.V. *Leksii po matematicheskim modelyam turbulentnosti* (Lectures in mathematical models of turbulence), London, Akademicheskoe izdanie, 1972, 169 p.

