

УДК 622.71 (06)

С.Г. Гендлер, В.Н. Кастанеда, А.Г. Белен

УПРАВЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫМИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЯХ

Измерения, выполненные на Байкальском железнодорожном тоннеле длиной 7 км и разностью высотных отметок между порталами 84 м, показали, что естественная тяга изменяется по величине и направлению достигая во время летнего и зимнего периодов соответственно 50—80 Па и 700-800 Па. В результате аналогичных измерений весной, проведенных на тоннеле Гуадерамма длиной 28,4 км и разностью высот между порталами 116 м, установлено, что при величине естественной тяги 140 Па –190 Па, количество воздуха составляет 80-90 м³/с. Сформулированы требования для систем вентиляции тоннелей, обеспечивающие безопасность их эксплуатации в штатном и аварийном режимах. Предложены технические решения по проектированию вентиляции, принимая во внимание естественную тягу. Для Байкальского тоннеля оценена целесообразность использования струйных вентиляторов, размещенных в нишах внутри тоннеля, для снижения количества воздуха. Показана эффективность совместного использования струйных вентиляторов и вентиляционных ворот.

Ключевые слова: тоннель, вентиляция, эвакуация, аварийный режим, вентилятор, электрический калорифер.

Вентиляция тоннелей, пересекающих горные хребты, зависит от естественной тяги, величина которой определяется разностью высот между порталами, высотными отметками порталов и горного хребта, климатическими параметрами атмосферного воздуха [1,8,9].

При совпадении направления действия естественной тяги и принудительной вентиляции эффективность проветривания возрастает, в результате чего уменьшается потребление энергии. Вместе с тем, в ряде случаев требуется ограничить количество воздуха, поступающее в тоннель, и даже изменить направление его движения.

Тоннель Гуадерамма и Байкальский тоннель расположены в различных точках мира с различными географическими и климатическими условиями. Тоннель Гуадерамма простирается от Мадрида до окраины Сеговио, проходя через Мадридскую

горную цепь под горой Пеналара с максимальной высотой относительно уровня моря 2210 м. Длина тоннеля 28400 м, поперечное сечение 52 м², разницу высот между порталами 116 м. В систему тоннельного комплекса Гуадерамма входит два тоннеля (тоннели 1 и 2), по которым осуществляется движение поездов в противоположных направлениях.

Байкальский тоннель пересекает хребет с тем же названием под седловиной перевала Даван на границе Бурятии и иркутской области в 80 км на запад от города Нижнеангарск. Максимальная высотная отметка хребта равна 1080 м. Байкальский тоннель, предназначенный для однонаправленного реверсивного движения поездов, имеет длину 6700 м, поперечное сечение 34 м² и разницу высот между порталами 84 м.

Несмотря на существенные отличия в климатических и горнотехниче-

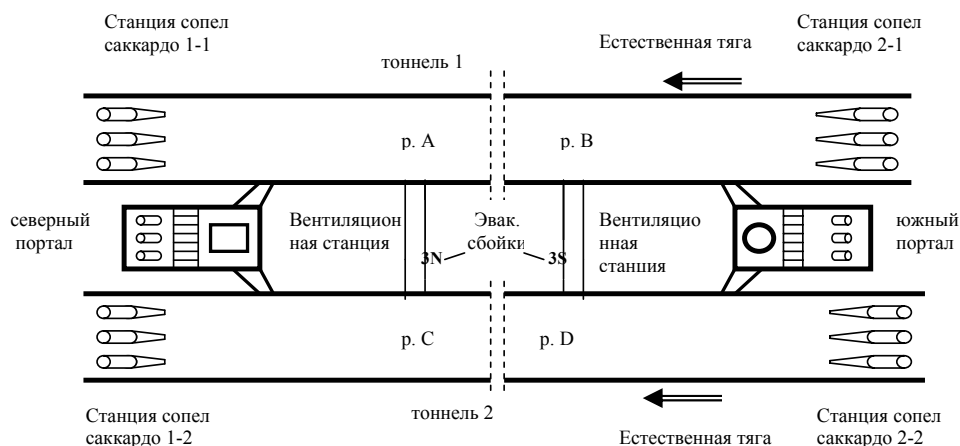


Рис. 1. Схема вентиляции тоннеля Гуадерамма (т.т. А, В, D, С — точки измерения скорости воздуха)

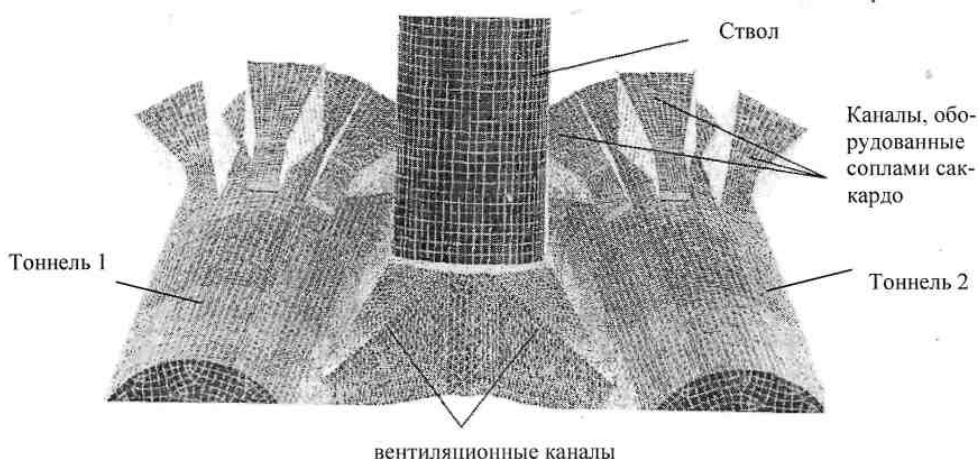


Рис. 2. Вентиляционное оборудование на каждом из порталов

ских условиях, определяющих эксплуатацию этих тоннелей, их объединяет наличие естественной тяги и необходимость её учета для выбора штатных и аварийных режимов вентиляции.

В тоннеле Гуадерамма для создания аварийного режима вентиляции в случае возникновения пожара предполагается использовать вентиляционное оборудование, расположенное у порталов, с помощью которого воздух подается в параллельные тоннели по схеме саккардо.

Условиями безопасной эксплуатации Байкальского тоннеля является создание положительного теплового режима, необходимого для предотвращения образования наледей. Для этого наружный воздух в зимнее время перед подачей в тоннель подогревается в калориферах, установленных в вентиляционных зданиях у порталов тоннеля [1,2]. Снижение мощности калориферов может быть достигнуто за счет снижения количества воздуха, поступающего в тоннель в результате влияния естественной тяги. Для этого

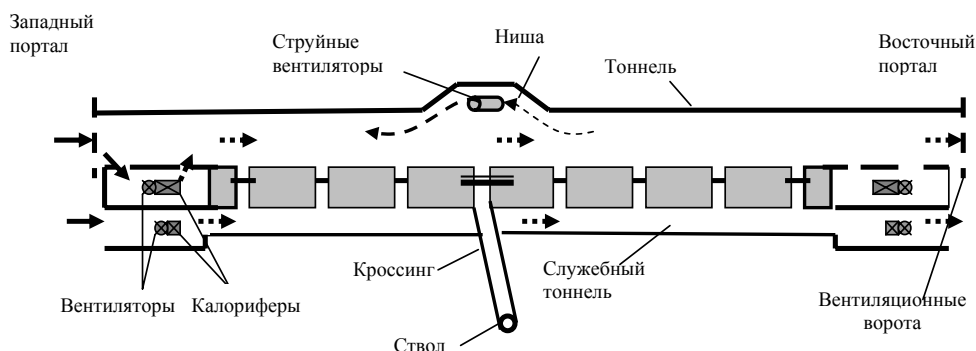


Рис.3. Схема вентиляции Байкальского тоннеля

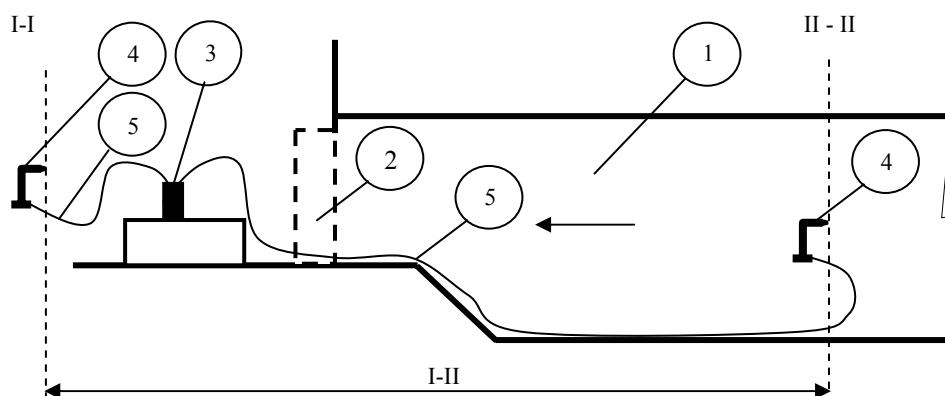


Рис.4. Измерение депрессии естественной тяги на западном портале служебного тоннеля: 1 – служебный тоннель; 2 – вентиляционные двери; 3 – микроманометр; 4 – трубка Пито; 5 – гибкие силиконовые шланги

предлагается использовать струйные вентиляторы, размещенные в нише в центральной части тоннеля, и падающие воздух в направлении противоположном действию естественной тяги, а также вентиляционные ворота у его порталов.

Для оценки влияния сопел Саккардо и струйных вентиляторов на скорость естественного воздушного потока, выбора параметров вентиляционных установок и определения режимов его работы во всех случаях использовалось CFD моделирование.

2. Характеристика вентиляционных систем тоннеля Гуадерамма и Байкальского тоннеля

Система вентиляции тоннеля Гуадерамма, спроектированная на основе CFD моделирования, включает два параллельных тоннеля. Тоннели связаны между собой эвакуационными сбойками. Между обоими тоннелями у каждого из порталов расположены главные вентиляционные станции. Каждая станция связана с тоннелем посредством вентиляционного канала специальной конфигурации, которая максимально снижает потери давления на входе воздушного потока в тоннели. Вентиляционные станции оборудованы тремя вентиляторами типа ZVN 1-20-560/4 (один вентилятор используется для резервных целей).

Сопла Саккардо, расположены в специальных каналах, которые сооружены в верхней части каждого тоннеля. В каждом канале установлен вентилятор типа ZVN 1-20-450/4.

Вентиляция Байкальского тоннеля в зимнее время года осуществляется за счет естественной тяги, направленной или к западному portalу или к восточному portalам тоннеля. Проветривание сервисного тоннеля производится обособленного от основного тоннеля также за счет естественной тяги. В случае необходимости для подачи воздуха в сервисный тоннель дополнительно используются вентиляторы, размещенные у его порталов. Ствол, расположенный в центральной части, связанный с основным тоннелем кроссингом, в этот период времени исключен из схемы вентиляции. Основной и сервисный тоннели через каждые 300 м соединены эвакуационными сбойками, которые перекрыты вентиляционными дверями. Подогрев наружного воздуха осуществляется у порталов тоннеля электрическими калориферами, установленными в вентиляционных заданиях у порталов тоннелей. Подача наружного воздуха в калориферы производится вентиляторами.

Для снижения количества воздуха поступающего в тоннель в результате действия естественной тяги предполагается использование трех струйных реверсивных вентиляторов типа JZR – 16-90/6, размещенных в нише в середине тоннеля. Эти же вентиляторы в случае необходимости могут усиливать естественную вентиляцию. На порталах тоннеля предусмотрено сооружение вентиляционных ворот [3,4].

3. Экспериментальные определения депрессии естественной тяги

В 2009 году на Байкальском тоннеле был выполнен комплекс натурных исследований для определения

депрессии естественной тяги. Её измерения были осуществлены на западном portalе тоннеля при западном направлении естественной тяги. Методика измерений состояла в следующем:

1. На поверхности вблизи порталов вне зоны влияния выходящего из сервисного тоннеля потока воздуха устанавливался микроманометр.

3. К микроманометру присоединялись 2 силиконовых шланга. Концы одного из них располагались на поверхности вне зоны влияния выходящего из сервисного тоннеля потока воздуха, а второй, для исключения влияния местных сопротивлений выхода, находился в сервисном тоннеле на расстоянии равном 6 гидравлическим диаметрам от его порталов. К концам шлангов в сервисном тоннеле и на поверхности присоединялись трубки Пито, устанавливаемые навстречу движению потока воздуха.

4. Дверной проем порталов сервисного тоннеля перекрывался дверью. Одновременно с закрытием двери производился замер. Замеры осуществлялись сериями по несколько замеров в каждой из них. В каждой серии определялись средние значения измеряемой. Схема измерений представлена на рис. 4., а их результаты в табл. 1.

Анализ данных измерений показал, что её средняя величина в сервисном тоннеле достигает 65, 5 Па.

Величина естественной тяги в тоннеле $P_{n.d.T}$ была вычислена с учетом разницы средних температур воздуха и, следовательно, его плотностей $\Delta\rho$ в основном и служебном тоннелях:

$$P_{n.d.T} = P_{n.d.S.T.} - g \Delta H \Delta\rho, \quad (1)$$

где ΔH – превышение восточного порталов над западным порталом (ΔH

Таблица 1

Измеренные величины депрессии естественной тяги ($P_{n.d}$)

Серии измерений	I	II	III	IV	V	Средняя величина
Время измерений	13 ⁰⁰	14 ⁰⁰	15 ⁰⁰	16 ⁰⁰	17 ⁰⁰	
Скорость V_a , м/с	0,67	0,74	0,79	0,79	0,81	0,76
Депрессия естественной тяги $P_{n.d}$, Па	55	62	68	71	72	65,6

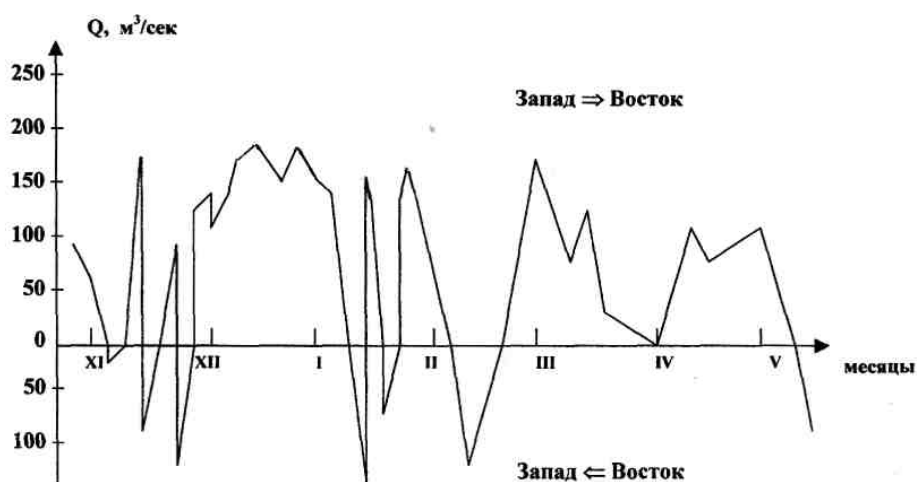


Рис. 5: Характеристика естественного воздухообмена в Байкальском тоннеле в зимний период ($З \rightarrow В$, $В \rightarrow З$ — направления движения воздуха в восточном и западном направлениях)

Таблица 2

Значения естественной тяги в Байкальском тоннеле в зимний период

$Q_{n.d}$, м ³ /с	180	160	140	120	100	80	60	40	20
V , м/с	5,3	4,7	4,1	3,5	2,9	2,35	1,8	1,2	0,6
$P_{n.d.T}$, Па	707	560	430	315	230	140	78	35	9

= 84 м), $\Delta\rho = \rho_T - \rho_{S.T.}$ — разность между плотностями воздуха в главном и сервисном тоннелях.

При величине $\Delta\rho = 0,0134$ кг/м³ естественная тяга в тоннеле составляла 54,6 Па. За этот период измерений средняя скорость воздуха в тоннеле была равна 1,47 м/с. По измеренным значениям естественной тяги и скорости воздуха в тоннеле был вычислен сум-

марный коэффициент аэродинамического сопротивления тоннеля $\sum \zeta$.

$$\sum \zeta = \frac{2P_{n.d.T}}{\rho V^2}. \quad (2)$$

Его величина оказалась равной 44,7.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных летом, дополнены ранее полученными данными

Таблица 3

Условия осуществления испытаний

Усл. Сер..	Северный портал			Южный портал		
	Станция сопел саккардо		Вентиляционная станция (В.Ст) Кол-во вент. направление подачи	Станция сопел саккардо		Вентиляционная станция (В.Ст) Кол-во вент. направление подачи
	Тоннель 1 Кол-во вент. направление подачи	Тоннель 2 Кол-во вент. направление подачи		Тоннель 1 Кол-во вент. направление подачи	Тоннель 2 Кол-во вент. направление подачи	
I	—	2 вент. с 1500 б/мин С→Ю	2 вент. с 1250 об/мин В.Ст→тон.2	—	2 вент. с 750 об/мин Ю→С	—
II	—	2 вент. с 1500 об/мин С→Ю	2 вент. с 1250 об/мин В.Ст→тон.2	2 вент. с 750 об/мин Ю→С	2 вент. с 750 об/мин Ю→С	—
III	—	2 вент. с 1500 об/мин С→Ю	2 вент. с 1250 об/мин В.Ст→тон.2	2 вент. с 750 об/мин Ю→С	2 вент. с 750 об/мин Ю→С	—
IV	—	2 вент. с 1500 об/мин С→Ю	2 вент. с 1250 об/мин В.Ст→тон.2	2 вент. с 1500 об/мин Ю→С	2 вент. с 750 об/мин Ю→С	—
V	3 вент. с 1500 об/мин С→Ю	2 вент. с 1500 об/мин С→Ю	2 вент. с 1250 об/мин В.Ст→тон.2	2 вент. с 1500 об/мин Ю→С	2 вент. с 750 об/мин Ю→С	—
VI	—	2 вент. с 750 об/мин С→Ю	—	3 вент. с 1500 об/мин Ю→С	2 вент. с 1500 об/мин Ю→С	2 вент. с 1250 об/мин В.Ст→тон.2

Таблица 4

Результаты испытаний

Серия	Скорость(м/с) and направление движения воздуха по тоннелю				Направление движения воздуха в сбойке 3N	Направление движения воздуха в сбойке 3S
	г. А	г. В	г. С	г. D		
I	2,26 Ю → С	0,86 Ю → С	1,81 С → Ю	1,43 С → Ю	тоннель 2 → тоннель 1	тоннель 2 → тоннель 1
II	2,5 Ю → С	1,46 Ю → С	2,59 С → Ю	1,47 С → Ю	тоннель 2 → тоннель 1	тоннель 2 → тоннель 1
III	1,7 С → Ю	1,87 С → Ю	2,38 С → Ю	1,8 С → Ю	тоннель 2 → тоннель 1	тоннель 2 → тоннель 1
IV	3,19 Ю → С	2,77 Ю → С	2,6 С → Ю	1,95 С → Ю	тоннель 2 → тоннель 1	тоннель 1 → тоннель 2
V	0,33 Ю → С	0,57 Ю → С	2,2 С → Ю	2,4 С → Ю	тоннель 2 → тоннель 1	тоннель 1 → тоннель 2
VI	3,63 Ю → С	3,08 Ю → С	3,11 Ю → С	3,35 Ю → С	тоннель 2 → тоннель 1	тоннель 2 → тоннель 1

измерений количества воздуха, поступающего в тоннель в зимнее время (рис. 5) [5,6].

Из графика, представленного на Рис. 5, следует, что количество воздуха ($Q_{n.d}$), поступающее в тоннель за счет естественной тяги, может достигать $180 \text{ м}^3/\text{с}$. Скорость воздуха будет равна $5,3 \text{ м/с}$. Величина естественной тяги в зимний период, вычисленная с учетом коэффициента аэродинамического сопротивления тоннеля $\sum \zeta$ и формулы (2), будет изменяться в пределах $10\text{-}700 \text{ Па}$ (табл. 2).

Значения естественной тяги для тоннеля Гуадамма получены в результате измерения анемометром скоростей воздуха в тоннеле 1 и тоннеле 2, величины которых изменялись в пределах $1,55 - 1,82 \text{ м/с}$. Последующий расчет по формуле (2) при величине $\sum \zeta = 1 + \xi_{ent} + \lambda L/D$ (где ξ_{ent} – коэффициент сопротивления портала, в который поступает воздух $\xi_{ent} = 0,5$, λ – коэффициент трения, $\lambda = 0,028$) и равной $97,5$, показал, что величина естественной тяги составляет $140 \text{ Па} - 190 \text{ Па}$.

4. Результаты натуральных испытаний системы вентиляции тоннеля Гуадамма

Целью испытаний системы вентиляции тоннеля Гуадамма являлось оценка возможности реализации аварийных режимов, удовлетворяющих следующим условиям:

- скорость воздушного потока в тоннеле (тоннель 1), где произошел инцидент (например, пожар) должна составлять не менее 3 м/с ;

- превышение давления в тоннеле, куда осуществляется эвакуация людей (тоннель 2) по сравнению с тоннелем, в котором произошел инцидент, должно быть равным 50 Па .

В процессе испытаний изучались условия проветривания тоннелей 1,2 при

изменении количества работающих вентиляторов и режимов их работы (скорость вращения) (табл. 3). Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Анализ результатов испытаний позволил сделать следующие выводы:

- Принудительная подача воздуха в тоннель 2 вентиляторами, расположенными в вентиляционной станции на северном портале, при одновременной работе 2-х вентиляторов в станции сопел Саккардо 1-2 с числом оборотов 1500 и вентиляторов в станции сопел Саккардо 2-2 с числом оборотов 750 приводит к изменению направления естественной тяги в тоннеле 2 и достижению требуемого превышения давления в тоннеле 2 над тоннелем 1. В тоже самое время вентиляция тоннеля 1 только за счет естественной тяги не обеспечивает необходимой скорости воздуха 3 м/с (серия 1)

- Усиление естественной тяги в тоннеле 1 за счет принудительной подачи воздуха вентиляторами в станции сопел саккардо 2-1 при остальных условиях испытаний, соответствующий серии 1, не обеспечивает в тоннеле 1 требуемой скорости воздуха (серия 2).

- Увеличение числа оборотов вентиляторов в станции сопел саккардо 2-1 до 1500 приводит к усилению депрессии до величины, обеспечивающей требуемую скорость воздуха в тоннеле 1 ($3,19 \text{ м/с}$). Однако при этом нарушается условие превышения давления в тоннеле 2 над тоннелем 1 и воздух по эвакуационной сбойке 3S поступает из тоннеля 1 в тоннель 2 (серия 4).

- Изменение направления движения воздуха в тоннеле 1, определяемого направлением действием естественной тяги, достигается работой трех вентиляторов с числом оборотов 1500 в станции сопел саккардо 1-1. Вместе с тем, величина скорости воз-

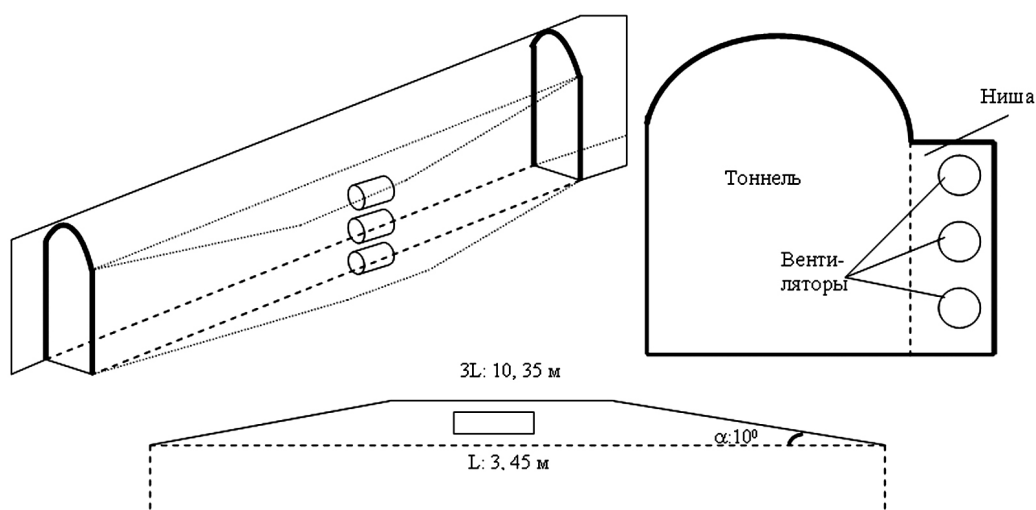


Рис. 6. Расположение струйных вентиляторов внутри тоннеля

духа в тоннеле оказывается значительно ниже 3 м/с. Время, в течение которого происходит реверсирование воздушного потока, ориентировочно составляет 5 мин (серия 3).

- При создании в тоннеле 1 скорости воздуха 3,19 м/с (серия 4), что эквивалентно величине естественной тяги 600 Па, использование трех вентиляторов с числом оборотов 1500 в станции сопел саккардо 1-1, которые подают воздух в направлении обратному движению воздуха, не приводит к реверсированию воздушного потока. Скорость воздуха в тоннеле 1 уменьшается до 0,57 м/с, давление в этом тоннеле становится выше, чем в тоннеле 2, что приводит к движению воздуха из тоннеля 1 в тоннель 2 по эвакуационной сбойке (серия 5).

- Принудительная подача воздуха в тоннель 1 по направлению действия естественной тяги тремя вентиляторами в станции сопел саккардо 2-1 с числом оборотов 1500 обеспечивает значение скорости воздуха более 3 м/с. Принудительная подача воздуха в тоннель 2 по направлению

действия естественной тяги вентиляторами в вентиляционной станции на южном портале и вентиляторами в станции сопел саккардо 2-2 с числом оборотов 1500 при условии создания в тоннеле 2 противодействия вентиляторами в станции сопел саккардо 1-2 гарантирует требуемую величину превышения давления в тоннеле 2 по сравнению с тоннелем 1 (серия 6).

5. Оценка эффективности управления естественными воздушными потоками в Байкальском тоннеле с помощью струйных вентиляторов и вентиляционных ворот

Для сокращения количества наружного воздуха, поступающего в тоннель под действием естественной тяги, предложено использовать струйные вентиляторы и вентиляционные ворота, сооружаемые на порталах тоннеля.

Оценка эффективности применения струйных вентиляторов выполнена для трех струйных реверсивных вентиляторов типа JZR – 16-90/6, размещенных в нише в середине тоннеля. Вентиляторы имеют сле-

дующие параметры: диаметр вентилятора 1,6 м, скорость вращения 1000 об/мин, частоты 50 Гц число полюсов 6, номинальный импульс $N_j = 2810$ Н, скорость воздуха $V_j = 34.9$ м/с, расход воздуха $Q_j = 70,2$ м³/с, мощность 90 кВт. Параметры ниши и пространственное расположение в ней струйных вентиляторов показаны на рис. 6.

Для исследования аэродинамики воздушного потока в Байкальском тоннеле при поступлении наружного воздуха за счет действия естественной тяги и подачи воздуха в направлении противоположном действию естественной тяги струйными вентиляторами, установленными в нише, было использовано CFD моделирование.

Параметры струйных вентиляторов соответствовали указанным выше, а величина естественной тяги изменялась в пределах от 100 Па до 700 Па. Результаты моделирования получены в виде распределения скоростей воздуха и картины траекторий его движения участке тоннеле, где расположена ниша, в которой установлены струйные вентиляторы.

Данные моделирования, обработанные в виде средних по сечению тоннеля скоростей воздуха V_a , представлены на рис. 7 (кривая 1). На этом же рисунке показана зависимость скорости воздуха, поступающего в тоннель, при действии естественной тяги и неработающих струйных вентиляторов (кривая 3). Сравнение этих графиков свидетельствует о том, что, с увеличением величины естественной тяги эффективность действия струйных вентиляторов уменьшается. Начиная с величины естественной тяги 400 Па, разница между скоростями воздуха в тоннеле при работе струйных вентиляторов и без них становится ниже 20 %.

Для приближенной оценки эффективности струйных вентиляторов, нагнетающих воздух в направлении противоположном действию естественной тяги, использовано уравнение мощностей. Это уравнение основано на допущении о том, что разность между мощностью естественной тяги ($H_{n.d.} = P_{n.d.} \cdot V_{n.d.} \cdot S_T$) и мощностью, развиваемой струйными вентиляторами ($H_{j.f.} = n_{j.f.} \cdot N_j \cdot Q_j / S_T$), равна мощности, затрачиваемой воздушным потоком на его перемещение по тоннелю ($H_a = \rho_a / 2 \cdot S_T \cdot \sum \zeta \cdot V_a^3$). Выразив скорость воздуха $V_{n.d.}$, которую имел бы воздушный поток при действии естественной тяги $H_{n.d.}$, через ее значение и полный коэффициент сопротивления тоннеля $\sum \zeta$, получим:

$$P_{n.d.} \cdot S_T \cdot \left(\frac{2P_{n.d.}}{\rho_a \sum \zeta} \right)^{1/2} - \frac{n_{j.f.} \cdot N_j \cdot Q_j}{S_T} = \frac{\rho_a}{2S_T} \sum \zeta \cdot V_a^3. \quad (3)$$

Решение этого уравнения относительно V_a имеет вид:

$$V_a = \left[\left(\frac{2P_{n.d.}}{\rho_a \sum \zeta} \right)^{3/2} - \frac{2n_j N_j}{\rho_a S_T^2 \sum \zeta} Q_j \right]^{1/3}. \quad (4)$$

Величина естественной тяги, при которой с помощью струйных вентиляторов представляется возможным остановить воздушный поток в тоннеле ($V_a = 0$), найдется из выражения (4):

$$P_{n.d.} = \sqrt[3]{0,5 \rho_a \sum \zeta \frac{n_j N_j^2}{S_T^4} Q_j^2}. \quad (5)$$

При установленных аэродинамических параметрах тоннеля и струйных вентиляторов это значение будет составлять 188 Па.

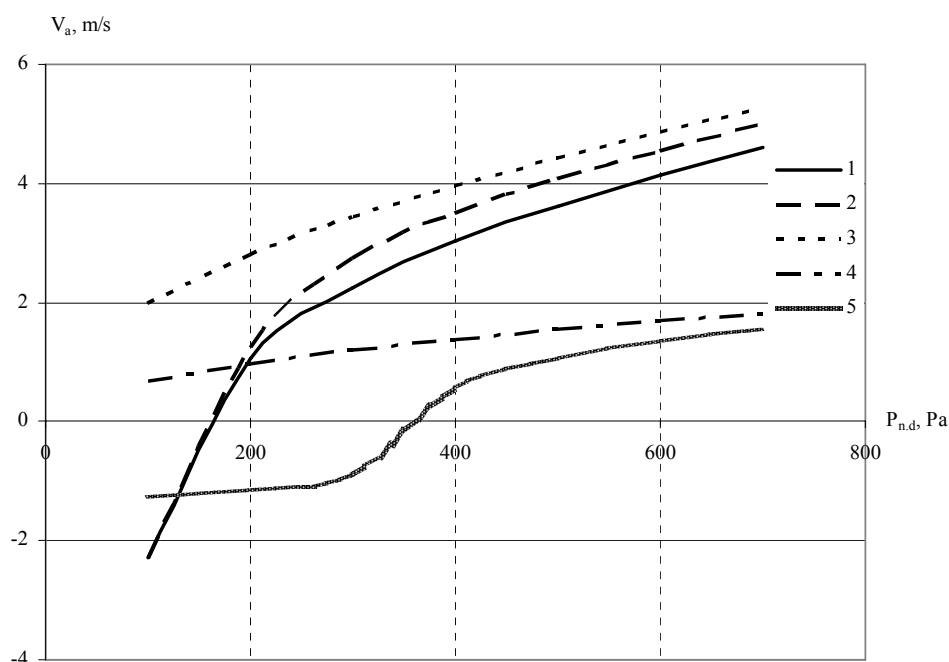


Рис. 7. Зависимость скорости воздуха в тоннеле V_a от величины естественной тяги: $P_{n.d.}$ (кривая 1 — результаты математического моделирования; кривая 2 — расчет по формуле (4) для условий математического моделирования; кривая 3 — поступление воздуха только за счет действия естественной тяги; кривая 4 — поступление воздуха только за счет действия естественной тяги и наличия вентиляционных ворот на одном из порталов тоннеля; кривая 5 — поступление воздуха за счет действия естественной тяги при одновременном наличии вентиляционных ворот и работе струйных вентиляторов)

Результаты расчетов по формуле (4) для тех же исходных данных, которые были приняты при математическом моделировании, представлены на рис. 7. (кривая 2).

Сравнение этих расчетов с данными моделирования, показывает, что приближенный метод оценки снижения количества воздуха, поступающего в тоннель за счет действия естественной тяги, с помощью струйных вентиляторов дает результаты, сопоставимые с точными вычислениями (разница не превышает 10 %). Это позволяет использовать приближенную зависимость для осуществления оценок эффективности приме-

нения струйных вентиляторов для управления воздушными потоками в широком диапазоне условий.

Из графиков на рис. 7 следует, что при значениях естественной тяги, превышающих 400 Па, применение струйных вентиляторов для сокращения количества воздуха, поступающего в тоннель, становится малоэффективным. В этой связи, нами произведена оценка целесообразности использования вентиляционных ворот, сооружаемых у порталов Байкальского тоннеля. Для этого использованы результаты испытаний вентиляционных ворот специальной конструкции, сооруженных у порталов Северо-

Муйского тоннеля [4, 7]. На основании данных, полученных при испытаниях, при полностью закрытых вентиляционных воротах (свободным остается только отверстие для пропуска контактного провода) коэффициент аэродинамического сопротивления ворот равен $\xi_{v.g.} = 308$. Суммарный коэффициент аэродинамического сопротивления тоннеля $\sum \zeta_{v.g.}$ при закрытых вентиляционных воротах составляет 353.

С учетом вычисленной величины суммарного коэффициента аэродинамического сопротивления тоннеля $\sum \zeta_{v.g.}$ осуществлены расчеты скорости поступающего наружного воздуха как только при закрытии вентиляционными воротами одного из порталов (кривая 4 на рис. 7), так и в случае одновременного закрытия портала воротами и использовании струйных вентиляторов (кривая 5 на рис. 7).

Анализ результатов этих расчетов позволил показать, что:

- установка ворот на порталах тоннеля при условии их полного закрытия на одном из них позволяет даже при значении естественной тяги 700 Па уменьшить количество воздуха, поступающего в тоннель, почти в три раза. При этом дополнительный эффект, создаваемых струйными вентиляторами, в случае их совместного использования с вентиляционными воротами составляет всего 16 %;

- при величине естественной тяги, составляющей 400 Па, дополнительный вклад струйных вентиляторов в уменьшение количества воздуха при их одновременном использовании с вентиляционными воротами достигает 60 %;

- при величине естественной тяги менее 400 Па с помощью струйных вентиляторов и вентиляционных ворот можно предотвратить поступление в тоннель наружного воздуха или опрокинуть его движение в направлении противоположном действию естественной тяги.

Заключение

1. На основании натурных измерений и последующих расчетов показано, что величина естественной тяги в протяженных железнодорожных тоннелях, пересекающих горные хребты, может превышать 700 Па.

2. В тоннеле Гуадерамма требуемые условия для спасения людей в случае аварийной ситуации обеспечиваются в результате подачи воздуха в тоннель, где возникла аварийная ситуация и в тоннель, по которому должна осуществляться эвакуация людей, по направлению действия естественной тяги.

3. Эффективность использования струйных вентиляторов для сокращения количества воздуха, поступающего в Байкальский тоннель, зависит от величины естественной тяги и уменьшается с её увеличением. При значении естественной тяги, превышающей 400 Па, применение струйных вентиляторов не приводит к заметному уменьшению количества воздуха.

4. Наиболее результативных средством для управления воздушными потоками в Байкальском тоннеле является совместное использование вентиляционных ворот, закрывающих один из порталов, и струйных вентиляторов. При величине естественной тяги менее 400 Па с помощью струйных вентиляторов и вентиляционных ворот можно предотвратить поступление в тоннель наружного воздуха.

1. *Гендлер С.Г.* Управление тепловым режимом тоннелей в суровых климатических условиях Транспортное строительство №11, 1991. с. 11-13.
2. *Gendler S.G.* Control for heat regime of the railway tunnels located in severe climatic condition. 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle of Vehicle Tunnels, 1997, ITALY, pp. 397-411
3. *Гендлер С.Г., Смирняков В.В., Терентьев Р.П.* Повышение эффективности обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожных тоннелей в суровых климатических условиях. Записки горного института, СПГИ, том 147, 2001. стр. 86-94
4. *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, Бюл. 29, 2002 г.
5. *Gendler S.G., Sokolov V.A.* The choice of operation regimes for an air quality maintenance system in the Northern Mujsky Railway Tunnel. BHR Group, 11th International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2003, Luzern, Switzerland, pp. 289-308.
6. *Gendler S.G., Sokolov V.A.* The results of ventilation tests during practical use of the Severomujsky railway tunnel. BHRg 12th International Symposium Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2006, Portoroz, Slovenia, pp. 451-462
7. *Gendler S.G.* Ventilation of the Northern Mujsky Railway Tunnel. 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, June, 9-11, 2008, Reno, Nevada, USA, pp.407-413.
8. *Weiss H H and Dolejsky K,* 'An investigation of the atmospheric pressure differences affecting the longitudinal ventilation of road tunnels', Paper D1, 5th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Organised by BHRG, France, May 1985.
9. *West A. and Pope C.W,* 'Wind induced flow and resistance measurements in a rock hewn tunnel', Paper D3, 5th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Organised by BHRG, France, May 1985. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Гендлер С.Г. — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный горный университет, e-mail: sgendler@mail.ru;
Кастанеда В.Н. — региональный менеджер по России и СНГ компании «Цитрон», e-mail: victor@zitron.com,
Белен А.Г. — компании «Цитрон».

