УДК 533.6.071.4

В.А.ПЛЕСКУНОВ, *аспирант, pleskunov.v@yandex.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

V.A.PLESKUNOV, *post-graduate student*, *pleskunov.v@yandex.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЕЗДА

В статье приведена методика определения аэродинамического сопротивления поезда, являющейся главной составляющей поршневого напора. Актуальность данной темы обусловлена существенным влиянием поршневого напора на распределение свежего воздуха по тоннелю и соответственно на безопасную эксплуатацию ж.д. тоннелей.

***Ключевые слова*:** сопротивление трения, сопротивление межвагонных пространств, лобовое сопротвление, поршневой напор.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE TRAIN AERODYNAMIC RESISTANCE

In paper the technique of definition of aerodynamic resistance of the train, a being main component of a piston pressure is resulted. The urgency of the given theme is caused by essential influence of a piston pressure on distribution of fresh air on a tunnel and accordingly on safe operation of railway tunnels.

Key words: resistance of a friction, resistance of intercarload spaces, front resistance, a piston pressure.

В соответствии с действующими нормативными документами при проектировании вентиляции железнодорожных тоннелей необходимо учитывать влияние естественных и эксплуатационных факторов [1]. При этом, основным эксплуатационным фактором, является поршневое действие поездов, приводящее к существенному увеличению количества воздуха, поступающего в тоннель [2].

На рис.1 представлены результаты натурных исследований, проведенных на трех километровом Лысогорском железнодорожном тоннеле, которые показывают, что на величину количества воздуха оказывают влияние: тип подвижного состава (товарные поезда, пассажирские поезда, одиночные поезда и т.п.) его длина и скорость движения (рис.1).

Прогнозная оценка поршневого эффекта невозможна без знания коэффициентов аэродинамического сопротивления подвижного состава: сопротивления трения воздуха о стенки вагонов, сопротивления межвагонных пространств, лобового сопротивления, сопротивления сужения и расширения воздушного потока соответственно при входе воздуха в зазор между поездом и стенкой тоннеля и при его выходе из зазора.

Для определения коэффициентов аэродинамического сопротивления подвижного состава было осуществлено физическое моделирования аэродинамических процессов при движении поезда по тоннелю. Анализ показал, что для соблюдения подобия аэродинамических процессов в натурных условиях и модели достаточно обеспечения геометрического подобия, связанного с равенством отношений гидравлических диаметров тоннеля $D_Т$ и подвижного состава $d_П$ $(d_П/D_Т)_Н = (d_П/D_Т)_М$. Это связано с тем, что обеспечение динамического подобия, устанавливае-

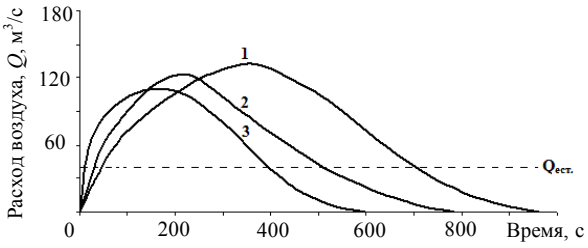


Рис.1 Изменение количества воздуха, поступающего в тоннель, за счет поршневого напора при различных типах подвижного состава

1 – товарные поезда; 2 – пассажирские поезда; 3 – одиночные локомотивы); $Q_{ест.}$ – количество воздуха, проходящее по тоннелю под действием естественной тяги

мого равенством чисел Рейнольдса в натуре и модели ($Re_н = Re_м$) в случае использования в качестве движущейся среды воздуха, потребовало бы достижения нереально высоких скоростей воздуха в модели, приводящих к необходимости описания аэродинамических процессов с помощью системы уравнений, существенно отличающейся от системы уравнений, характеризующей эти процессы в натурных условиях, что приведет к нарушению условий подобия. Вместе с тем, если в процессе проведения исследований окажется, что коэффициенты сопротивления подвижного состава, начиная с некоторой величины числа $Re_м$, будут оставаться постоянными и не зависящими от числа $Re_м$, т.е. выполняется условие автомодельности, то число Re может быть исключено из числа определяющих критериев.

Созданный на основе вышеуказанных принципов экспериментальный стенд (рис.2), является физической моделью Кузнецовского железнодорожного тоннеля, имеющего сечение 50 м^2. При миделевом сечении поезда 15 м^2, отношение гидравлических диаметров поезда и тоннеля, так называемый коэффициент заполнения, составит 0,3. В качестве модели подвижного состава выбрана модель, которая в масштабе 1:87 является идеальной копией реального подвижного состава. Модель тоннеля выполнена из огрстекла длиной 4 м, причем для выравнивания поля скоростей на входном сечении, куда вентилятором подается воздух, устанавливается специальная сетка. В процессе измерений модель поезда остается неподвижный относительно движения воздуха. Различные скорости воздуха, набегающего на модель подвижного состава, создаются при помощи вентилятора [3]. Измерения депрессии воздушного потока осуществлялись прибором ТАММ-20, а в качестве первичных датчиков использовались трубки Пито.

Экспериментальные исследования осуществлялись в два этапа. На первом этапе по стандартной методике были осуществлены измерения коэффициента аэродинамического сопротивления модели тоннеля при отсутствии подвижного состава [3]. В результате измерений и последующих вычислений величина коэффициента аэродинамического сопротивления модели (аэродинамического сопротивления трения) составила 0,0043.

Второй этап исследований был направлен на определение всех составляющих общего сопротивления поезда находящегося в тоннеле: $R_{тр}$ – сопротивления трения воздушного потока о стенки поезда; $R_{мв}$ – со-

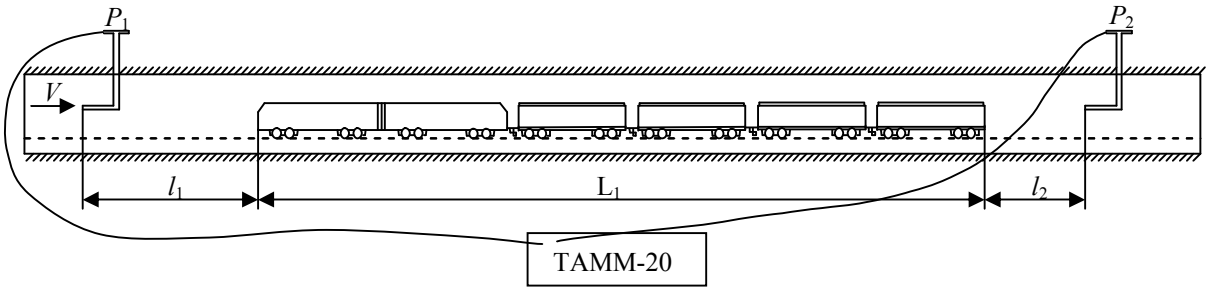


Рис.2. Схема экспериментально-исследовательского стенда по изучения аэродинамического сопротивления поезда

V – скорость движения воздуха, м/с; P_1 – давление в начале участка, Па; P_2 – давление в конце участка, Па; $l1$ – длина участка модели тоннеля от начала поезда до датчиков приема давления, м; l_2 – длина участка модели тоннеля от конца поезда до датчиков приема давления, м; $L1$ – длина поезда, м

противления межвагонных пространств; $R_л$ – лобовое сопротивление, оказываемое воздушному потоку препятствием на его пути в виде поезда; $R_с$ – сопротивления сужения воздушного потока при обтекании поезда; $R_р$ – сопротивления расширения при срыве струи с поверхности последнего вагона [1]:

$$R_п = R_{тр} + R_{мв} + R_л + R_с + R_р . \qquad (1)$$

Вначале был определен коэффициент сопротивления межвагонного пространства $\xi_{мв}$. Для этого при различных скоростях движения воздуха измерялась депрессия участка модели тоннеля с поездом при наличии межвагонных пространств (обычная сцепка вагонов) и депрессия того же участка с поездом без межвагонных пространств (вагоны составлены впритык). С учетом измеренных значений депрессии, рассчитывался коэффициент сопротивления единичного межвагонного пространства, значение которого составило 0,021:

$$\xi_{мв} = 2[(h_1 - h_2)(S_т - S_п)^2 S_т - \\ - \alpha_т P_т \upsilon_{ср}^2 S_т (L_1 - L_2) - \alpha_т P_т \upsilon_{ср}^2 \times \\ \times (S_т - S_п)^2 (l_2 - l_2^{/})]/ n\rho\upsilon_{ср}^2 S_т^3 , \qquad (2)$$

где h_1 – депрессия участка с поездом и с межвагонными пространствами, Па; h_2 – депрессия участка с поездом без межвагонного пространства, Па; $\alpha_т$ – коэффициент аэродинамического сопротивления модели тоннеля, Н·с^2/м^4; L_1 – длина участка модели тоннеля с поездом и с межвагонными пространствами (равна длине поезда с межвагонными пространствами), м; L_2 – длина участка модели тоннеля с поездом без межвагонных пространств (равна длине поезда без межвагонных пространств), м; l_2 – длина участка модели тоннеля от конца поезда до датчиков приема давления при L_1, м; $l^{/}_2$ – длина участка модели тоннеля от конца поезда до датчиков приема давления при L_2, м; n – число межвагонных пространств; $P_т$ – периметр тоннеля, м; $S_т$ – сечение тоннеля, м^2; $S_п$ – миделево сечение поезда, м^2; $\upsilon_{ср}$ – средняя скорость движения воздуха, м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м^3. Зависимость $\xi_{мв}$ от числа $Re_м$ представлена на рис.3.

Далее определяется коэффициент сопротивления трения воздуха о стенки поезда $\alpha_{тр.п.}$. Для этого при различных скоростях движения воздуха были измерены депрессии участка с поездом, состоящим из локомотива и одного вагона, и депрессии того же участка с поездом, состоящим из локомотива и четырех вагонов. Коэффициент сопротивления трения воздуха о стенки поезда рассчитывался по формуле (3) и равен 0,0025:

$$\alpha_{тр.п.} = S_п[S_т(h_2 - h_1)(S_т - S_п)^2 - \\ - \alpha_т P_п \upsilon_{ср}^2 S_т^2 (L_2 - L_1) - \alpha_т P_т \upsilon_{ср}^2 (S_т - S_п)^2 \times \\ \times (l_2^{/} - l_2)]/P_п(L_2 - L_1)\upsilon_{ср}^2 S_т^3 , \qquad (3)$$

где h_1 – депрессия участка с поездом, состоящим из локомотива и одного вагона, Па; h_2 – депрессия участка с поездом, состоящим из локомотива и четырех вагонов, Па; $P_п$ – периметр поезда, м; L_1 – длина поезда состоящего из локомотива и одного вагона, м; L_2 – длина поезда состоящего из локомотива и четырех вагонов, м; l_2 – длина участка тоннеля от последнего вагона до датчика приема давления при длине поезда L_1, м; $l^{/}_2$ – длина участка тоннеля от последнего вагона до датчика приема давления при длине поезда L_2, м (рис.3).

Последняя серия измерений была направлена на определение суммарного аэродинамического коэффициента формы подвижного состава $C_ф$, объединяющего коэффициент лобового сопротивления, коэффициенты местного сопротивления сужения и расшире-

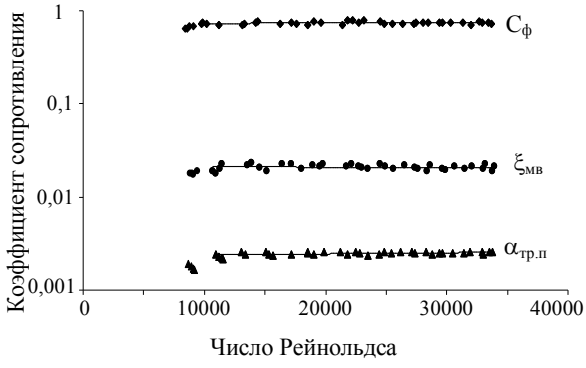


Рис.3 График зависимости коэффициентов сопротивления поезда от числа Рейнольдса

ния воздушного потока на входе в зазор между поверхностью подвижного состава и стенкой тоннеля и на выходе из этого зазора:

$$C_{\text{ф}} = 2[S_{\text{т}}S_{\text{п}}(h_2 - h_1)(S_{\text{т}} - S_{\text{п}})^2 - \alpha_{\text{тр.п.}}P_{\text{п}}L_1\upsilon_{\text{ср}}^2S_{\text{т}}^3 - \\ - \alpha_{\text{т}}P_{\text{п}}L_1\upsilon_{\text{ср}}^2S_{\text{т}}^2S_{\text{п}} - \alpha_{\text{т}}P_{\text{т}}\upsilon_{\text{ср}}^2S_{\text{п}}(l_1 - l_1^{/}) \times \\ \times (S_{\text{т}} - S_{\text{п}})^2 - \alpha_{\text{т}}P_{\text{т}}l_2\upsilon_{\text{ср}}^2S_{\text{п}}(S_{\text{т}} - S_{\text{п}})^2]/ \\ /\rho\upsilon_{\text{ср}}^2S_{\text{т}}S_{\text{п}}(S_{\text{т}} - S_{\text{п}})^2, \qquad (4)$$

где h_1 – депрессия участка без поезда, Па; h_2 – депрессия участка с поездом, Па; $P_{\text{т}}$ – периметр тоннеля, м; $l_1^{/}$ – длина модели тоннеля без поезда, м; l_1 – длина участка модели тоннеля от начала поезда до датчиков приема давления, м. Среднее значение $C_{\text{ф}}$ составило 0,741 (рис.3).

Анализ графиков зависимостей $\xi_{\text{мв}}$, $\alpha_{\text{тр.п}}$ и $C_{\text{ф}}$ от числа $\text{Re}_{\text{м}}$, представленных на рис.3, свидетельствует о том, что уже начиная с числа $\text{Re}_{\text{м}}$, равного 13000, эти коэффициенты оказываются независимыми от числа $\text{Re}_{\text{м}}$, т.е. достигается вышеупомянутый режим автомодельности, позволяющий распространить определенные на модели значения коэффициентов аэродинамического сопротивления подвижного состава, на условия эксплуатации Кузнецовского железнодорожного тоннеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамович Г.Н.* К расчету воздушного сопротивления поезда на открытой трассе и в тоннеле // Труды центрального аэрогидродинамического института. 1939. Вып. 400. 31 с.

2. *Гендлер С.Г.* Проблемы проветривания транспортных тоннелей// Горный информационно-аналитический бюллетень. Тематическое приложение. Безопасность. 2005. С. 281-295.

3. Мостепанов Ю.Б. Влияние движущегося поезда на проветривание тоннелей / Ю.Б.Мостепанов, А.Н.Веденин // Вентиляция шахт и рудников. 1982. Вып. 9. С. 29-32.

REFERENCES

1. *Abramovich G.N.* To calculation of air resistance of a train on the open line and in a tunnel// Works of the central aero-hydrodynamical institute. 1939. R. 400. 31 p.

2. *Gendler S.G.* Problems of ventilation of vehicle tunnels// The Mining Information and Analytical Bulletin. The Topical Applications. Safety. 2005. P. 281-295.

3. *Mostepanov Y.B.* Influence of a moving train on airing of tunnels / Y.B.Mostepanov, A.N.Vedenin // Ventilation of mines and ore mines. 1982. R.9. P. 29-32.