

УДК 629.33: 593.3

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДАЧИ СЖАТОГО ВОЗДУХА НА ФРИКЦИОННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТОРМОЗНОГО МЕХАНИЗМА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА СОПЛА ЛАВАЛЯ

© Д.Г. Мясищев, д-р техн. наук, проф.  
А.С. Ващуткин, канд. техн. наук, ст. преп.  
А.М. Швецов, асп.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002; e-mail: d.myasishchev@narfu.ru

Для охлаждения тормозных механизмов барабанного типа лесотранспортных машин и выноса продуктов износа из зоны трения рекомендовано подавать сжатый воздух на фрикционные поверхности механизма. Установлено, что для повышения коэффициентов эффективности и стабильности тормозного механизма необходимо подавать сжатый воздух в зону трения перед процессом торможения, т. е. перед тем, как тормозные колодки соприкоснуться с тормозным барабаном. В этом случае, в процессе торможения будут участвовать более очищенные фрикционные поверхности. При проведении эксперимента на компьютеризированном однорамном тормозном стенде (экран «люкс» 28", 15Т / 2\* 11кВт /44803, модель 7515–М 11FP NORD+102561 фирмы «Muller-BEN», сер. № 330) установлено, что подача сжатого воздуха перед процессом торможения повышает тормозную силу на экспериментальном колесе автомобиля ЗИЛ ММЗ-554 на 14 %. Требовалось теоретически обосновать полученный результат и предложить математическую модель процесса истечения сжатого воздуха по фрикционным поверхностям. Авторы обратили внимание на то, что газ на фрикционных поверхностях тормозного механизма ведет себя как газ, истекающий из сопла Лавалья. Поэтому в статье процесс истечения воздуха по поверхностям тормозного механизма рассматривается как процесс истечения газа через сопло. Сопло состоит из пары усеченных конусов, сопряженных узкими концами. Известно, что при дозвуковой скорости движения газа сопло сужается, при сверхзвуковой – расширяется; при движении газа со скоростью, равной скорости звука, площадь поперечного сечения сопла достигает экстремума, т. е. оно имеет самое узкое сечение, называемое критическим. Согласно полученным данным, были сделаны следующие выводы: сжатый воздух, который поступает из подводящих штуцеров на фрикционные поверхности тормозного механизма в процессе их срабатывания, гипотетически ведет себя как газ, который протекает через сопло Лавалья; охлаждение фрикционных поверхностей тормозного механизма в процессе торможения, вынос продуктов износа из зоны трения, влаги и грязи, а также баланс сил, нормальных к фрикционным поверхностям, можно рассматривать физические явления, которые характерны для газа, проходящего через сопло Лавалья и омывающего (в нашем случае) фрикционные поверхности; для анализа протекания данного физического процесса требуется выполнить его качественное математическое описание и провести ряд точных экспериментов.

**Ключевые слова:** сопло Лавалья, локальная плотность газа, локальное давление газа, локальная скорость газа, локальная скорость звука газа, тормозной механизм, зазор.

Задачей данного исследования является разработка описания процесса истечения сжатого воздуха через зазор между фрикционными поверхностями автомобильного колодочного или иного тормозного механизма в процессе торможения с учетом предполагаемого эффекта сопла Лавалья.

В работе [1] сказано, что для повышения эффективности барабанно-колодочных тормозных механизмов требуется принудительно их охлаждать и очищать, т. е. подавать сжатый воздух на их фрикционные поверхности. При этом целесообразно подавать в зону фрикционных поверхностей механизма перед соприкосновением барабаном во время процесса торможения. Данный тормозной механизм показан на рис. 1.

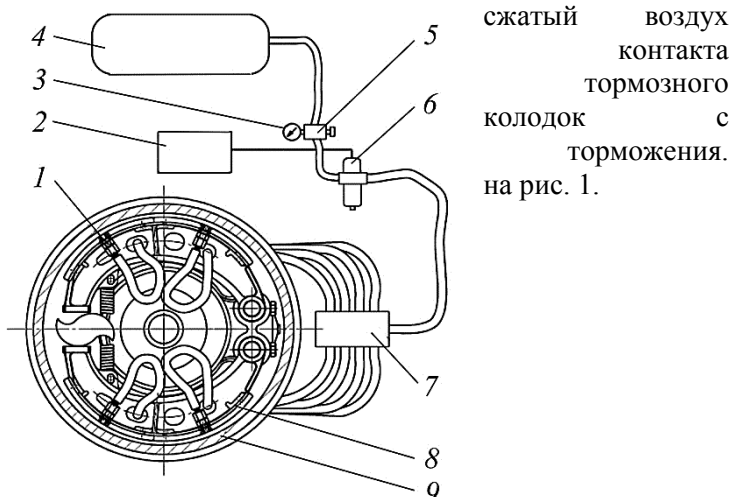


Рис. 1. Принципиальная схема подвода сжатого воздуха к тормозному механизму: 1 – штуцер; 2 – тормозной кран управления автомобиля; 3 – манометр; 4 – ресивер; 5 – редуктор; 6 – электромагнитный клапан; 7 –

Зазор между тормозным барабаном и тормозными колодками меняется в процессе торможения от максимального до минимального значения. Минимальный зазор соответствует зазору, при котором колодки соприкасаются с тормозным барабаном. Его величина зависит от неровностей поверхностей фрикционных пар, степени их износа и шероховатости. Усредненный максимальный зазор определяется зазором между барабаном и колодками, когда последние находятся в расторможенном состоянии после процесса торможения.

Осуществление подачи сжатого воздуха на фрикционные поверхности тормозного механизма, перед соприкосновением тормозных колодок с тормозным барабаном в процессе торможения, можно описать следующим образом [2]. В начальный момент торможения сжатый воздух под давлением выходит из штуцеров тормозных колодок в зазор между фрикционными поверхностями тормозных механизмов. При продолжении процесса торможения тормозные колодки соприкасаются с поверхностью барабана, и сжатый воздух выходит через минимальный зазор, который, как было сказано выше, обеспечивается неровностями поверхностей фрикционных пар, степенью их износа и шероховатостью. В дальнейшем колодки отходят от поверхности тормозного барабана, но воздух продолжает поступать через появившийся зазор, а из него в атмосферу. По истечении времени подача сжатого воздуха прекращается.

Анализ этого процесса показал, что подача сжатого воздуха и его истечение через зазор между фрикционными поверхностями тормозного механизма в процессе торможения аналогичен истечению газа через сопло Лавала [3]. При этом самым узким сечением «виртуального» сопла Лавала является минимальный зазор, который наблюдается при соприкосновении тормозных колодок с тормозным барабаном. Выходным сечением сопла служит зазор, который обеспечивается при отжати тормозных колодок от поверхности тормозного барабана. Данный зазор может определяться различными конструктивными формами фрикционных поверхностей тормозных колодок и тормозного барабана.

При проведении эксперимента на компьютеризированном однорамном тормозном стенде (экран «люкс» 28", 15Т / 2\* 11кВт / 44803, мод. 7515–М 11FP NORD+102561, фирмы «Muller-BEN», сер. № 330) получены следующие входные параметры сопла и характеристики сжатого воздуха: диаметры подводящих отверстий штуцеров  $d_o = 5,9$  мм, давление сжатого воздуха на входе в штуцера  $P_b = 0,6$  МПа. Они определяются размерами штуцеров (их диаметрами и продольным профилем), установленных в контртело тормозных колодок, и регулировкой пневмопривода. При этом все подводящие отверстия идеализировано могут быть приведены к некоторому одному входному соплу.

Рассмотрим физическую суть прохождения сжатого воздуха через сопло Лавала\*.

Сопло представляет собой канал, суженный в середине. В простейшем случае (рис. 2) такое сопло может состоять из пары усеченных конусов, сопряженных узкими концами.

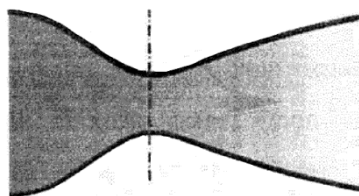


Рис. 2. Сопло Лавала

Феномен ускорения газа до сверхзвуковых скоростей в сопле Лавала был обнаружен в конце XIX в. экспериментальным путем. Позже это явление нашло теоретическое объяснение в рамках газовой динамики [3].

\* Техническое приспособление было предложено в 1890 г. изобретателем Густавом де Лавалем для паровых турбин. В настоящее время широко используется на некоторых типах паровых турбин и является важной частью современных ракетных авиационных двигателей.

При анализе течения газа в сопле Лавалья принимаются следующие допущения: газ считается идеальным; газовый поток является изоэнтропным и адиабатическим; газовое течение является стационарным и одномерным; массовый расход газа одинаков во всех поперечных сечениях потока; влияние всех внешних сил и полей пренебрежимо мало; ось симметрии сопла является пространственной координатой  $x$ .

Отношение локальной скорости  $v$  к локальной скорости звука  $C$  обозначается числом Маха, которое также понимается местным, т. е. зависимым от координаты  $x$  [3]:

$$M = v / C. \quad (1)$$

Из уравнения состояния идеального газа [3] имеем

$$dp / \rho = C^2, \quad (2)$$

где  $p$  – локальное давление, МПа;

$\rho$  – локальная плотность, г/см<sup>3</sup>.

С учетом этого, а также с учетом стационарности и одномерности потока, уравнение Эйлера принимает следующий вид:

$$v \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{d\rho} \frac{d\rho}{dx} = -\frac{C^2}{\rho} \frac{d\rho}{dx}. \quad (3)$$

Преобразуем формулу (3) с учетом (1):

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} = -M^2 \frac{1}{v} \frac{dv}{dx} \quad \text{или} \quad \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} / \frac{1}{v} \frac{dv}{dx} = -M^2. \quad (4)$$

Правые части уравнений (4)  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx}$  и  $\frac{1}{v} \frac{dv}{dx}$  характеризуют относительную степень изменчивости по координате  $x$  соответственно плотности и скорости газа. Причем уравнения (4) показывают, что соотношение между этими величинами равно квадрату числа Маха (знак минус означает противоположную направленность изменений: при возрастании скорости плотность убывает). Таким образом, на дозвуковых скоростях ( $M < 1$ ) плотность меняется в меньшей степени, чем скорость, а на сверхзвуковых ( $M > 1$ ) – наоборот.

Поскольку массовый расход газа постоянен, то

$$\rho v A = \text{const} \quad \text{или} \quad \ln \rho + \ln v + \ln A = \ln(\text{const}), \quad (5)$$

где  $A$  – площадь местного сечения сопла, мм<sup>2</sup>.

Дифференцируя обе части уравнения (5) по  $x$ , получаем

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} + \frac{1}{v} \frac{dv}{dx} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = 0. \quad (6)$$

После подстановки из уравнений (4) в уравнение (6) имеем:

$$\frac{dA}{dx} = \frac{A}{v} \frac{dv}{dx} (M^2 - 1). \quad (7)$$

При увеличении скорости газа в сопле знак выражения  $\frac{A}{v} \frac{dv}{dx}$  положителен, следовательно, знак производной  $\frac{dA}{dx}$  определяется знаком выражения  $M^2 - 1$ .

При этом известно:

1. При дозвуковой скорости движения газа ( $v < C$  и  $M < 1$ ) производная  $dA/dx < 0$ , т. е. сопло сужается.

2. При сверхзвуковой скорости движения газа ( $v > C$  и  $M > 1$ ) производная  $dA/dx > 0$ , т. е. сопло расширяется.

3. При движении газа со скоростью, равной скорости звука ( $v = C$  и  $M = 1$ ), производная  $dA/dx = 0$  – площадь поперечного сечения сопла, достигает экстремума, т. е. оно имеет самое узкое сечение, называемое критическим.

Газ, перемещаясь по соплу, расширяется, его температура и давление падают, скорость возрастает. Внутренняя энергия газа при этом преобразуется в кинетическую энергию его направленного движения, т. е. происходит ускорение потока. Газ, проходя через сопло на значительной скорости, не успевает передать его стенкам заметное количество своей тепловой энергии, что позволяет считать процесс адиабатическим.

#### *Выводы*

1. Сжатый воздух, который поступает из подводящих штуцеров на фрикционные поверхности тормозного механизма в процессе их срабатывания, гипотетически ведет себя как газ, который протекает через сопло Лавала.

2. Для экспериментального образца колеса при оптимальных значениях  $d_o = 5,9$  мм,  $P_b = 0,6$  МПа получены предварительные параметры моделирования сопла:  $v = 364,27$  м/с;  $C = 301,97$  м/с;  $M = 1,2$ . Площадь поперечного сечения виртуального сопла –  $0,0034$  м<sup>2</sup>. Это дает право утверждать, что имеет место сопло Лавала.

3. Для анализа протекания данного физического процесса потребуется выполнить его качественное математическое описание и провести ряд точных экспериментов на опытном колесе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вашуткин А.С., Мясников Д.Г.* Анализ функционирования барабанных тормозных механизмов автолесовозов и пути улучшения их показателей // Лесн. журн. 2010. № 3. С. 61–68. (Изв. высш. учеб. заведений).

2. *Вашуткин А.С.* Улучшение эксплуатационных свойств тормозной системы лесотранспортных машин: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 139 с.

3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика: учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов. 4-е изд., стер. М.: Наука, 1973. 1988. 733 с.

Поступила 06.03.14