

## ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

Влияние некоторых параметров на коэффициент трения и коэффициент сопротивления в воздуховодах фирмы DEC, а также на изгибах воздуховодов было исследовано организацией TNO, отчет 90-042/R.24/LIS. Исследовалось влияние следующих параметров: тип воздуховода, диаметр воздуховода, сжатие (по длине), направление потока, скорость воздуха и форма изгиба. Результаты этого исследования показали:

- Тип воздуховода влияет на коэффициент трения только в тех воздуховодах, которые были полностью растянуты (0% сжатия).
- Степень сжатия оказывает большое влияние на коэффициент трения. 5% -ое сжатие может привести к удвоению коэффициента трения. И тогда влияние типа воздуховода оказывается пренебрежимо малым.
- Влиянием диаметра воздуховода (102 мм - 305 мм), скорости воздуха (2 м/с - 6 м/с) и направления потока на коэффициент трения можно пренебречь.
- Коэффициент сопротивления сильно зависит от типа воздуховода.

Результаты исследования показаны на графиках падения давления.

# ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

D	диаметр воздуховода	[м]
f	коэффициент трения	[-]
i	сжатие в процентах по формуле (3)	[-]
k	шероховатость стенки	[м]
L	фактическая длина воздуховода	[м]
L <sub>е</sub>	эквивалентная длина согласно формуле	[м]
L <sub>і</sub>	длина входного участка	[м]
L <sub>м</sub>	максимальная длина воздуховода	[м]
Δ <sub>р</sub>	потеря давления	[Па]
P <sub>б</sub>	барометрическое давление	[мБар]
P <sub>н</sub>	давление в испытательной камере	[Па]
R	радиус изгиба	[м]
Re	показатель Рейнольдса	[-]
T	температура	[°С]
U	средняя скорость	[м/с]
λ	коэффициент сопротивления	[-]
ν	кинематическая вязкость	[м <sup>2</sup> /с]
ρ	плотность	[кг/м <sup>3</sup> ]

# ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

## 5.1. ВВЕДЕНИЕ

Потеря давления в воздуховоде, состоящем из одного или нескольких прямых участков и нескольких изгибов, зависит, в числе прочего, от коэффициентов трения воздуховода и коэффициента сопротивления изгибов.

Для определения падения давления в воздуховоде необходимо знать эти коэффициенты. Влияние некоторых параметров на эти коэффициенты было измерено организацией TNO. При исследовании воздухопроводов оценивали влияние на коэффициент трения следующих параметров:

- тип воздуховода
- диаметр воздуховода
- степень сжатия
- направление потока
- скорость воздуха

При исследовании **изгибов** оценивали влияние на коэффициент сопротивления следующих параметров:

- форма изгиба
- тип воздуховода

при проведении исследования использовали измерительную установку, изображенную на рис. 3.

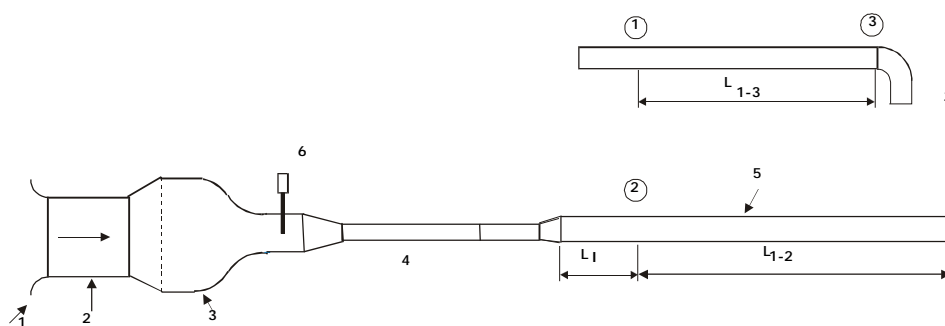


Рис. 3

Формулы, по которым определяется падение давления на прямом участке или на изгибе, будут приведены в параграфе 5.2.

Далее мы рассмотрим влияние диаметра воздуховода, шероховатости внутренних стенок воздуховода и числа Рейнольдса на коэффициент трения.

После этого будет рассмотрена эквивалентная длина изгибов.

# ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

## 5.2. ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Как правило, смонтированный воздуховод имеет несколько прямых участков и несколько изгибов. При протекании газа через такой воздуховод на каждом прямом участке и на каждом изгибе будет наблюдаться падение давления. Для определения напора вентилятора необходимо определить падение давления на каждом прямом участке и на каждом изгибе воздуховода.

### ПРЯМОЙ УЧАСТОК ВОЗДУХОВОДА

Падение давления (также называется потеря давления или сопротивление) на прямом участке воздуховода может быть вычислено по следующей формуле:

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho U^2$$

$\rho$	=	потеря давления	[Па]
$f$	=	коэф-т трения воздуховодов	[-]
$L$	=	фактическая длина воздуховода	[м]
$D$	=	диаметр воздуховода	[м]
$\rho$	=	плотность газа	[кг/м <sup>3</sup> ]
$U$	=	средняя скорость	[м/с]

Из этой формулы вытекает следующее:

- 1 падение давления пропорционально коэф-ту трения
- 1 падение давления пропорционально плотности газа. Для воздуха (сухого) плотность равна:

$$\rho = 1.293 \cdot \frac{P_b}{1013} \cdot \frac{273}{273 + T}$$

$P_b$	=	барометрическое давление в миллибарах
$T$	=	температура, °C

Из графика Муди [1] для воздуховодов следует, что:

- 1 коэф-т трения слабо уменьшается при увеличении числа Рейнольдса ( $Re = U \cdot D / \nu$ )
- 1 коэф-т трения уменьшается при уменьшении относительной шероховатости  $k/D$

Отсюда вытекает, что:

- 1 коэф-т трения слабо уменьшается при увеличении скорости (за счет увеличения числа Рейнольдса)
- 1 коэф-т трения уменьшается при увеличении диаметра, если шероховатость стенок остается той же самой (за счет увеличения числа Рейнольдса и уменьшения относительной шероховатости)

# ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

Шероховатость стенок определяется:

- 1 типом воздуховода
- 1 степенью сжатия

Степень сжатия вычисляют следующим образом:

$$i = \frac{L_m - L}{L_m} \cdot 100\%$$

- $L_m$  макс. длина воздуховода
- $L$  фактическая длина воздуховода

Влияние воздуховода на коэф-т трения определяли при сжатии 0%, поэтому фактическая длина воздуховода была равна максимальной длине.

## ИЗГИБЫ

Падение давления на конце воздуховода можно определить по следующей формуле:

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho U^2$$

- $\Delta p$  = потеря давления [Па]
- $\zeta$  = коэф-т сопротивления на изгибе [-]
- $\rho$  = плотность газа [кг/м<sup>3</sup>]
- $U$  = средняя скорость [м/с]

Падение давления на изгибе воздуховода больше, чем падение давления в сварном колене с таким же диаметром и радиусом кривизны, так как потери на трении в изгибе значительно больше. В металлическом колене внутренняя стенка является гладкой, в отличие от изгиба воздуховода, особенно, если внутренняя часть изгиба сильно сжата. В связи с этим обтекаемая поверхностью становится меньше, и скорость потока возрастает.

## ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДЛИНА

Эквивалентная длина изгиба представляет собой длину прямого участка, падение давления на которой равно падению давления на данном изгибе. Эквивалентная длина вычисляется по формулам:

$$\Delta p_s = f \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho U^2$$

$$\Delta p_b = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho U^2$$

## ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

Для  $\rho_s = \rho$  формула

принимает следующий вид:

$$f \frac{L_e}{D} = \zeta$$

$$L_e = \frac{\zeta}{f} \cdot D$$

Эквивалентные длины подвергшихся испытаниям воздухопроводов Aludec® 70 определяли по этой формуле.

Ø 102 мм

### 5.3. ДИАМЕТР

У четырех типов воздухопроводов из пяти, подвергшихся испытаниям, коэф-т трения практически не зависел от диаметра воздуховода. Только у воздуховода Greydec® 100 наблюдалось увеличение коэф-та трения при увеличении диаметра. Установлено, что если шероховатость стенок воздуховода остается той же самой, то коэф-т трения должен *уменьшаться*, когда диаметр *увеличивается*. Увеличение коэф-та трения можно объяснить, если предположить, что воздуховод Greydec® диаметром 203 мм и 305 мм имели некоторое сжатие, хотя они были растянуты до максимальной паспортной длины. Если результаты измерений воздухопроводов Greydec® 100 исключить из рассмотрения, то влиянием диаметра воздуховода на коэф-т трения можно пренебречь.

### 5.4. СКОРОСТЬ

В гибких воздуховодах коэф-т трения слабо уменьшается по мере увеличения скорости. Установлено, что так обстоит дело с воздуховодами Greydec® 100, Aludec® 70 и Aludec® AA3, но это в меньшей степени касается Aludec® 112 и Sonodec® 25. Как правило, влияние скорости на коэф-т трения является незначительным. Им можно пренебречь по сравнению с влиянием типа воздуховода и степени сжатия.

### 5.5. НАПРАВЛЕНИЕ ПОТОКА

Коэф-т трения воздухопроводов Aludec® 70 измеряли для обоих направлений потока. Вследствие способа изготовления воздуховода поток в одном направлении испытывает внезапное (очень небольшое) *сужение* на каждом нахлесте витков, а в другом направлении внезапное (очень небольшое) *расширение*. В результате этих измерений было установлено, что среднее значение коэф-та трения в одном направлении отличается от коэф-та трения в другом направлении на 5%. Как правило, этой разницей можно пренебречь.

## ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

### 5.6. СЖАТИЕ

Сжатие воздуховодов оказывает большое влияние на коэф-т трения (рис. 4). Установлено, что если воздуховод сжат всего на 5%, это уже вызывает примерно удвоение коэф-та трения (рис. 4). Очевидно, что шероховатость внутренней стенки воздуховода сильно возрастает, даже если сжатие является очень маленьким. На рис. 4 показано, что коэф-т трения возрастает почти линейно во время сжатия, при условии, что сжатие не превышает 20%. На каждый процент сжатия коэф-т трения увеличивается примерно на 0,01. Если воздуховод сжат только на 3%, то коэф-т трения увеличивается примерно на 0,03. Увеличение является одинаковым для всех пяти типов воздуховодов, прошедших испытания, несмотря на различия между ними.

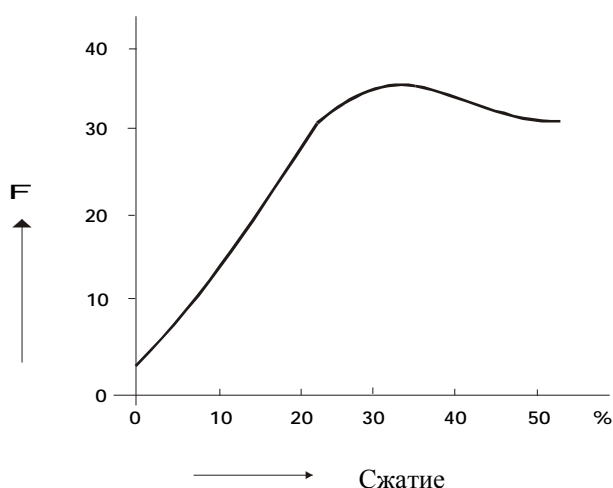


рис. 4

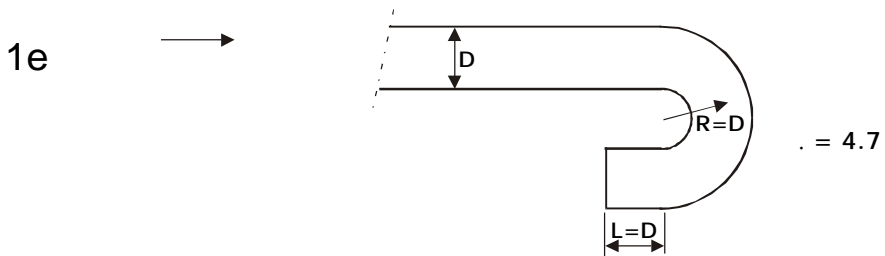
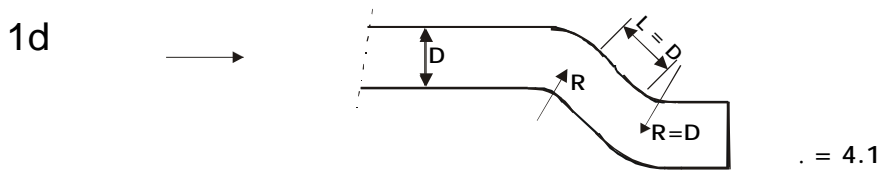
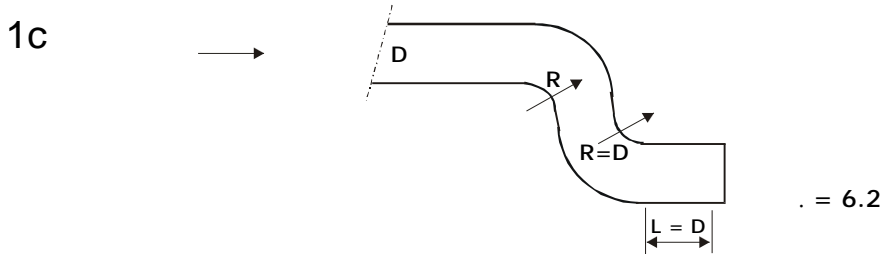
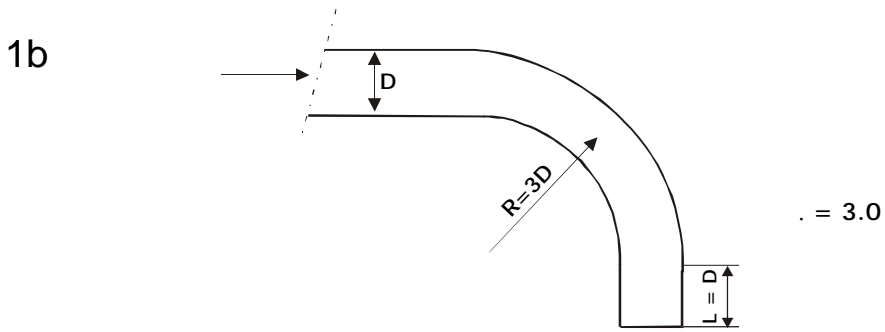
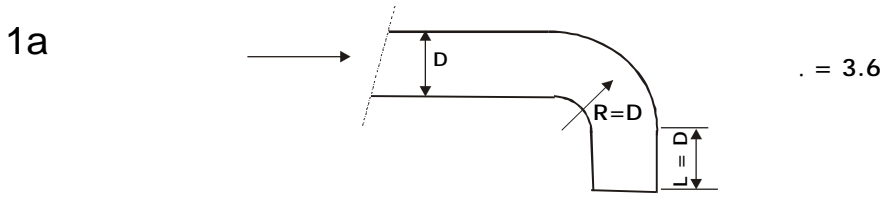
### 5.7. ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Из вышесказанного следует, что влиянием диаметра воздуховода, скорости воздуха и направления потока на коэф-т трения можно пренебрегать. Установлено также, что степень сжатия по формуле оказывает большее влияние, чем тип воздуховода. Для определения степени сжатия по формуле 4 необходима информация о максимальной длине соответствующего воздуховода. Однако максимальная длина зависит от величины усилия, прикладываемого для определения этой длины. Кроме того, определенное усилие в воздуховоде малого диаметра вызывает большие напряжения растяжения, чем в воздуховоде *большого* диаметра с той же толщиной стенки. В проведенном исследовании коэф-ты трения для различных типов воздуховодов применяли только для воздуховодов, растянутых той же длины, что и воздуховод, подвергшийся испытаниям.

# ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

КОЭФФИЦИЕНТ

Ы СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБОВ

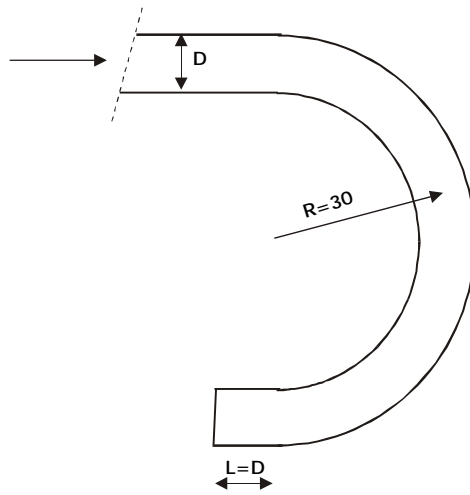




# ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

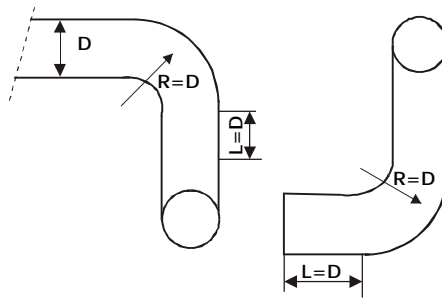
## КОЭФФИЦИЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБОВ

2a



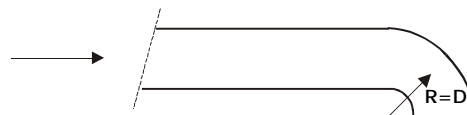
$\xi = 5.1$

2b



$\xi = 4.8$

2c



GREYDEC® 100 2.2  
 ALUDEC® 112 2.5  
 ALUDEC® AA3 2.7  
 SONODEC® 25 2.7

## ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

### 5.8. КОЭФФИЦИЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБОВ

Коэффициенты сопротивления изгибов приведены на рис. 1 и 2. Установлено, что скорость воздуха почти не оказывает влияния на величину коэффициента сопротивления. На рис. 1а, 1b, 2а и 2b показано, что увеличение радиуса кривизны  $90^\circ$ -ного изгиба приводит к *уменьшению* коэф-та сопротивления. Однако  $180^\circ$ -ный изгиб демонстрирует *увеличение* сопротивления. Это противоречит всем ожиданиям. Вероятно, это обусловлено незначительной разницей в шероховатости поверхности у данных изгибов, так как степень сжатия у них будет разной. Причиной могут быть и различия в модели потока у этих изгибов. Тип воздуховода, по-видимому, оказывает лишь незначительное влияние на коэф-т сопротивления данных изгибов (рис. 2с). Этого следовало ожидать. Внутренняя сторона изгиба всегда сжата таким образом, что ее шероховатость гораздо больше шероховатости воздуховода (максимально растянуто).

### 5.9. ГРАФИКИ ПАДЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Для различных типов воздуховодов фирмы DEC и изгибов были построены графики падения давления. **На графиках показано падение давления на метр длины воздуховода для воздуха с температурой  $0^\circ\text{C}$ .**

Графики для различных типов воздуховодов приведены на следующих рисунках

GREYDEC® 100	(f=0.033)
ALUDEC® 70	(f=0.037)
ALUDEC® 112	(f=0.053)
ALUDEC® AA3	(f=0.031)
SONODEC® 25	(f=0.053)

Графики для воздуховодов **ALUDEC 112** и **SONODEC 25** являются идентичными. Если воздуховод имеет температуру, отличающуюся от  $0^\circ\text{C}$ , падение давления необходимо умножить на поправочный коэффициент, равный  $273/(273+T)$ .

Еще раз подчеркнем, что данные графики относятся к максимально растянутым воздуховодам (сжатие 0%). На рис. 10 и 11 приведены графики падения давления на изгибах, соответствующих рисункам 1 и 2. **Эти графики относятся к воздуху с температурой  $0^\circ\text{C}$ .** На них также распространяется правило, что если воздух имеет температуру, отличную от  $0^\circ\text{C}$ , падение давления должно быть умножено на поправочный коэф-т. При построении графиков были использованы коэф-ты сопротивления, указанные на рис 1 и 2. Для изгиба, соответствующего рис 2с, использовали среднее значение измеренного коэффициента, равное (2.6).

## ПОТЕРЯ ДАВЛЕНИЯ

### 5.10. ВЫВОДЫ

- q На измерительном стенде были определены коэф-ты трения для пяти различных типов воздухопроводов фирмы DEC. Результаты показы на графике. Приведенные коэф-ты трения относятся к воздуховодам, имеющим сжатие 0%. По сравнению с влиянием сжатия воздуховода влияние диаметра воздуховода, скорости воздуха и направления потока на коэф-т трения является пренебрежимо малым.
- q Небольшое сжатие воздуховода по длине приводит к сильному увеличению коэффициента трения. При сжатии примерно 5% наблюдается удвоение коэффициента трения.
- q Графики для различных типов воздухопроводов построены на основе измеренных коэффициентов трения.
- q Были измерены коэффициенты сопротивления для восьми различных изгибов. Очевидно, что эти коэффициенты не зависят от скорости воздуха, а тип воздуховода оказывает лишь незначительное влияние. Коэффициенты сопротивления изгибов воздуховода представлены на рис. 1 и 2.
- q Графики для различных типов воздухопроводов построены на основе измеренных коэффициентов трения.
- q Если воздух имеет температуру отличную от 0°C, то падение давления должно быть умножено на поправочный коэффициент  $273/(273+T)$ .
- q Воздуховоды, поставляемые фирмой DEC могут классифицироваться по расстоянию между витками проволоки. Наиболее сильное влияние на падение давления оказывает степень сжатия. Поэтому графики падения давления были построены фирмой DEC по данным воздухопроводов следующих типов:

<b>Тип воздуховода:</b>	<b>График построен по данным для:</b>
ALUDEC® 2(45)	ALUDEC® 112
COMBIDEC® 2100 / ALUDEC® AA3	ALUDEC® 70
COMBIDEC® 2300	ALUDEC® 112
PVC WHITE	ALUDEC® 70
ISODEC® 25	SONODEC® 25
ISODEC® 250	ALUDEC® 112
GLX	ALUDEC® 112
TRD	SONODEC® 25
GREYDEC® HP	GREYDEC®
SONODEC® 25A	SONODEC® 25
GX 21	ALUDEC® 112

