Записки Ленинградского Горного Института, том XII, вып. 3, 1939
Annales de l'Institut des Mines à Leningrad, vol. XII, liv. 3, 1939

Определение коэфициентов сопротивления поворотов вентиляционных каналов при одновременном расширении их

Доц. В. Б. Комаров и ассист. А. А. Гескин

Definition of the coefficient of resistance of the ventilation ducts at the point of their bending with simultaneous widening

Doc. W B. Komaroff and assist. A. A. Gueskin

§ 1. Введение

В 1936 г. в лаборатории рудничной вентиляции доц. В. Б. Комаровым и ассист. А. А. Гескиным была выполнена работа по определению коэфициентов сопротивления поворотов вентиляционных трубопроводов при одновременном сужении их[1].

Эта работа ставила перед собой задачу определения коэфициентов сопротивления поворотов каналов рудничных вентиляторов, различным образом спроектированных.

Работа распадалась на две части: а) определение коэфициентов поворота при одновременном сжатии струи воздуха, б) определение коэфициента поворота при одновременном расширении струи воздуха.

Вторая часть работы по причинам, от авторов не зависящим, не была выполнена.

Данная работа представляет вторую часть определения коэфициентов сопротивления поворотов каналов. Работ, уточняющих эти коэфициенты, опубликовано очень мало. Имеющиеся работы по данному вопросу касаются коэфициентов поворотов и расширений для гладких трубопроводов. Как на одну из наиболее новых и полных работ следует указать исследования Нипперта.[2]

Экспериментальная часть работы была нами выполнена на той же аэродинамической трубе, на которой выполнялась работа по определению коэфициентов поворота при сжатии струи воздуха. Это деревянная труба, прямоугольного сечения 400×300 *мм*, установленная в лаборатории рудничной вентиляции Ленинградского горного института. На рис. 1 дан эскиз этой трубы. Труба имеет колено под углом 90°, длиною в 5 *м*. Сопряжение колена с трубой представляет ящик, в котором один из углов скошен под углом 45° Благодаря наличию этого

[1] См. Сборник по рудничной вентиляции под редакцией ак. Скочинского А. А., том II. — В. Б. Комаров и А. А. Гескин — „Лабораторное определение коэфициентов сопротивления поворотов воздухопроводов при одновременном сжатии их" (Печатается).

[2] Nippert. Ueber den Strömungsverlust in gekrümmten Leitungen. Forschungsarbeiten aus dem Gebiet des Ingenieurwesens. V. D. I., Heft 320, 1929.

скоса имеется возможность вставлять в угловой ящик ряд вставок, превращающих поворот по желанию в поворот с острыми, закругленными или скошенными внутренними кромками. Для того чтобы сузить часть трубы, расположенную до поворота, в нее вставлялась продольная деревянная перегородка такой же длины как и само колено, т. е. 5 метров.

Все съемные детали трубы (крышки, модели поворотов, продольные перегородки) тщательно укреплялись в ней и все пазы уплотнялись листовой резиной, а затем все швы промазывались смесью мастики и мыла. Такое уплотнение давало неплохие результаты и вполне гарантировало от возможных утечек воздуха. Воздух всасывался вентилятором „Сирокко", приводившимся в движение двигателем в 3 kW.

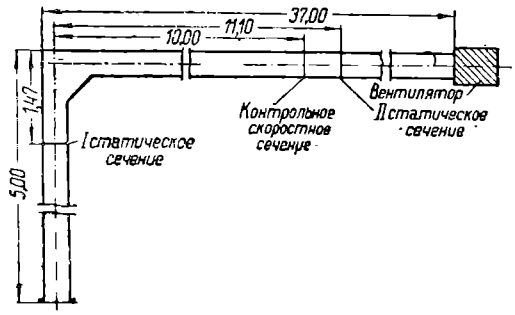


Рис. 1.

Регулировка количества воздуха производилась при помощи задвижки.

Для измерения давлений применялись микроманометры типа ЦАГИ и миниметры Асканиа и трубки Пито.

Все приборы перед работой были протарированы в аэрометрической лаборатории ВНИИМа (Ленинград).

Температура измерялась 100° термометром с ценою деления в 0,2°С.

Барометрическое давление определялось барометром-анероидом с ценою деления в 0,5 *мм* рт. ст.[1]

§ 2. Методика работы

Задача, поставленная перед авторами, сводилась к определению коэфициентов сопротивлений k.

Как известно

$$h_{\text{пов.}} = k \frac{v^2_{\text{ср.}}}{2g} \gamma, \qquad (1)$$

где $h_{\text{пов.}}$ — потеря напора струи, расходуемая на преодоление местного сопротивления, в *мм* вод. ст., k—коэфициент местного сопротивления, в данном случае поворота, величина безразмерная, $v_{\text{ср.}}$—средняя скорость в трубопроводе, g — ускорение силы тяжести в *м/сек²*, γ — вес одного куб. метра воздуха в *кг*.

Из формулы (I) определяем k:

$$k = \frac{h_{\text{пов.}} 2g}{v^2_{\text{ср.}} \gamma}. \qquad (2)$$

Таким образом для определения коэфициента k следует опытным путем найти величины $h_{\text{пов.}}$, $v_{\text{ср.}}$ и γ.

Определение $h_{\text{пов.}}$. Непосредственно замерить эту величину невозможно. При помощи двух статических трубок, установленных в трубе до местного сопротивления (I стат. сечение — см. рис. 1) и после него (II статич. сечение — см. рис. 1) замерялось $h_{\text{об}}$, равное

$$h_{\text{об}} = h_{\text{пов}} + h_{\text{тр}} + h_{\text{ск}}, \qquad (3)$$

[1] Более подробные сведения об аппаратуре и установке см. Сборник по рудничной вентиляции под редакцией ак. А. А. Скочинского. Статья В. Б. Комарова и А. А. Гескина. Том II. (Печатается).

где $h_{пов}$ — потеря напора от местного сопротивления, $h_{тр}$ — потеря напора от трения о стенки трубопровода, определяемая по формуле:

$$h_{тр} = \alpha \frac{LP}{S^3} Q^2 \qquad (4)$$

здесь α — коэфициент трения трубопровода, L — длина в *м*, P — периметр в *м*, S — площадь сечения в $м^2$, Q количество воздуха в $м^3/сек$, $h_{ск}$ — изменение напора вследствие приращения или уменьшения живой силы воздушного потока после поворота; оно находится по формуле:

$$h_{ск} = \frac{v_{кон}^2 - v_{нач}^2}{2g} \gamma, \qquad (5)$$

здесь $v_{кон}$ — скорость после поворота в *м/сек*, $v_{нач}$ — скорость до поворота в *м/сек*.

Из формулы (3) имеем:

$$h_{пов} = h_{об} - h_{тр} - h_{ск} \qquad (6)$$

или

$$h_{пов} = h_{об} - \alpha \frac{LP}{S^3} Q^2 - \frac{v_к^2 - v_н^2}{2g}$$

Таким образом, для определения $h_{пов}$ необходимо, кроме замера $h_{об}$, измерить также величины L, P, S и Q. Кроме того, замерив S_1 — площадь сечения трубы до поворота и S_2 — площадь сечения трубы после поворота, нетрудно определить $v_н = \frac{Q}{S_1}$ и $v_к = \frac{Q}{S_2}$.

Определение $v_{ср}$. Средняя скорость потока равняется

$$v_{ср} = \frac{Q}{S}$$

Удобнее всего для определения Q измерять скорость в одной постоянной контрольной точке — $v_{кон}$. Для производства этого замера было выбрано постоянное сечение, расположенное на расстоянии 9,0 *м* от поворота (см. рис. 1). Имеем:

$$Q = v_{кон} \quad S \quad a, \qquad (7)$$

где a — постоянный для данной точки коэфициент количества воздуха, S — площадь замерного сечения.

Таким образом, определение Q, а вместе с ним и $v_{ср}$ сводится к замеру $v_{кон}$.

Определение γ. Вес „стандартного" рудничного воздуха $\gamma_0 = 1{,}2$ *кг/м*^{3} при $B_0 = 760$ *мм* рт. ст. и $t_0 = 15°C$. Для определения удельного веса воздуха применялась формула:

$$\gamma = \gamma_0 \frac{273 + t_0}{273 + t} \times \frac{B}{B_0}, \qquad (3)$$

где t — температура в °C на месте работ, B — наблюдаемое барометрическое давление в *мм* рт. ст.

Таким образом, для определения γ во время производства работ замерялись температура воздуха и барометрическое давление.

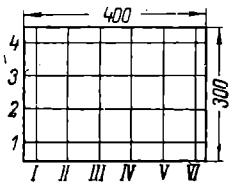
§ 3. Производство наблюдений

Как указывалось выше (§ 2), для определения Q требовалось произвести предварительную работу по вычислению коэфициента a. Для облегчения подсчетов определялся коэфициент

$$m = S \cdot a.$$

Таблица 1

Обход сечения замерной станции аэродинамической трубы



Данные о микроманометрах

Назначение прибора	Тип прибора	№	Коэффициент наклона	Плотность спирта Δ	Коэффициент трубки Пито ρ
Контрольный	ЦАГИ	1804	0,125	0,842	1,0
Обходной . .		1770	0,125	0,842	1,0

Непосредственные замеры и предварительные вычисления

Обозначение	Единица измерения	Формула	Значение
t	°C		17,5
B	*мм* рт. ст.		756,5
$\frac{\gamma_0}{\gamma}$		$\frac{B_0}{B} \cdot \frac{273+t}{273+t_0}$	1,014
$h_{пр}$	*мм* вод. ст.	$\frac{h_{обх} \cdot h_{ср\ конт}}{h_{конт}}$	
v	*м/сек*	$4{,}04\sqrt{F \cdot \Delta \cdot \rho \ \xi \ h_{пр} \frac{\gamma_0}{\gamma}}$	$4{,}08\sqrt{h_{пр} \cdot \xi}$

Таблица обхода замерного сечения (определение v)

№ точек по эскизу	$h_{конт}$ *мм* вод. ст.	$\xi_{конт}$ микроманом.	$h_{конт}$ *мм* вод. ст.	$h_{обх}$ *мм* спирт ст.	$\xi_{обх}$ микроманом.	$h_{обх}$ *мм* вод. ст.	$h_{прив}$ *мм* вод. ст.	v *м/сек*
I, 1	67,30	0,892	6,31	39,36	1,025	4,14	4,14	8,40
I, 2	67,30	0,892	6,31	48,60	1,028	5,12	5,12	9,36
I, 3	67,30	0,892	6,31	45,87	1,027	4,83	4,83	9,10
I, 4	67,30	0,892	6,31	38,35	1,025	4,04	4,04	8,30
II, 1	67,95	0,893	6,37	47,80	1,028	5,03	4,99	9,24
II, 2	68,87	0,893	6,46	56,42	1,031	5,93	5,79	9,95
II, 3	66,98	0,892	6,29	56,61	1,031	5,96	5,97	10,14
II, 4	67,73	0,893	6,35	48,67	1,028	5,12	5,10	9,35
III, 1	66,55	0,892	6,25	50,18	1,029	5,28	5,33	9,55
III, 2	66,72	0,892	6,26	59,35	1,032	6,24	6,28	10,39
III, 3	67,22	0,892	6,31	57,86	1,032	6,08	6,08	10,20
III, 4	67,38	0,892	6,32	53,35	1,030	5,61	5,61	9,81
IV, 1	67,08	0,892	6,29	54,53	1,030	5,73	5,75	9,92
IV, 2	67,70	0,892	6,35	58,60	1,032	6,16	6,12	10,25
IV, 3	67,05	0,892	6,29	58,16	1,032	6,12	6,15	10,28
IV, 4	67,30	0,892	6,31	49,04	1,029	5,16	5,16	9,40
V, 1	67,46	0,892	6,33	52,77	1,030	5,55	5,52	9,75
V, 2	67,50	0,892	6,33	57,98	1,031	6,10	6,09	10,22
V, 3	67,30	0,892	6,31	57,90	1,031	6,09	6,09	10,22
V, 4	67,30	0,892	6,31	41,30	1,026	4,34	4,34	8,61
VI, 1	67,30	0,892	6,31	38,50	1,025	4,05	4,05	8,31
VI, 2	67,30	0,892	6,31	48,98	1,028	5,15	5,15	9,37
VI, 3	67,30	0,892	6,31	50,97	1,029	5,36	5,36	9,56
VI, 4	67,30	0,892	6,31	37,00	1,026	3,89	3,89	8,10
	—	Среднее = 6,32					—	

Этот коэфициент для прямой трубы был весьма точно определен работами 1933—34 г. и оказался равным 0,115.

В работах 1936 г. при установке дополнительного колена коэфициент m, ввиду изменения условий, также изменился и оказался равным 0,117.

Так как замерное контрольное сечение для определения количества воздуха при производстве данной работы было изменено, потребовалось вновь определить коэфициент m.

Результаты замера скорости для подсчета m даны в табл. 1.

По данным этой таблицы, по средней контрольной скорости — $v_{ср\ кон}$ имеем:[1]

$$v_{ср\ кон} = \sqrt{\frac{h_{ср\ кон}\, 2g}{\gamma}} \quad \text{и} \quad m = \frac{Q}{v_{ср\ кон}},$$

где $h_{ср\ кон}$ — средний контрольный динамический напор.

В результате этих замеров и вычислений коэфициент m оказался равным 0,111.

Зная этот коэфициент, замер количества воздуха Q сводим к замеру $v_{ср\ кон}$.

Для этой цели в постоянной контрольной точке замерялся динамический напор $h_к$. Тогда:

$$v_{кон} = 4{,}04 \sqrt{h_к \quad F \quad \Delta \quad \xi \cdot \rho \frac{\gamma_0}{\gamma}} \tag{9}$$

где F — коэфициент наклона шкалы микроманометра, Δ — плотность спирта в микроманометре при t°, ξ — поправка показаний микроманометра, ρ — поправка показаний трубки Пито и $\frac{\gamma_0}{\gamma}$ — отношение плотностей воздуха.

В окончательном виде имеем:

$$Q = m \quad v_{кон} = 0{,}111\, v_{кон}\ м^3/сек.$$

Запись статического перепада давления — $h_{об}$ производилась синхронно с записью контрольного скоростного давления. Замер производился микроманометром ЦАГИ.

Для исключения случайных ошибок производилось при каждом наблюдении несколько отсчетов, из которых явно выпадающие исключались и из остальных бралось среднее арифметическое.

При помощи задвижки регулировалось количество поступающего в трубу воздуха. Работа производилась при 5—7 режимах, и поэтому каждая работа состояла из указанного числа наблюдений $h_{об}$ и $v_{кон}$. Одновременно с замером этих величин несколько раз в течение производства работы наблюдались температура воздуха и барометрическое давление, и в вычисления вводились средние значения.

Всех работ было выполнено 37 (см. табл. 2, 3, 4 и 5).

---

[1] Более подробные сведения о методике определения $v_{ср\ кон}$ и m см. Сборник по рудн. вентиляции т. I — А. А. Скочинский. Работы Бюро по руд. вентил. Гипрошахта по определению коэф. альфа. 1933, стр. 94—99 и тот же сборник т. II.— В. Б. Комаров и А. А. Гескин „Определение коэф. поворота при одновременном сжатии струи воздуха". (Печатается).

Таблица 2

Значения коэфициентов сопротивления поворота при одновременном расширении трубы с 340 до 400 *мм*

№ работы	Характер поворота	Характеристика поворота		Коэфициенты сопротивления поворота		Эскиз поворота
		$\frac{b_к}{b_н}$	$\frac{r}{b_к}$	k_1'	k_2	
1	Оба угла прямые .	1,18		1,715	1,250	
2	закруглены $r = 50$ *мм* .	1,18	0,125	1,340	0,922	
3	$r = 100$ *мм*	1,18	0,250	0,866	0,623	
4	$r = 200$ *мм*	1,18	0,500	0,707	0,500	
5	$r = 300$ *мм*	1,18	0,750	0,622	0,440	
6	Внешний угол прямой, внутренний имеет скос под углом 45° .	1,18		0,763	0,539	
7	То же, но скос сделан под углом 30°	1,18	—	0,830	0,589	
8	Внешняя сторона угла имеет расширение в 50 *мм*, внутренний угол скошен под углом 45°	1,18		0,759	0,533	

Таблица 3

Значения коэфициентов сопротивления поворота при одновременном расширении трубы с 340 до 400 *мм*

№ работы	Характер поворота	Характеристика поворота		Коэфициенты сопротивления поворота		Эскиз поворота
		$\frac{b_к}{b_н}$	$\frac{r}{b_к}$	k_1'	k_2	
9	Оба угла прямые	1,33		1,815	1,006	
10	закруглены, $r = 50$ *мм*	1,33	0,125	1,662	0,911	
11	$r = 100$ *мм*	1,33	0,250	1,265	0,692	
12	$r = 200$ *мм*	1,33	0,600	1,038	0,563	
13	$r = 300$ *мм*	1,33	0,750	0,932	0,510	
14	Внешний угол прямой, внутренний имеет скос под углом в 45°	1.33	—	0,962	0,528	
15	То же, но скос сделан под углом 30°.	1,33	—	1,220	0,667	
16	Внешняя сторона угла имеет расширение в 50 *мм*, внутренний угол прямой	1,33	—	2,400	1,310	
17	То же, но внутренний угол имеет скос под углом 45°	1,33		1,062	0,582	

Таблица 4

Значения коэфициентов сопротивления поворота при одновременном расширении трубы с 200 до 400 *мм*

№ работы	Характер поворота	Характеристика поворота		Коэфициенты сопротивления поворота		Эскиз поворота
		$\frac{b_к}{b_н}$	$\frac{r}{b_к}$	k_1'	k_2	
18	Оба угла прямые .	2		4,240	1,055	
19	закруглены $r = 50$ *мм* .	2	0,125	3,700	0,925	
20	$r = 100$ *мм*	2	0,250	3,260	0,813	
21	$r = 200$ *мм*	2	0,500	2,659	0,665	
22	$r = 300$ *мм*	2	0,750	2,240	0,500	
23	Внешний угол прямой, внутренний имеет скос под углом 45°	2		2,690	0,672	
24	То же, но скос сделан под углом 30° .	2	—	3,109	0,780	
25	То же, но скос сделан под углом 15° .	2		3,521	0,881	
26	Внешняя сторона угла имеет расширение 200 *мм*, внутренний угол прямой .	2	—	4,700	1,200	
27	То же, но внутренний угол скошен под углом 45° .	2	—	2,120	0,538	

Таблица 5

Значения коэфициентов сопротивления поворота при одновременном расширении трубы с 200 до 400 *мм*

№ работы	Характер поворота	Характеристика поворота		Коэфициенты сопротивления поворота		Эскиз поворота
		$\frac{b_к}{b_н}$	$\frac{r}{b_к}$	k_1'	k_2	
28	Оба угла прямые	4		20,500	1,310	
29	закруглены $r = 50$ *мм*	4	0,125	15,750	1,002	
30	$r = 100$ *мм*	4	0,250	13,380	0,851	
31	$r = 200$ *мм*	4	0,500	12,150	0,762	
32	$r = 300$ *мм*	4	0,750	11,800	0,747	
33	Внешний угол прямой, внутренний имеет скос под углом 45°	4		13,020	0,826	
34	То же, но скос сделан под углом 30°	4		15,500	0,987	
35	Внешняя сторона угла имеет расширение в 150 *мм*, внутренний угол прямой	4		21,20	1,317	
36	То же, но расширение в 300 *мм*	4	—	23,420	1,461	
37	То же, но внутренний угол скошен под 45°	4		14,501	0,906	

Ширина трубы (400 *мм*) не давала возможности произвести большего количества комбинаций, связанных с сужением колена.

Последовательно ширина трубы уменьшалась до 340 *мм*, 300 *мм*, 200 *мм* и 100 *мм*. Если обозначим ширину трубы до поворота через $b_н$ и после поворота через $b_к$, видим, что

I группа работ (от № 1 до 8) характеризуется сужением $\frac{b_к}{b_н} = \frac{400}{340} = 1{,}18$,

II (от № 9 до 17) $\frac{b_к}{b_н} = \frac{400}{300} = 1{,}33$,

III (от № 18 до 27) $\frac{b_к}{b_н} = \frac{400}{200} = 2{,}0$,

IV (от № 28 до 36) $\frac{b_к}{b_н} = \frac{400}{100} = 4{,}0$.

В колене трубы укреплялись различные вставки, изменявшие характер поворота; радиусы закруглений внутренних кромок угла были: $r = 50$ *мм*, $r = 100$ *мм*, $r = 200$ *мм*, $r = 300$ *мм*.

Кроме того применялись вставки с разными углами скоса. В табл. 2, 3, 4 и 5 представлены все выполненные работы, соответствующим образом сгруппированные.

§ 4. Вычисления

Вычислительные работы объединялись в одной сводной таблице, состоявшей из ряда последовательно идущих табличек.

Для лучшего уяснения хода вычисления приведем одну из работ, а именно работу от 31 марта 1937 г за № 3. Вся вычислительная работа сведена в ряд отдельных таблиц 6а, 6б, 6в, 6г, 6д[1].

31 марта 1937 г. Работа № 3

Таблица 6а

Данные о микроманометрах

Вид напора	Тип прибора	№	Коэфициент наклона F	Плотн. спирта Δ	Коэфициент трубки Пито p
Статический .	ЦАГИ	1770	0,125	0,843	1,00
Динамический		1804	0,125	0,843	1,00

Таблица 6б

Непосредственные замеры

Обозначение	Един. измер.	Значение	Обозначение	Един. измер.	Значение
L_1	*м*	1,470	L_2	*м*	11,10
P_1	*м*	1,270	P_2	*м*	1,40
S_1	$м^2$	0,101	S_2	$м^2$	0,12
α_1	$\frac{кг/сек^2}{м^4}$	0,00023	α_2	$\frac{кг/сек^2}{м^4}$	0,00023
B	*мм* рт. ст.	772,100	t	°C	16,10

[1] Таблицы по остальным работам из-за недостатка места не приведены, и даны только результаты работ в табл. 2, 3, 4 и 5.

Таблица 6в

Предварительные вычисления

Обозначение	Един. измер.	Формула	Значение
	$кг/м^3$	$1{,}2\ \frac{273+t_0}{273+t}\ \ \frac{B}{B_0}$	1,214
$\frac{\gamma_0}{\gamma}$		$\frac{273+t}{273+t_0}\ \ \frac{B_0}{B}$	0,988
v_k	$м, сек$	$4{,}04\sqrt{F\Delta\ \ \rho\, h_k \xi\ \frac{\gamma_0}{\gamma}}$	$1{,}303\sqrt{h_k \xi}$
Q	$м^3/сек$	$V_k \cdot Sa$	$0{,}111\ V_k$
$h_{тр}$	$мм$ вод. ст.	$Q^2 \alpha_1 \left(\frac{P_1 L_1}{S_1^3} + \frac{P_2 L_2}{S_2^3}\right)$	$2{,}481\ Q^2$
h_v		$\frac{v^2_k - v^2_н}{2g}\gamma$	$-1{,}560\ Q^2$
$\sum h$		$h_{тр} + h_v$	$0{,}921\ Q^2$
$\sum R$	ед. сопрот.	$R_{тр} + R_v = \frac{\Sigma h}{Q^2}$	0,921

Таблица 6г

Непосредственные наблюдения и вычисления

№	h_k		v_k	Q	$v_{ср} = \frac{Q}{S}$	$h_{общ}$			$R_{общ}$
						$мм$ спирт. ст.	ξ	$мм$ рт. ст.	
1	65,0	0,891	9,91	1,100	9,17	51,10	1,029	5,54	4,58
2	49,0	0,884	8,59	0,954	7,95	39,05	1,025	4,21	4,63
3	48,0	0,883	8,49	0,943	7,86	37,85	1,025	4,08	4,60
4	35,0	0,883	7,25	0,805	6,71	28,35	1,032	3,08	4,73
5	25,0	0,883	6,13	0,680	5,67	19,85	1,038	2,17	4,68
							В среднем .		4,645

Таблица 6д

Окончательные вычисления и результаты

Обозначение	Един. измер.	Формулы	Значение	Эскиз
$h_{пов}$	$мм$ вод. ст.	$h_{общ} - \sum h$	$h_{общ} - 0{,}921\ Q^2$	
$R_{пов}$	един. сопрот.	$R_{общ} - \sum R = 4{,}645 - 0{,}921$	3,724	
k_1	безразмерная	$\frac{2g}{\gamma}\frac{h_{пов}}{v^2_{ср}} = 0{,}235\ R_{пов}$	0,878	
k_1'		$k_1 \frac{\gamma_0}{\gamma}$	0,866	
k_2		$k'_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2$	0,623	

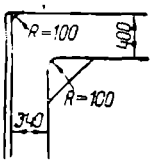


Табл. 6а. Данные о микроманометрах. Вид замеряемого напора, тип прибора, его номер, коэфициент наклона шкалы, плотность спирта в приборах и поправочный коэфициент трубки Пито.

Табл. 6б. Непосредственные замеры. В этой таблице приведены простейшие замеры, не требующие предварительных вычислений. Даны длины L_1 и L_2—длины исследуемых участков трубы до поворота и после него, периметры сечений P_1 и P_2 и площади сечений S_1 и S_2. Средние значения наблюдаемых значений барометрического давления B и средняя температура t помещены в этой же таблице. Здесь же приведены коэфициенты α трубы. Коэфициент α определялся неоднократно. В несуженной части трубы этот коэфициент, определенный в 1934—34 г., оказался в среднем равным 0,00023. В суженной части он был авторами определен в 1936 г. и оказался равным в среднем также 0,00023. Поэтому коэфициент α снова не проверялся.

Табл. 6в. Предварительные вычисления. Все вычисления, носящие промежуточный, вспомогательный характер, сгруппированы в этой таблице; а именно вычисление γ, $\frac{\gamma_0}{\gamma}$, $v_к$ и Q, о которых говорилось выше (см. § 2 и 3).

Затем подсчет потери напора от трения ($h_{тр}$) по формуле:

$$h_{тр} = \alpha_1 \quad \frac{L_1 \cdot P_1}{S_1^3} \quad Q^2 + \alpha_2 \quad \frac{L_2 \cdot P_2}{S_2^3} \quad Q^2.$$

Так как $\alpha_1 = \alpha_2$, то

$$h_{тр} = \alpha_1 \quad Q^2 \left(\frac{L_1 \cdot P_1}{S_1^3} + \frac{L_2 \cdot P_2}{S_2^3} \right) \tag{10}$$

Для каждой работы величина

$$n = \alpha_1 \left(\frac{L_1 \cdot P_1}{S_1^3} + \frac{L_2 \cdot P_2}{S_2^3} \right) = \text{const.}$$

Тогда

$$h_{тр} = n \quad Q^2. \tag{11}$$

В этой же табличке определялось изменение давления вследствие изменения скорости струи:

$$h_v = \frac{v_к^2 - v_н^2}{2g} \gamma.$$

После преобразований нетрудно убедиться, что:

$$h_v = n' \quad Q^2, \tag{12}$$

где n' — постоянный для данной работы коэфициент. Соединяя (11) и (12), имеем:

$$\Sigma h = (n + n') Q^2. \tag{13}$$

Если (14) выразить в единицах сопротивления, получим:

$$\Sigma R = \frac{\Sigma h}{Q^2} = n + n' \tag{14}$$

Табл. 6г. Непосредственные наблюдения и вычисления. В этой таблице сведены все основные наблюдения по микроманометрам и связанные с ними вычисления. Работа № 3 производилась при пяти режимах (см. табл. 6г).

Графы 2—6 представляют наблюдения и вычисления по микроманометру, замерявшему контрольный динамический напор. В результате этих вычислений получались окончательные значения средней скорости потока и количество проходящего воздуха при каждом режиме.

В графах 7—9 помещались наблюдения и вычисления статического напора $h_{об}$. Как и в графе 3, в графе 8 приводилась поправка микроманометра (ξ).

В последней графе подсчитывалось $R_{общ}$ по $h_{общ}$ делением на квадрат количества воздуха, и затем дается значение этой величины для всех пяти режимов.

Табл. 6д. Окончательные вычисления и результаты. На основании (6) имеем:

$$h_{пов} = h_{об} - \Sigma h = h_{об} - (n + n')\, Q^2$$

или:

$$R_{пов} = R_{об} - \Sigma R = R_{об} - (n + n').$$

Далее, пользуясь (2), получим:

$$k_1 = \frac{h_{пов} \cdot 2g}{v^2_{ф} \cdot \gamma} = \frac{h_{пов}}{Q^2} \quad \frac{2gS_1^2}{\gamma} = n'' R_{пов},$$

где k_1 — коэфициент сопротивления поворота, отнесенный к скорости до расширения ($v_н$), n'' — постоянная величина для данной работы.
Тот же коэфициент k_1, отнесенный к стандартной температуре $t_0 = 15°C$ и давлению $B_0 = 760$ *мм*, будет равен:

$$k_1' = k_1 \quad \frac{\gamma^0}{\gamma}.$$

Коэфициент сопротивления поворота, отнесенный к скорости после расширения ($v_к$), получается равным:

$$k_2 = k_1' \left(\frac{v_н}{v_к}\right)^2$$

§ 5. Результаты работ

Для определения коэфициентов сопротивления поворотов с одновременным сжатием струи необходимо знать коэфициенты поворотов без сжатия струи. Эти коэфициенты были определены в первой части работы и оказались равными[1]:

1) поворот под прямым углом . $k = 1{,}27$;

2) то же, внутренний и внешний углы закруглены, $r = 50$ *мм*;

$\frac{r}{b_к} = 0{,}125$ $k = 1{,}01$;

3) то же, $r = 200$ *мм*; $\frac{r}{b_к} = 0{,}500$ $k = 0{,}58$;

4) то же, $r = 300$ *мм*; $\frac{r}{b_к} = 0{,}750$ $k = 0{,}47$;

здесь: r — радиус закругления поворота, $b_к$ — ширина трубопровода.

Как указывалось выше, в первой группе работ аэродинамическая труба была сужена до поворота до 340 *мм*. При этом сужении было выполнено восемь работ от № 1 до № 8. Значения коэфициентов сопротивления поворота и одновременно сужения даны в табл. 2.

Затем труба была сужена до 300 *мм*, и при этом сужении проделано девять работ от № 9 до № 17. Значения коэфициентов даны в табл. 3.

При сужении трубы до 200 *мм* было проведено десять исследований (от № 18 до № 27). Значения коэфициентов приведены в табл. 4.

---

[1] По данным работы В. Б. Комарова и А. А. Гескина. 1936 г. См. сноску 1 на стр. 106.

Максимальное сужение трубы было достигнуто при доведении ширины трубы до поворота до 100 *мм*. При этом сужении было проделано десять работ от № 28 до № 37. Значения коэфициентов — см. табл. 5.

Таблица 7

Радиус закругления поворота r	Отношение расширения $b_к/b_н$				
	1	1,18	1,33	2,0	4,0
$r=0$; $\frac{r}{b_к}=0$	1,27	1,715	1,815	4,240	20,50
$r=50$; $\frac{r}{b_к}=0{,}125$	1,01	1,340	1,662	3,700	15,75
$r=100$; $\frac{r}{b_к}=0{,}250$		0,866	1,265	3,260	13,38
$r=200$; $\frac{r}{b_к}=0{,}50$	0,58	0,707	1,038	2,659	12,15
$r=300$; $\frac{r}{b_к}=0{,}75$	0,47	0,622	0,932	2,240	11,80

Полученные результаты работ для их анализа соединим в несколько групп.

1. Влияние радиуса закругления кромок углов поворота

Рассмотрим коэфициенты поворотов k_1', отнесенные к скорости до поворота. В табл. 7 приведены эти значения:

Сопротивление прямого угла было принято за 100%. Из табл. 7 видно, что, например, при сужении в 4 раза $\left(\frac{b_к}{b_н}=4\right)$ сопротивление уменьшается:

при закруглении $r=50$ *мм*; $\frac{r}{b_к}=0{,}125$ на 23,2%

$r=100$ *мм*; $\frac{r}{b_к}=0{,}250$ 34,8%

$r=200$ $\frac{r}{b_к}=0{,}500$ 40,8%

$r=300$ $\frac{r}{b_к}=0{,}750$ 42,5%

По данным вышеприведенной таблицы построены кривые, показывающие изменение коэфициента поворота сужения (k_1) в зависимости от изменения радиуса закругления $\left(\frac{r}{b_к}\right)$—см. рис. 2.

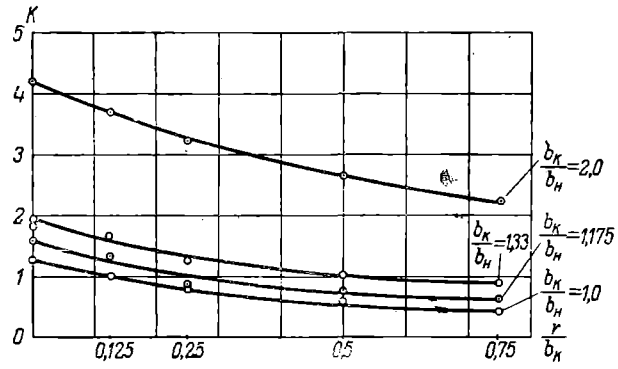


Рис. 2.

По данным этой же таблицы построены кривые, показывающие зависимость коэфициента k_1 от сужения трубопровода $\left(\frac{b_к}{b_н}\right)$ и в зависимости от изменения радиуса закругления углов поворота (см. рис. 3 и 4). По кривым рис. 3 нетрудно проследить, как резко возрастает коэфициент сопротивления по мере сужения трубопровода. Так, например, при повороте под прямым углом ($r=0$) коэфициент сопротивления возрастает (без сужения) с 1,27 до 20,5 (сужение в 4 раза), т. е. в 16 раз! На рис. 4 даны те же кривые, что и на рис. 3, но только начало их вычерчено в большем масштабе. На рис. 5 построены две кривые коэфициентов сопротивления

поворота с одновременным сужением: одна кривая (при отношении $\frac{r}{b_к} = 0{,}5$) по данным авторов и вторая по данным Нипперта.[1] Как видно из этих кривых, коэфициенты сопротивления Нипперта получились несколько меньше, чем у авторов дан-

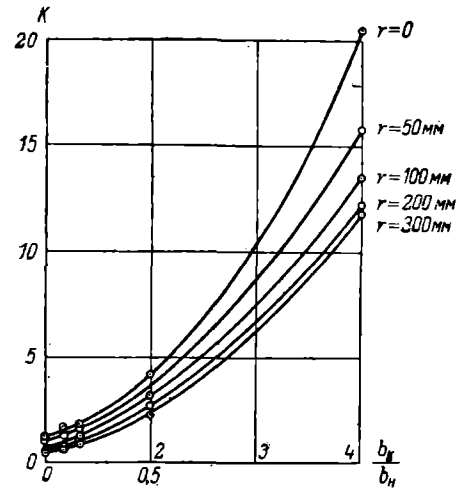


Рис. 3.

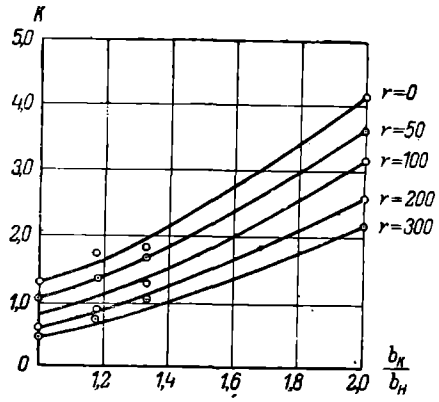


Рис. 4.

ной работы. Объясняется это тем, что у Нипперта, непосредственно после поворота и одновременного расширения, трубопровод выходил прямо в атмосферу. В экспериментальной установке авторов (см. рис. 1) после поворота был трубопровод длиною 37 *м*, что давало возможность измерить все дополнительное сопротивление, вызванное возмущением потока за поворотом.

Приведенные кривые дают возможность подбирать наиболее выгодные радиусы закруглений каналов вентиляторов при данном расширении их.

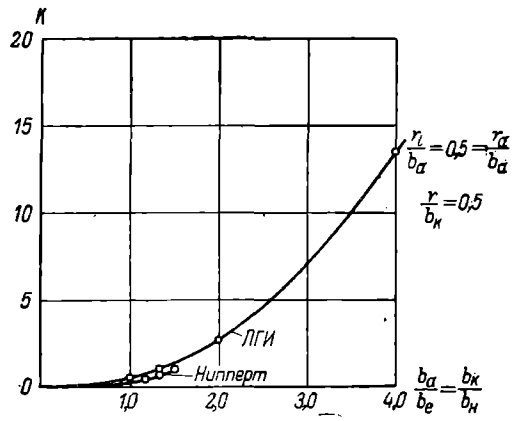


Рис. 5.

2. Влияние скашивания внутреннего угла поворота

Вместо закругления кромок при повороте струи из канала вентилятора в ствол шахты можно несколько скашивать внутренний угол поворота. Авторами было исследовано влияние этого скоса на величину коэфициента сопротивления при одновременном повороте и расширении. Для этой цели в трубу вставлялась соответствующая модель скоса внутреннего угла. Один скос был сделан под углом в 45° к оси трубы, другой—под углом 30° и третий—под углом 15°.

В таблице 8 сведены результаты этой работы:

По данным этой таблицы построены кривые на рис. 6.

Таблица 8

Отношение $\frac{b_к}{b_н}$	Угол скоса β			
	0°	15°	30°	45°
1,0[2]	1,27	—	—	0,655
1,18	1,34		0,83	0,763
1,33	1,82		1,22	0,962
2,00	4,24	3,52	3,11	2,696
4,00	20,5	—	15,50	13,020

[1] См. сноску 2-ю на стр. 105.

[2] По данным работы В. Б. Комарава и А. А. Гескина 1936 г. См. сноску 1-ю на стр. 105.

Для сравнения приведены значения коэфициентов сопротивления при прямом угле без скоса ($\beta = 0$). Нетрудно проследить, как резко падает значение коэфициента при наличии скоса. Для примера возьмем значение коэфициента сопротивления при $\frac{b_к}{b_н} = 2$. Если коэфициент k_1 при отсутствии скоса принять за 100%, то при скосе в 15° значение коэфициента уменьшается на 17,1%, в 30° на 26,8%, в 45° на 36,7%.

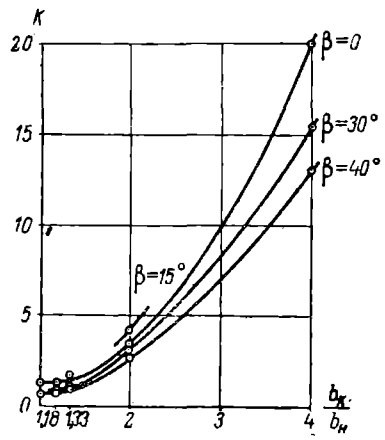


Рис. 6.

3. Влияние „кутка"

В ряде работ внешняя сторона угла имела расширение, т. е. суженная часть трубопровода, входя в расширенную, образует так наз. „куток" Наличие „кутка" дало довольно значительное возрастание величины коэфициента сопротивления:

Из таблице № 2 имеем:

работа № 6 (без кутка) . . . . . $k = 0{,}763$,
№ 8 то же, но с кутком в 50 *мм* $k = 0{,}759$.

Таким образом, при таком небольшом кутке роста коэфициента сопротивления не наблюдается.

Но уже при более значительном сужении струи (см. табл. 3) наличие кутка увеличивает значение K:

работа № 9, без кутка . . . . . $k = 1{,}815$,
№ 16, то же, но с кутком в 50 *мм* . $k = 2{,}40$,

т. е. рост сопротивления составляет 24,6%.

Там же имеем:

работа № 14, без кутка, но имеется скос под углом 45° $k = 0{,}962$,
№ 17, то же, но с кутком в 50 *мм* . $k = 1{,}062$.

т. е. рост сопротивления составляет 9,5%.

Из табл. 4 имеем:

работа № 18, без кутка, . . . $k = 4{,}24$,
№ 26, те же, но с кутком в 200 *мм* . . . $k = 4{,}70$,
№ 23 без кутка, но имеется скос под 45° $k = 2{,}69$,
№ 27 то же, но с кутком . $k = 2{,}12$.

(в эту работу, повидимому, вкралась ошибка).

Наконец из табл. 5 имеем:

работа № 28, без кутка . . . . $k = 20{,}50$,
№ 35 то же, но с кутком в 150 *мм* . $k = 21{,}20$,
№ 36 „ „ „ „ „ в 300 *мм* . . $k = 23{,}42$,
№ 33 без кутка, но имеется скос под 45° $k = 13{,}02$,
№ 37 то же, но с кутком в 300 *мм* . $k = 14{,}50$.

Это последнее сопоставление особенно характерно. Так, если при кутке в 150 *мм* рост сопротивления составляет только 3,5%, то куток в 300 *мм* уже дает увеличение сопротивления на 12,5%.

При наличии скоса увеличение сопротивления от кутка составило 10,5%.

Таким образом, можно притти к выводу, что наличие кутка может создавать дополнительное сопротивление от 10 до 25% от общего сопротивления поворота и расширения в канале вентилятора.

6. Заключение

Проделанная авторами работа дает возможность уточнить ряд положений, связанных с проектированием каналов вентилятора при работе вентиляторов на нагнетание воздуха в шахту.

Эти положения могут быть сформулированы кратко в следующем виде:

1. Значение коэфициентов поворота с одновременным расширением струи следует брать на основании кривых, данных на рис. 2 и 3.

2. Внутренний и внешний углы поворота должны иметь закругленные кромки. Получаемое снижение коэфициента сопротивления при наличии этих кромок также можно видеть по кривым на рис. 2 и 3.

3. Желательно делать скос внутреннего угла поворота. Величину скоса и получаемое при этом снижение значения коэфициента сопротивления следует брать по кривой, данной на рис. 6.

4. Если ствол шахты служит только для целей вентиляции и не используется для подъема, то куток выше канала вентилятора целесообразно заделать.

Summary

This work gives the definition of the coefficient of resistance of the ventilating ducts as well as of the influence on the value of this coefficient of the curve of the interior and exterior angles of bending, of the grade of widening and of the sloping of the interior angle.

It contains also the curves for calculating the coefficient of resistance of all kind of bending.

1. The meaning of cofficients of resistance with the simultaneous expansion of air should be taken on the base of curves represented on fig. 2 and 3.

2. Interior and exterior angles of turns should have rounded edges. The coefficients of resistance in this case also can be seen on the curves shown on fig. 2 and 3.

3. It is recomended to the interior angles of turns. The size of the cut and the coefficients of resistance for this case should be taken on the curve, given on fig. 6.

4. If the shaft is used for the purpose of ventilation only and is not used for hoisting then it is rational to lock the part of the shaft located above the air channel of ventilator.