Записки Ленинградского Горного Института, том XIII, вып. 3, 1941
Annales de l'Institut des Mines á Leningrad, vol. XIII, liv. 3, 1941

Зависимость коэфициентов местных сопротивлений от шероховатости стенок воздухопроводов

Доцент *В. Б. Комаров* и аспирант *А. И. Колбин*

Connection between the coefficients of local resiststance and the surface condition of air ducts (Die Abhängigkeit der Koeffizienten der örtlichen Widerstände von der Wändenunebenheil der Luftleitungen)

Docent *V. B. Komarov* and asp. *A. I. Kolbin*

1. Введение

Вопрос о зависимости коэфициентов местных сопротивлений k от шероховатости стенок воздухопроводов является одним из мало изученных вопросов практической аэродинамики. В большинстве курсов аэродинамики приводятся значения, иногда весьма подробные, коэфициентов k (или ξ) для целого ряда местных сопротивлений — поворотов, внезапных сужений и расширений, но не указывается обычно, как этими коэфициентами пользоваться: принимать ли их постоянными, независимыми от шероховатости стенок воздухопровода, или, наоборот, считать их величинами переменными, связанными какой-то зависимостью с коэфициентом трения о стенки воздухопровода.

В сборнике № 211 ЦАГИ в статье инж. Абрамовича Аэродинамика местных сопротивлений имеется указание, что коэфициенты местных сопротивлений прямо пропорциональны коэфициентам трения α, т. е.

$$k_{\text{шер}} = k_{\text{гл}} \frac{\alpha_{\text{шер}}}{\alpha_{\text{гл}}}.$$

Принимая во внимание, что подавляющее большинство коэфициентов местных сопротивлений k были определены в гладких, а иногда и полированных воздухопроводах, коэфициент трения которых не превышал 0,0002—0,0003, вопрос о правильности приведенного выше уравнения для шероховатых воздухопроводов, какими являются все без исключения шахтные выработки, приобретает большое практическое значение. В самом деле, учитывая, что коэфициент трения выработок, закрепленных бетоном, например каналов вентиляторов, достигает в шахтах 0,0006—0,0007, коэфициенты k для таких каналов при правильности указанного уравнения следует увеличивать в три раза; для выработок, закрепленных дверными окладами, т. е. совершенно шероховатых (α = 0,0012—0,0020), коэфициенты k должны были бы соответственно приниматься в 5—10 раз бóльшими, чем рекомендуемые в учебниках аэродинамики коэфициенты местных сопротивлений.

В настоящее время при составлении проектов вентиляции наших шахт при подсчете сопротивления каналов вентиляторов и некоторых местных сопротивлений принимают во многих случаях прямую пропорциональность между значе-

ниями k и a; потеря депрессии при этом получается весьма значительной, достигая иногда 30—40 *мм*; во избежание непроизводительной затраты вентилятором энергии на преодоление таких каналов последним придают очень большие размеры.

Целью описываемой работы была проверка правильности приведенного выше уравнения. В качестве местного сопротивления был использован поворот под прямым углом малой аэродинамической трубы лаборатории рудничной вентиляции Ленинградского Горного Института. Труба прямоугольная, размером 0,3 × × 0,4 *м* (внутри). Изменение величины местного сопротивления достигалось при помощи различных вставок, располагаемых на месте поворота трубы (рис. 1).

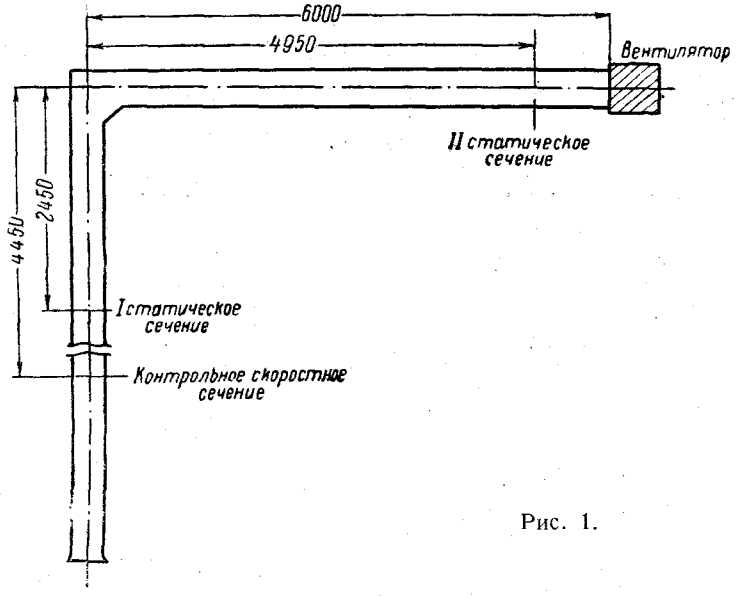


Рис. 1.

Аэродинамическая труба имеет съемную крышку, отдельные звенья которой прижимаются к трубе при помощи хомутов, расположенных через каждые 0,3 *м*. Для достижения лучшей воздухонепроницаемости во все пазы вставлялась листовая резина и кроме того все швы промазывались смесью мастики и обыкновенного серого мыла. Такое уплотнение, как показала проверка, дает вполне удовлетворительные результаты.

Воздух засасывался вентилятором Сирокко, приводившимся в движение мотором в 3 *квт*; регулировка количества воздуха производилась задвижкой, установленной после вентилятора (считая по струе).

Общее расположение трубы и вентилятора с указанием рабочего участка представлено на рис. 1. Крепление трубы для придания ей шероховатости устанавливалось не только на рабочем участке, но также и на некотором протяжении трубы перед участком.

Измерительная аппаратура состояла из следующих приборов:

1) двух микроманометров завода Метрон, типа ЦАГИ,
2) двух плоских трубок Пито-Прандля, диаметр насадки 3 *мм*,
3) ртутного барометра,
4) термометра.

Микроманометры были протарированы в аэрометрической лаборатории ВНИММа (Ленинград). Коэфициент ϱ трубок Пито равнялся 1,0. Удельный вес спирта был определен на весах Вестфаля.

Были продуты следующие местные сопротивления:

1) прямой угол; таким образом радиус закругления $R = 0$;
2) прямой угол; внутренний и наружный угол закруглены, $R = 100$ *мм*;
3) то же, $R = 200$ *мм*;
4) то же, $R = 300$ *мм*.

Изменение шероховатости достигалось установкой в трубе до поворота и после него крепления в виде неполных дверных окладов. В разных сериях опытов было установлено следующее крепление:

1) диаметр стоек 30 *см*, продольный калибр 5, [1]
2) диаметр стоек 30 *см*, продольный калибр 10,
3) диаметр стоек 15 *см*, продольный калибр 5,
4) диаметр стоек 15 *см*, продольный калибр 10.

Таким образом, комбинируя различные местные сопротивления и различные типы крепления, можно было проследить влияние изменения коэфициента трения на величину коэфициентов k. Коэфициенты k поворота трубы без крепления были определены в одной из предыдущих работ лаборатории вентиляции

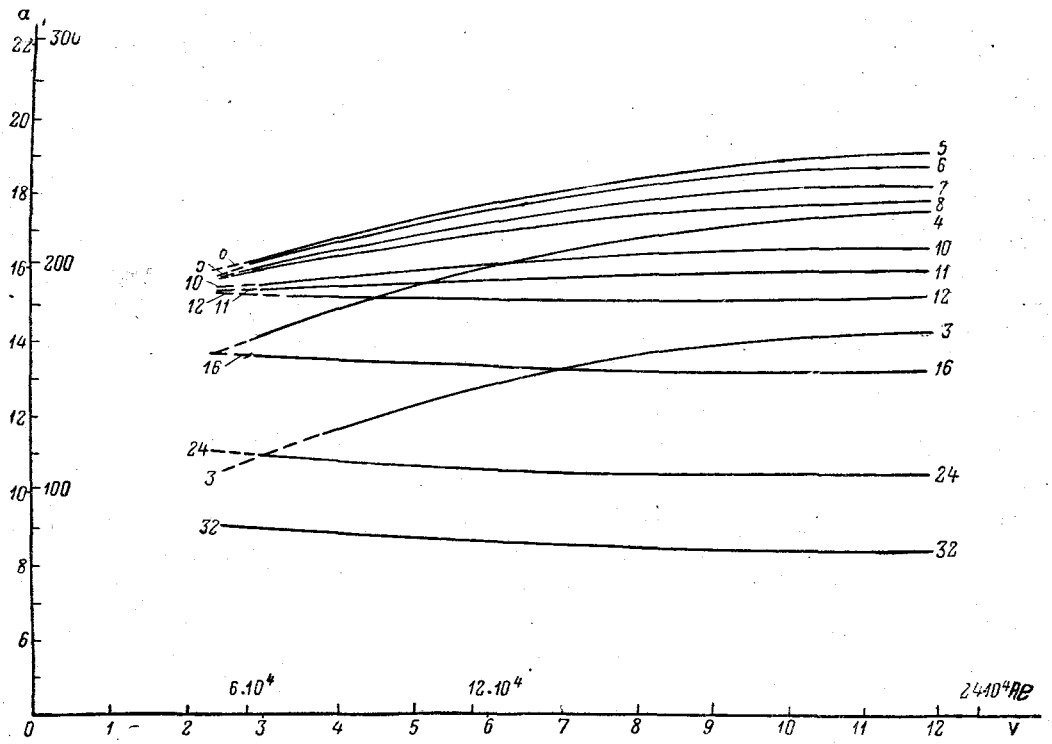


Рис. 2.

ЛГИ (см. Записки ЛГИ, том XII, вып. 3, В. Б. Комаров и А. А. Гескин: Определение коэфициентов сопротивления поворотов вентиляционных каналов при одновременном расширении), а потому вновь не определялись. Лишь для контроля был вновь определен коэфициент поворота под прямым углом гладкой трубы. Он оказался равным 1,20 вместо 1,27 по прежней работе, что, повидимому, объясняется более короткими участкам трубы за поворотом.

Коэфициенты трения трубы при различном креплении были определены одним из авторов (В. Б. Комаров) еще в 1934 г. и вновь не проверялись. На рис. 2 даны в виде кривых значения этих коэфициентов при различных продольных калибрах и разных скоростях движения воздуха для $d = 30$ *мм*. Аналогичные кривые были в свое время получены и для крепления диаметром 15 *мм*.

2. Методика работы [2]

Задача, поставленная в работе, сводилась к определению коэфициента сопротивления поворота аэродинамической трубы, закрепленной неполными дверными

[1] Под продольным калибром подразумевается отношение l/d, где l — расстояние между стойками, а d — диаметр крепи.

[2] Этот раздел, а также следующий (Производство наблюдений) представляют извлечения из упомянутой выше работы В. Б. Комарова и А. А. Гескина.

окладами при продольном калибре крепления $l/d = 5$ и $l/d = 10$; диаметр d стоек был равен 15 и 30 *мм*.

Как известно,

$$h_{пов} = k \frac{v_{ср}^2}{2g} \gamma, \quad (1)$$

где $h_{пов}$ — потеря напора струи, расходуемая на преодоление местного сопротивления, в *мм* вод. столба; k — коэфициент местного сопротивления, в данном случае поворота, величина безразмерная; $v_{ср}$ — средняя скорость воздуха в трубопроводе в *м/сек*; g — ускорение силы тяжести в *м/сек*^{2}; γ — вес 1 *м*^{3} воздуха в *кг*.

Из формулы (1) определяем k:

$$k = \frac{h_{пов} 2g}{v_{ср}^2 \gamma}. \quad (2)$$

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

Определение $h_{пов}$. Непосредственно замерить эту величину невозможно. При помощи двух статических трубок, установленных в трубе до поворота (1-е статическое сечение) и после него (2-е статическое сечение), замерялось $h_{общ}$, равное:

$$h_{общ} = h_{пов} + h_{тр}, \quad (3)$$

где $h_{пов}$ — потеря напора на преодоление местного сопротивления; $h_{тр}$ — потеря напора, расходуемая на преодоление трения о стенки трубопровода; она определяется по известной формуле:

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

где α — коэфициент трения трубопровода, L — длина замерного участка в *м* (равна $L_1 + L_2$), $P = P_1 = P_2$ периметр трубы в свету крепления в *м*, $S = S_1 = S_2$ площадь поперечного сечения трубы внутри крепления в *м*^{2}, Q — количество воздуха в *м*^{3}/*сек*.

Из формулы (3) имеем:

$$h_{пов} = h_{общ} - h_{тр} \quad (5)$$

или

$$h_{пов} = h_{общ} - \alpha \frac{LP}{S^3} Q^2. \quad (6)$$

Таким образом для определения $h_{пов}$ необходимо, кроме замера $h_{общ}$, измерить также величины L, P, S и Q (так как в данном случае $S_1 = S_2 = S$, то $v_н = v_к$ и поправка в формуле (2) на изменение скоростного напора вследствие приращения или уменьшения живой силы воздушного потока после поворота равна нулю).

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

$$v_{ср} = \frac{Q}{S}.$$

Удобнее всего для определения Q измерять скорость в одной постоянной контрольной точке. Для этого было выбрано постоянное сечение, расположенное на расстоянии 5,15 *м* до поворота.

Имеем:

$$Q = v_к S a,$$

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

Таким образом, при известном значении коэфициента a определение Q и $v_{ср}$ сводится к замеру $v_к$

Определение γ. Вес γ_0 1 $м^3$ стандартного рудничного воздуха равен 1,2 $кг$ при $B_0 = 760$ $мм$ рт. ст. и $t_0 = 15°$. Для определения удельного веса воздуха при других условиях применялась формула:

$$\gamma = \gamma_0 \frac{273 + t_0}{273 + t} \cdot \frac{B}{B_0}$$

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

3. Производство наблюдений

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

$$m = Sa.$$

Этот коэфициент для прямой трубы был весьма точно определен работами 1933—1934 гг. и оказался равным 0,115. В работах 1936 г. при установке дополнительного колена коэфициент m в виду изменения условий также изменился и оказался равным 0,117.

Так как в 1939 г. труба снова монтировалась, то перед производством данной работы снова был определен коэфициент m, который оказался равным 0,114.

Подробного подсчета коэфициента m в данной работе не приводим, так как метод подсчета неоднократно приводился в работах кафедры вентиляции ЛГИ. [1]

Зная коэфициент m замер количества воздуха Q сводим к замеру $v_к$. Для этой цели в постоянной контрольной точке замеряется динамический напор $h_к$.

Тогда

$$v_к = 4{,}04 \sqrt{h_к F \Delta \xi \varrho \frac{\gamma_0}{\gamma}},$$

где F — коэфициент наклона шкалы микроманометра, Δ — плотность спирта в микроманометре при $t°$, ξ — поправка микроманометра, ϱ — поправка трубки Пито (в таблицах не приводится, так как $\varrho = 1$), $\frac{\gamma_0}{\gamma}$ — отношение плотностей воздуха.

В окончательном виде:

$$Q = v_к m = 0{,}114\, v_к \ м^3/сек.$$

Запись статического перепада давления $h_{общ}$ производилась синхронно с записью контрольного скоростного давления. Для замеров были применены, как было указано, микроманометры ЦАГИ. Для исключения случайных ошибок при каждом наблюдении производилось несколько отсчетов, из которых явно выпадающие исключались, а из остальных бралось среднее арифметическое. Количество поступающего в трубу воздуха регулировалось при помощи задвижки. Работа производилась при 5—9 режимах. Одновременно с замером указанных величин дважды (в начале и в конце работы) наблюдалась температура воздуха и барометрическое давление и в вычисления вводились средние значения. Всех работ по определению коэфициентов поворота было выполнено 14.

4. Вычисления

Вычислительные работы объединялись в одной сводной таблице, состоящей из ряда последовательно идущих табличек. Для лучшего пояснения хода вычислений ниже приведена одна из работ, а именно — работа № 3 от 4 апреля 1939 г.

---

[1] Более подробные сведения о методике определения m см. Сборник по рудничной вентиляции т. 1, под ред. А. А. Скочинского, работы Бюро рудничной вентиляции Гипрошахта по определению коэфициента a, 1934, стр. 94—99 и упомянутую работу В. Б. Комарова и А. А. Гескина.

РАБОТА № 3

$$d = 30\ мм, \quad \frac{l}{d} = 5, \quad R = 100\ мм$$

Таблица 1

Данные о микроманометрах

Вид напора	Тип прибора	№ прибора	Коэф. накл. F	Плотн. спирта Δ	Коэф. трубки Пито
Статический	ЦАГИ	1935	0,250	0,820	1,0
Динамический	»	1926	0,125	0,820	1,0

Таблица 2

Непосредственные замеры

Обозначение	Единицы измер.	Значения	Обозначения	Един. измер.	Значения
L_1	$м$	2,45	L_2	m	4,95
P_1	$м$	1,220	P_2	$м$	1,220
S_1	$м^2$	0,0918	S_2	$м^2$	0,0918
B	$мм$ рт. ст.	759,2	$t°$	°С	12°

Таблица 3

Предварительные вычисления

Обозначения	Един. измер.	Формулы	Значения
γ	$кг/м^3$	$1,2 \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \cdot \frac{B}{B_0}$	1,210
$\frac{\gamma_0}{\gamma}$	безразм.	$\frac{273 + t}{273 + t_0} \cdot \frac{B_0}{B}$	0,994
$v_к$	$м/сек$	$4,04 \sqrt{F \Delta \xi h_к \frac{\gamma_0}{\gamma}}$	$1,290 \sqrt{h_к \xi}$
Q	$м^3/сек$	$v_к m$	$0,114 v_к$
$h_{тр}$	$мм$ в. ст.	$a Q^2 \left(\frac{L_1 + L_2}{S^3}\right) P$	$11671,10\, aQ^2$
ΣR	ед. сопр.	—	$11671,10\, a$

Таблица 4

Непосредственные замеры и вычисления

№№ п/п	$h_к$	ξ	$v_к$	Q	$v_{ср} = \frac{Q}{S}$	$R_{общ}$			$R_{общ}$	$a \cdot 10^4$	ΣR	$R_{пов}$
						$мм$ ст. сп.	ξ	$мм$ в. ст.				
1	17,3	0,975	5,30	0,604	6,57	52,0	0,994	10,6	29,1	17,90	20,85	8,25
2	21,8	0,975	5,93	0,675	7,36	67,0	0,987	13,6	29,7	18,20	21,20	8,50
3	18,6	0,975	5,48	0,625	6,81	56,0	0,992	11,4	29,2	18,00	21,00	8,20
4	11,0	0,973	4,21	0,480	5,23	32,5	0,982	6,43	28,0	17,40	20,30	7,70
5	9,4	0,973	3,88	0,442	4,82	28,0	0,982	5,62	28,9	17,20	20,05	8,85
6	10,3	0,973	4,04	0,465	5,07	31,0	0,982	6,23	28,8	17,30	20,20	8,60
7	19,4	0,975	5,60	0,638	6,95	60,0	0,990	12,18	29,8	18,10	21,10	8,70
8	18,3	0,975	5,45	0,620	6,74	54,0	0,992	11,0	28,6	18,00	21,00	8,60
9	11,0	0,973	4,21	0,480	5,23	32,5	0,982	6,54	28,4	17,40	21,20	8,20
						В среднем			28,94	17,72	20,54	48,40

Таблица 5

Окончательные вычисления и результаты

Обозначения	Един. измер.	Формула	Значения
$h_{пов}$	*мм* в. ст.	$h_{общ} - h_{тр}$	$h_{общ} - 11671{,}1\,\alpha\,Q^2$
$R_{пов}$	ед. сопр.	$R_{общ} - \Sigma R$	8,40
k_1	безразм.	$\frac{2gS^3}{\gamma} R_{пов} = 0{,}1364\,R_{пов}$	1,147
k_1^1	безразм.	$k_1 \frac{\gamma_0}{\gamma}$	1,140

Пояснения к таблицам

Таблица 1. Данные о микроманометрах. Вид замеряемого напора, тип прибора, его номер, коэфициент наклона шкалы, плотность спирта в приборах и поправочный коэфициент трубки Пито.

Таблица 2. В этой таблице приведены результаты простейших замеров, не требующих предварительных вычислений. Даны длины L_1 и L_2 участков трубы до поворота и после поворота, периметры сечений (1 и 2 статического) P_1 и P_2 и площади поперечного сечения S_1 и S_2. Средняя величина наблюдаемых значений барометрического давления B и средняя температура t помещены в этой же таблице.

Таблица 3. Все вычисления, носящие промежуточный вспомогательный характер, сгруппированы в этой таблице, а именно: вычисление γ, $\frac{\gamma_0}{\gamma}$, v_k и Q, о которых говорилось выше, затем подсчет потери напора от трения ($h_{тр}$) по формуле:

$$h_{тр} = a_1 \frac{LP_1}{S_1^3} Q^2 + a_2 \frac{L_2 P_2}{S_2^3} Q^2.$$

Так как $a_1 = a_2$, $P_1 = P_2$ и $S_1 = S_2$, то

$$h_{тр} = aQ^2 \left(\frac{L_1 + L_2}{S^3} \right) P.$$

Для каждой работы величина

$$n = \frac{L_1 + L_2}{S^3} P = \text{const},$$

тогда

$$h_{тр} = naQ^2.$$

Если выразить $h_{тр}$ в единицах сопротивления, получим

$$\sum R = \frac{h_{тр}}{Q^2} = na.$$

Таблица 4. В этой таблице сведены все основные наблюдения по микроманометрам и связанные с ними вычисления. Работа № 3 проводилась при девяти режимах (см. таблицу 4). Графы 2—6 представляют наблюдения и вычисления по микроманометру, замерявшему контрольный динамический напор. В результате этих вычислений получились окончательные значения средней скорости потока и количество проходящего воздуха при каждом режиме.

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

В графе 10 подсчитывалось $R_{общ}$ по $h_{общ}$ делением $h_{общ}$ на квадрат количества воздуха, что делалось для каждого режима отдельно.

В графе 11 приведены значения коэфициентов a трубы. Эти коэфициенты были определены для данной аэродинамической трубы прежними работами, выполненными при различных диаметрах крепления (d = 15, 30 и 45 *мм*) и различных продольных калибрах крепления l/d в 1934 г.

На основании этих работ, как указывалось выше, были получены кривые значений коэфициентов a. На основании этих кривых по $v_{ср}$ принимались значения a при подсчете R.

В графе 12 приведено значение $\sum R$, которое получено путем умножения a на n:

$$\sum R = an$$

В графе 13 приведено значение сопротивления поворота, полученное путем вычитания ΣR из $R_{общ}$.

Все вычисления приведены для каждого режима отдельно, а в конце таблицы 4 даны средние значения величин.

Таблица 5. На основании формулы (6) имеем:

$$h_{пов} = h_{общ} - h_{тр} = h_{общ} - n\alpha Q^2$$

или

$$R_{пов} = R_{общ} - \sum R = R_{общ} - \alpha n.$$

Далее, пользуясь формулой (2), получаем:

$$k_1 = \frac{h_{пов}\, 2g}{v_{ср}^2 \gamma} = \frac{h_{пов}}{Q^2} \cdot \frac{2g\, S^3}{\gamma} = R_{пов} \frac{2g\, S^3}{\gamma},$$

где k_1 — коэфициент сопротивления поворота, отнесенный к скорости до поворота.

Этот же коэфициент k_1, отнесенный к стандартной температуре $t = 15°$ и давлению $B = 760$ *мм* рт. ст., будет равен:

$$k_1' = k_1 \frac{\gamma_0}{\gamma}.$$

5. Результаты работ

Всего было выполнено 14 работ

при $d = 30$ *мм*, $l/d = 5$ . . . . . .4 работы
при $d = 30$ *мм*, $l/d = 10$ . . . . . .3 »
при $d = 15$ *мм*, $l/d = 5$ . . . . . .3 »
при $d = 15$ *мм*, $l/d = 10$ . . . . . .4 »

Полученные значения коэфициентов сгруппированы в табл. 6.

Таблица 6

Значения коэфициентов k сопротивления поворота трубы под прямым углом, при разных радиусах закругления углов поворота

Род крепления	$R = 0$	$R = 100$ *мм*	$R = 200$ *мм*	$R = 300$ *мм*
$d = 30$, $l/d = 5$	1,550	1,140	0,860	0,800
$d = 30$, $l/d = 10$	1,520	—	0,830	0,755
$d = 15$, $l/d = 5$	1,470	1,055	—	0,735
$d = 15$, $l/d = 10$	1,432	1,040	0,773	0,710
Без крепления [1]	1,200	0,780	0,550	0,460

По данным табл. 6 построены на рис. 3 кривые, показывающие изменение коэфициентов k в зависимости от изменения радиуса закругления поворота или, что то же, от отношения $\frac{R}{b}$, где b — ширина трубы. Как видно из рис. 3, все вновь полученные кривые легли согласно с нижней кривой, полученной ранее для трубы без крепи.

На рис. 4 представлена зависимость коэфициентов k от коэфициентов трения: по оси абсцисс отложены средние значения коэфициентов α, а по оси ординат соответствующие им значения k для четырех продутых типов поворотов. Кривые, изображенные на рис. 4, позволяют сделать следующие важные выводы:

1) зависимость между коэфициентами k и коэфициентами α, повидимому, линейная,

[1] По работе 1937 г.

2) приведенное выше уравнение

$$k_{\text{шер}} = k_{\text{гл}} \frac{\alpha_{\text{шер}}}{\alpha_{\text{гл}}} \qquad (10)$$

должно быть заменено уравнением

$$k_{\text{шер}} = k_{\text{гл}} + a\,(\alpha_{\text{шер}} - \alpha_{\text{гл}}). \qquad (11)$$

Из рис. 4 получаем непосредственно:

для прямой A . . . . . $a_1 = 237$
» » B . . . . . $a_2 = 233$
» » C . . . . . $a_3 = 237$
» » D . . . . . $a_4 = 232$

Ввиду малых расхождений между значениями множителя a для разных типов местных сопротивлений считаем возможным принять его за постоянную величину, равную среднему арифметическому из всех полученных значений:

$$a = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{4} = \frac{237 + 233 + 237 + 232}{4} = 235.$$

Тогда уравнение (11) примет следующий вид:

$$k_{\text{шер}} = k_{\text{гл}} + 235\,(\alpha_{\text{шер}} - \alpha_{\text{гл}}).$$

Из рис. 4 усматриваем, что прямые A, B, C и D пересекают ось ординат в точках a, b, c и d, соответствующих следующим значениям коэфициентов k: $k_1 = 1{,}14$, $k_2 = 0{,}73$, $k_3 = 0{,}45$, $k_4 = 0{,}40$.

Эти коэфициенты можно рассматривать как своего рода нулевые коэфициенты сопротивления поворота при нулевом трении, т. е. полном отсутствии такового. Обозначив в общем виде такой нулевой коэфициент через k_0, получим следующее выражение для нахождения коэфициентов сопротивления поворотов шероховатых воздухопроводов:

$$k_{\text{шер}} = k_0 + 235\,\alpha_{\text{шер}}. \qquad (12)$$

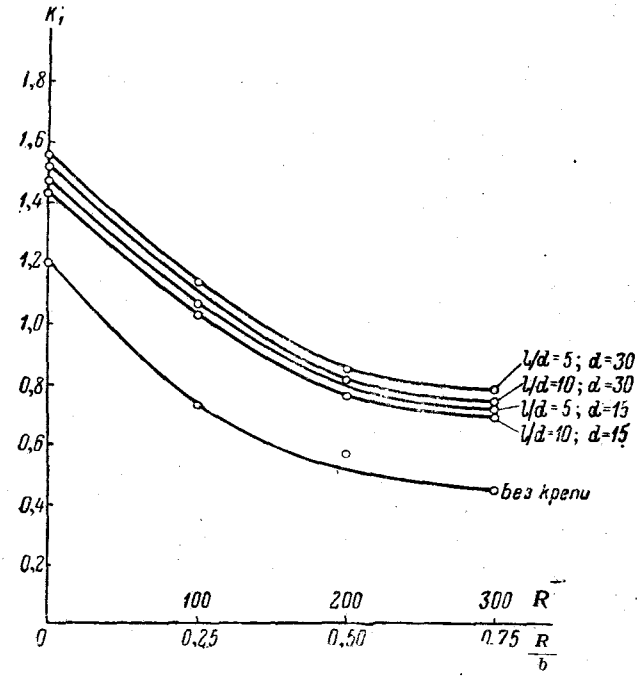


Рис. 3.

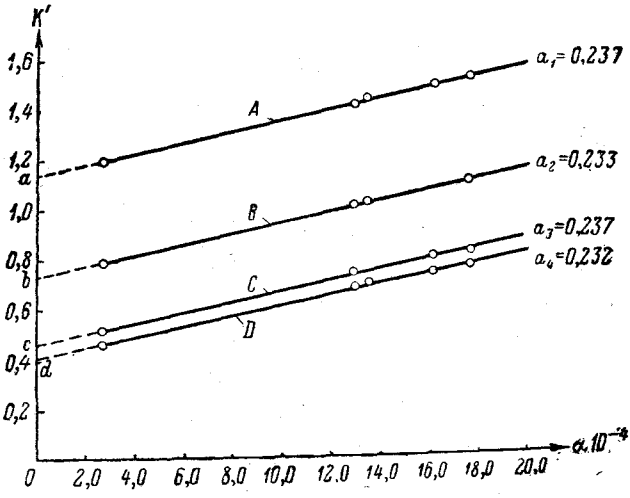


Рис. 4.

Найдем для некоторых шероховатых воздухопроводов, часто встречающихся в рудничной практике, насколько увеличивается значение коэфициентов k по сравнению с гладким воздухопроводом. Рассмотрим поворот под прямым углом в выработке, закрепленной бетоном ($\alpha = 0{,}0007$ в рудничных условиях) и дверными окладами ($\alpha = 0{,}0017$).

Для гладкой трубы $k_{гл} = 1{,}2$. Для трубы, закрепленной бетоном:

$$k_{бет} = k_{гл} + 235\,(0{,}0007 - 0{,}00029) = 1{,}2 + 0{,}096 = 1{,}30,$$

и для выработки, закрепленной дверными окладами:

$$k_{выр} = k_{гл} + 235\,(0{,}0017 - 0{,}00029) = 1{,}2 + 0{,}33 = 1{,}53,$$

т. е. в первом случае коэфициент k увеличился на 8% и во втором на 27,5%.

Заключение

1. Проделанная авторами работа дала возможность уточнить зависимость между коэфициентами местных сопротивлений k и коэфициентами трения α воздуха о стенки воздухопровода.

2. Принимавшаяся ранее зависимость

$$k_{шер} + k_{гл}\frac{\alpha_{шер}}{\alpha_{гл}}$$

оказалась неверной и должна быть заменена другой (11):

$$k_{шер} = k_{гл} + a\,(\alpha_{шер} - \alpha_{гл}),$$

причем множитель a для всех без исключения исследованных местных сопротивлений (повороты под прямым углом с острыми и скругленными кромками) оказался постоянным и равным:

$$a = 235.$$

3. Формула (11) может быть заменена другой, а именно (12):

$$k_{шер} = k_0 + 235\,\alpha_{шер},$$

где k_0 есть нулевой коэфициент местного сопротивления в выработке, не обладающей трением.

4. Даваемые в различных курсах коэфицинты сопротивления поворотов должны быть увеличены для шероховатого бетонного крепления на 8—10% и для выработок, закрепленных дверными окладами в разбежку, на 25—30%.

5. Правильность формул (11) и (12) для других видов местных сопротивлений требует проверки.

Zusammenfassung

1. Die ausgeführte Arbeit ermöglicht den Zusammenhang zwischen den lokalen Widerstandskoeffizienten K und den Reibungszahlen α genauer zu fassen.

2. Den früher angenommene Zusammenhang

$$K_r = K_g\frac{\alpha_r}{\alpha_g}$$

ist jetzt als unrichtig anzusehen und er kann durch die folgende Formel ersetzt werden

$$K_r = K_g + a\ (\alpha_r - \alpha_g),$$

worin a hat sich für ausschliesslich alle untersuchte lokale Widerstände (Rechtwinklige Abzweigungen mit den scharfen und abgerundeten Rämden) als eine Konstante erwiesen und wird ausgedrückt

$$a = 235.$$

3. Die Formel (11) kann mit der anderen ersetzt werden und nämlich

$$K_r = K_g + 235\ \alpha_r,$$

worin K_0 als nullwertiges Koeffizient der lokale Widerstände im idealen Crubenbaue anzusehen ist.

4. Die in verschiedenen Kursen angegebene Widerstandskoeffiziente der Richtungsänderungen müssen, wegen der nicht glatt mit Beton ausgebauten Grubenbaue, um 8—10 v. H. und für Zimmerung mit Feld um 25—39 v. H. vergrössert werden.