

Доцент Н. А. БАТИН.

К РАСЧЕТУ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Для удаления и транспортирования отходов, получающихся при механической обработке древесины, в деревообрабатывающей промышленности широко применяется пневматический транспорт.

Надежность работы пневматической установки зависит прежде всего от правильного ее расчета.

Расчет пневматической установки сводится в основном к определению диаметров труб разветвленной системы, количества воздуха, подлежащего отсасыванию от станков через приемник, и полного напора вентилятора. При проектировании следует учитывать, что диаметр трубопроводов должен быть не менее 100 мм, а скорость воздушного потока, в зависимости от характера транспортируемых отходов, не ниже 12—18 м/сек. Поэтому количество отсасываемого воздуха практически определяется минимальным диаметром трубопровода и минимальной скоростью воздушного потока, независимо от количества отходов, получающихся на данном станке. Только при больших количествах транспортируемых отходов количество забираемого через приемники воздуха определяется из условия наиболее выгодной и допустимой концентрации смеси.

Таким образом, при расчете пневматических установок чаще всего количество отсасываемого от станка воздуха берется по рекомендуемым практикой нормам.

Давление, создаваемое вентилятором, идет на преодоление сопротивления трения на участке прямых труб, преодоление всех местных сопротивлений и на скоростной напор, с которым покидает воздух трубопровод при выходе в атмосферу.

Указанные потери напора определяются по следующим формулам.

1. Скоростной напор

$$H_v = \frac{\gamma v^2}{2g}, \quad (1)$$

где: v — скорость воздушного потока (в м/сек),

γ — объемный вес воздуха (в кг/м³),

g — ускорение силы тяжести = 9,81 (в м/сек²).

2. Сопротивление от трения в трубах

$$H_1 = \frac{\lambda}{d} l \frac{\gamma v^2}{2g}, \quad (2)$$

где: d — диаметр трубы (в м),
 l — длина трубы (в м),

λ — коэффициент, для определения которого имеется целый ряд формул. В нашей практике при расчете пневматических установок наиболее часто пользуются следующей формулой

$$\lambda = 0,0125 + \frac{0,0011}{d}, \quad (3)$$

где d — диаметр трубы (в м).

3. Давление, расходуемое на преодоление местных сопротивлений

$$H_2 = \xi \frac{\gamma v^2}{2g}, \quad (4)$$

где ξ — коэффициент местных сопротивлений. Таким образом, для определения полного напора необходимо знать потерю напора на отдельных участках, составляющих транспортную сеть.

Из формул (2) и (4) заключаем, что потеря напора, идущая как на преодоление трений в трубопроводе, так и на преодоление местных сопротивлений, выражается в скоростных напорах $\left(\frac{\gamma v^2}{2g}\right)$.

Это дает нам возможность потерю напора на трение в трубопроводе рассматривать как один из видов местного сопротивления, т. е.

$$H_1 = \frac{\lambda}{d} l \frac{\gamma v^2}{2g} = \xi' \frac{\gamma v^2}{2g},$$

откуда $\frac{\lambda l}{d} = \xi'$.

При $l = 1$ м будем иметь $\frac{\lambda}{d} = \xi'_0$, откуда заключаем, что отношение $\frac{\lambda}{d}$ численно равно количеству скоростных напоров, расходуемых на трение в трубе данного диаметра (d) длиной в 1 метр.

Общая потеря напора на преодоление сопротивления трений и местных сопротивлений в трубопроводе будет равна

$$H_z = H_1 + H_2 = \left(\frac{\lambda}{d} l + \Sigma \xi\right) \frac{\gamma v^2}{2g},$$

или, заменяя $\frac{\lambda}{d} \cdot l = \xi'$, получим:

$$H_z = (\xi' + \Sigma \xi) \frac{\gamma v^2}{2g}, \quad (5)$$

где $\Sigma \xi$ — сумма коэффициентов всех местных сопротивлений на рассматриваемом участке воздуховода.

Пользуясь формулой (5), расчет разветвленного трубопровода весьма удобно вести по следующей расчетной форме (табл. 1)¹.

Таблица 1

№ участка	$l_{\text{уч}}$	d	Q	V	$\frac{\lambda}{d}$	$\xi' = l_{\text{уч}} \frac{\lambda}{d}$	$\Sigma \xi$	$\xi' + \Sigma \xi$	$\frac{\gamma v^2}{2g}$	H_2	H
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

где: $l_{\text{уч}}$ — длина участка (в м),

d — диаметр трубы рассматриваемого участка (в мм),

Q — количество проходящего воздуха через участок (в м³/мин),

v — скорость воздуха (в м/сек),

$\frac{\lambda}{d}$ — количество скоростных напоров, расходуемых, на трение в трубе длиной в 1 м,

$\Sigma \xi$ — сумма коэффициентов местных сопротивлений,

H_2 — потеря напора на рассматриваемом участке (в мм вод. ст.),

H — потеря напора от начальной точки (в мм вод. ст.).

Для облегчения расчета разветвленного трубопровода по указанной расчетной форме ниже приводим значения

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{0,0125 + \frac{0,0011}{d}}{d} \quad (\text{табл. 2}), \quad \text{скоростного напора} \quad \frac{\gamma v^2}{2g}$$

(табл. 3) и $C = 60 \frac{\pi d^2}{4}$ (табл. 4), входящего в формулу

$$Q = 60 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot V = C \cdot V. \quad (6)$$

Пользуясь значением C по формуле (6), в которой дана связь между Q , V и d , можно весьма быстро определить одну из трех указанных величин по двум известным.

¹ Инж. Г. В. Жерабов. Расчет разветвленных воздухопроводов по методу динамических напоров, Журн. «Отопление и вентиляция» № 9, 1931 г.

Таблица 2

d	$\frac{\lambda}{d}$	d	$\frac{\lambda}{d}$	d	$\frac{\lambda}{d}$	d	$\frac{\lambda}{d}$
70	0,4	200	0,09	420	0,036	640	0,0222
80	0,333	10	0,084	30	0,0351	50	0,0218
90	0,275	20	0,0795	40	0,034	60	0,0215
100	0,235	30	0,0752	50	0,0331	70	0,0211
10	0,203	40	0,0714	60	0,0324	80	0,0207
15	0,191	50	0,0675	70	0,0315	90	0,0204
20	0,18	60	0,064	80	0,0307	700	0,02
25	0,17	70	0,0614	90	0,0301	10	0,0198
30	0,159	80	0,0588	500	0,0294	20	0,0195
35	0,152	90	0,0562	10	0,0287	30	0,0192
40	0,145	300	0,0537	20	0,0281	40	0,0189
45	0,138	10	0,0515	30	0,0275	50	0,0186
50	0,132	20	0,05	40	0,0269	60	0,0183
55	0,126	30	0,048	50	0,0263	70	0,0181
60	0,121	40	0,0463	60	0,0258		
65	0,116	50	0,0446	70	0,0253		
70	0,0112	60	0,0432	80	0,0248		
75	0,108	70	0,0418	90	0,0243		
80	0,103	80	0,0405	600	0,0238		
90	0,096	90	0,0392	10	0,0234		
		400	0,0382	20	0,023		
		10	0,037	30	0,0226		

Таблица 3

Скорости и их скоростные напоры при $\gamma = 1,226 \text{ кг/м}^3$

м/сек	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10.0	6.25	6.36	6.5	6.64	6.76	6.9	7.03	7.16	7.28	7.44
11.0	7.57	7.70	7.82	7.97	8.12	8.27	8.42	8.55	8.70	8.86
12.0	9.00	9.15	9.3	9.45	9.60	9.75	9.9	10.05	10.2	10.4
13.0	10.55	10.7	10.9	11.05	11.2	11.4	11.57	11.74	11.9	12.1
14.0	12.3	12.45	12.6	12.8	13.0	13.15	13.35	13.53	13.7	13.9
15.0	14.1	14.3	14.48	14.65	14.85	15.05	15.22	15.42	15.6	15.8
16.0	16.0	16.2	16.4	16.6	16.85	17.05	17.25	17.5	17.7	17.9
17.0	18.1	18.3	18.5	18.75	18.95	19.2	19.4	19.65	19.85	20.05
18.0	20.3	20.5	20.75	20.95	21.2	21.45	21.7	21.9	22.15	22.4
19.0	22.6	22.85	23.1	23.35	23.6	23.85	24.1	24.35	24.6	24.8
20.0	25.0	25.3	25.6	25.8	26.1	26.3	26.6	26.9	27.1	27.4
21.0	27.6	27.9	28.2	28.4	28.7	28.9	29.2	29.5	29.8	30.0
22.0	30.3	30.6	30.9	31.2	31.5	31.8	32.0	32.3	32.6	32.9
23.0	33.1	33.4	33.7	34.0	34.3	34.6	34.9	35.2	35.5	35.8
24.0	36.0	36.4	36.7	37.0	37.3	37.6	37.9	38.2	38.5	38.8
25.0	39.1	39.4	39.7	40.0	40.4	40.7	41.0	41.3	41.6	41.9
26.0	42.3	42.6	42.9	43.2	43.6	43.9	44.2	44.5	44.9	45.2
27.0	45.6	45.9	46.2	46.5	46.8	47.2	47.6	48.0	48.3	48.6
28.0	49.0	49.3	49.6	50.0	50.3	50.7	51.0	51.3	51.7	52.1

Таблица 4

d	c	d	c	d	c	d	c	d	c	d	c
100	0,471	200	1,89	310	4,52	425	8,5	540	13,7	655	20,2
105	0,518	205	1,98	15	4,67	30	8,7	45	13,95	60	20,5
110	0,571	10	2,08	20	4,82	35	8,9	50	14,2	65	20,8
115	0,623	15	2,18	25	4,97	40	9,1	55	14,5	70	21,1
120	0,68	20	2,28	30	5,12	45	9,31	60	14,7	75	21,4
125	0,736	25	2,38	35	5,27	50	9,52	65	15,0	80	21,7
130	0,797	30	2,49	40	5,43	55	9,74	70	15,3	85	22,0
135	0,858	35	2,60	45	5,60	60	9,96	75	15,55	90	22,4
140	0,925	40	2,72	50	5,77	65	10,18	80	15,85	95	22,7
145	0,99	45	2,83	55	5,93	70	10,4	85	16,1	700	23,0
150	1,06	50	2,95	60	6,10	75	10,61	90	16,4	10	23,7
155	1,13	55	3,06	65	6,26	80	10,82	95	16,65	20	24,4
160	1,21	60	3,18	70	6,43	85	11,05	600	16,95	30	25,1
165	1,28	65	3,31	75	6,61	90	11,3	05	17,2	40	25,8
170	1,36	70	3,43	80	6,79	95	11,53	10	17,5	50	26,5
175	1,44	75	3,56	85	6,97	500	11,75	15	17,8	60	27,2
180	1,53	80	3,69	90	7,15	05	12,0	20	8,1	70	27,9
185	1,61	85	3,82	95	7,33	10	12,2	25	18,4		
			3,82	400	7,52	15	12,45	30	18,7		
190	1,7	90	3,96	405	7,72	20	12,7	35	19,0		
195	1,79	295	4,09	410	7,91	25	12,95	40	19,25		
		300	4,23	415	8,1	30	13,2	45	19,55		
		305	4,37	420	8,3	35	13,45	50	19,85		

Следует отметить, что расчет магистрали сравнительно прост, а именно: на основе установленного количества протекаемого через расчетный участок магистрали воздуха и принятой на этом участке скорости воздуха определяем диаметр трубы. Зная диаметр трубы и геометрическую длину участка, определяем $\xi = l_{\text{уч}} \frac{\lambda}{d}$, а по геометрическим очертаниям рассматриваемого участка находим $\Sigma\xi$.

Теперь нетрудно определить и потерю напора на данном участке, которая будет равна: $H = (\xi' + \Sigma\xi) \frac{\gamma v^2}{2g}$.

Расчет ответвлений

Расчет ответвлений ведется по известному нам напору H_z и количеству забираемого ответвлением воздуха. Исходя из этого, мы должны найти такой диаметр трубы, чтобы потеря напора в ответвлении равнялась полученному при расчете магистрали напору в узле приключения к ней рассматриваемого ответвления, т. е. $H_z = H$, (7)

где: H_z — потеря напора в ответвлении,

H — потеря напора в магистрали от начальной ее точки до места приключения ответвления (располагаемый напор).

До сих пор эта задача решается путем подбора соответствующего диаметра трубы. Это ведет к ряду повторных поверочных расчетов. Так как тот диаметр трубы ответвления, которым мы первоначально задались, может не удовлетворить равенству (7), то полученную разницу в напоре необходимо погасить соответствующим изменением диаметра, производя каждый раз поверочный расчет. Безусловно, что человек, обладающий достаточным опытом расчета разветвленных трубопроводов, может, если не сразу, то очень быстро, найти требуемый диаметр трубы. Однако это не может служить поводом для рекомендации данного метода расчета ответвлений. Поскольку при расчете ответвления мы должны найти диаметр, удовлетворяющий равенству (7), по известным нам расчетным величинам $Q, H, \Sigma \xi, l$, то метод подбора, связанный с рядом повторных пересчетов, должен быть заменен строгим расчетом, вытекающим из основных вышеприведенных формул (5) и (7). Изложение указанного расчета ответвлений и является основной задачей настоящей работы.



Рис. 1.
Схема одиночного ответвления.

Необходимо отметить, что в разветвленных системах трубопроводов мы имеем два вида ответвлений, присоединяемых к магистрали, а именно: одиночное (рис. 1) и разветвленное (рис. 2).

Расчет каждого из них рассмотрим отдельно.

Расчет одиночного ответвления

Потеря напора в рассматриваемом одиночном ответвлении в соответствии с формулами (5) и (7) будет равна:

$$H_z = \left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \xi \right) \frac{\gamma v^2}{2g} = H. \quad (8)$$

Заменяя скорость движения воздуха в ответвлении

$$V = \frac{Q}{60 \cdot \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{Q}{15 \pi d^2}$$

получим

$$\left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot \left(\frac{Q}{15 \pi d^2} \right)^2,$$

откуда

$$H = \frac{(13.7 d^4)}{\left(\frac{\lambda}{d} + \frac{\Sigma \xi}{1} \right)} = \frac{Q^2}{H}, \quad (9)$$

так как

$$\frac{2g}{\gamma} \approx 16.$$

Из формулы (9) заключаем, что для данного ответвления правая часть равенства и отношение $\frac{\Sigma \xi}{l}$ являются постоянными величинами, определяющими диаметр трубопровода. Таким образом, зная $\frac{Q^2 l}{H}$ и $\frac{\Sigma \xi}{l}$, не представляет трудности определить и диаметр трубопровода рассматриваемого ответвления. Для облегчения решения этой задачи по формуле (9) составлена номограмма (№ 1) в логарифмических координатах, где по оси абсцисс отложены значения $\frac{Q^2 l}{H}$, а по оси ординат — диаметр d , приняв величину $\frac{\Sigma \xi}{l}$ за параметр.

Пользование указанной номограммой при расчете ответвления покажем на следующем примере:

Пример.

Рассчитать ответвление (рис. 1), имеющее геометрическую длину $l = 7,3$ м, три колена с $\alpha = 90^\circ$ и коэффициент сопротивления входа $\xi_{вх} = 0,5$. Количество отсасываемого воздуха через ответвления $Q = 16$ м³/мин, а располагаемый напор $H = 42$ мм вод. ст.

Решение. Для пользования номограммой № 1 при определении диаметра трубы находим величины $\frac{Q^2 l}{H}$ и $\frac{\Sigma \xi}{l}$:

$$1) \quad \frac{Q^2 l}{H} = \frac{16^2 \cdot 7,3}{42} = 44,5,$$

$$2) \quad \frac{\Sigma \xi}{l} = \frac{3,0,2 + 0,5}{7,3} = \frac{1,1}{7,3} = 0,15,$$

где 0,2 — коэффициент местного сопротивления, учитывающий потери напора в колене (ξ_k). На оси абсцисс номограммы № 1 находим точку, соответствующую отметке 44,5, из которой восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с линией $\frac{\Sigma \xi}{l} = 0,15$.

Из точки пересечения спускаем перпендикуляр на ось ординат и находим искомый диаметр $d = 139$ мм.

Для расчета округленно принимаем $d = 140$ мм.

После того как по номограмме № 1 мы нашли диаметр трубопровода, дальнейший расчет ответвления лучше вести по расчетной форме в такой последовательности: в расчетную форму (табл. 5) записываем известные и найденные величины $l_{уч}$, d , $\Sigma \xi$ и H_2 . Далее по таблице 2 находим $\frac{\lambda}{d} = 0,145$ и определяем $\xi' = 1 \cdot \frac{\lambda}{d} = 7,3 \cdot 0,145 = 1,06$ и $\xi' + \Sigma \xi = 1,06 + 1,1 = 2,16$.

Таблица 5

№ участка	$l_{\text{уч}}$ м	d , мм	Q , м ³ /мин	V , м/сек	$\frac{\lambda}{d}$	$\xi' = 1 \cdot \frac{\lambda}{d}$	$\Sigma \xi$	$\xi' + \Sigma \xi$	$\frac{\gamma v^2}{2g}$	H_z	H
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	7,3	140	16,3	17,6	0,145	1,06	1,1	2,16	19,4	42	

Теперь, деля располагаемый напор H_z на $\xi' + \Sigma \xi$, получим скоростной напор, т. е.

$$\frac{\gamma v^2}{2g} = \frac{H_z}{\xi' + \Sigma \xi} = \frac{42}{2,16} = 19,4.$$

По найденному по таблице 3 скоростному напору находим скорость воздушного потока в ответвлении $V=17,6$. Зная скорость воздушного потока и диаметр трубы, окончательно проверяем и уточняем количество отсасываемого воздуха, т. е. $Q = C \cdot V$, где C берем по таблице 4.

Для нашего случая $Q = 0,925 \cdot 17,6 = 16,3$ м³/мин, что и принимаем для дальнейшего расчета.

Как видим, найденное количество отсасываемого воздуха не совпало с первоначально принятым количеством, по которому велся расчет. Это объясняется тем, что принятый нами диаметр трубопровода несколько больше расчетного.

Примечание. Проф. Н. С. Войтинский указывает на необходимость сопротивления входа (приемника) выражать коэффициентом от скоростного напора в приключенной трубе при диаметре d_H , указанном в таблице нормативных расходов воздуха. В этом случае потеря напора на преодоление сопротивления входа (приемника) определится:

$$H_{bx} = \xi_{bx} \cdot \frac{\gamma v^2}{2g} = \xi_{bx} \cdot \frac{\gamma}{2g} \left(\frac{Q}{15\pi d_H^2} \right)^2;$$

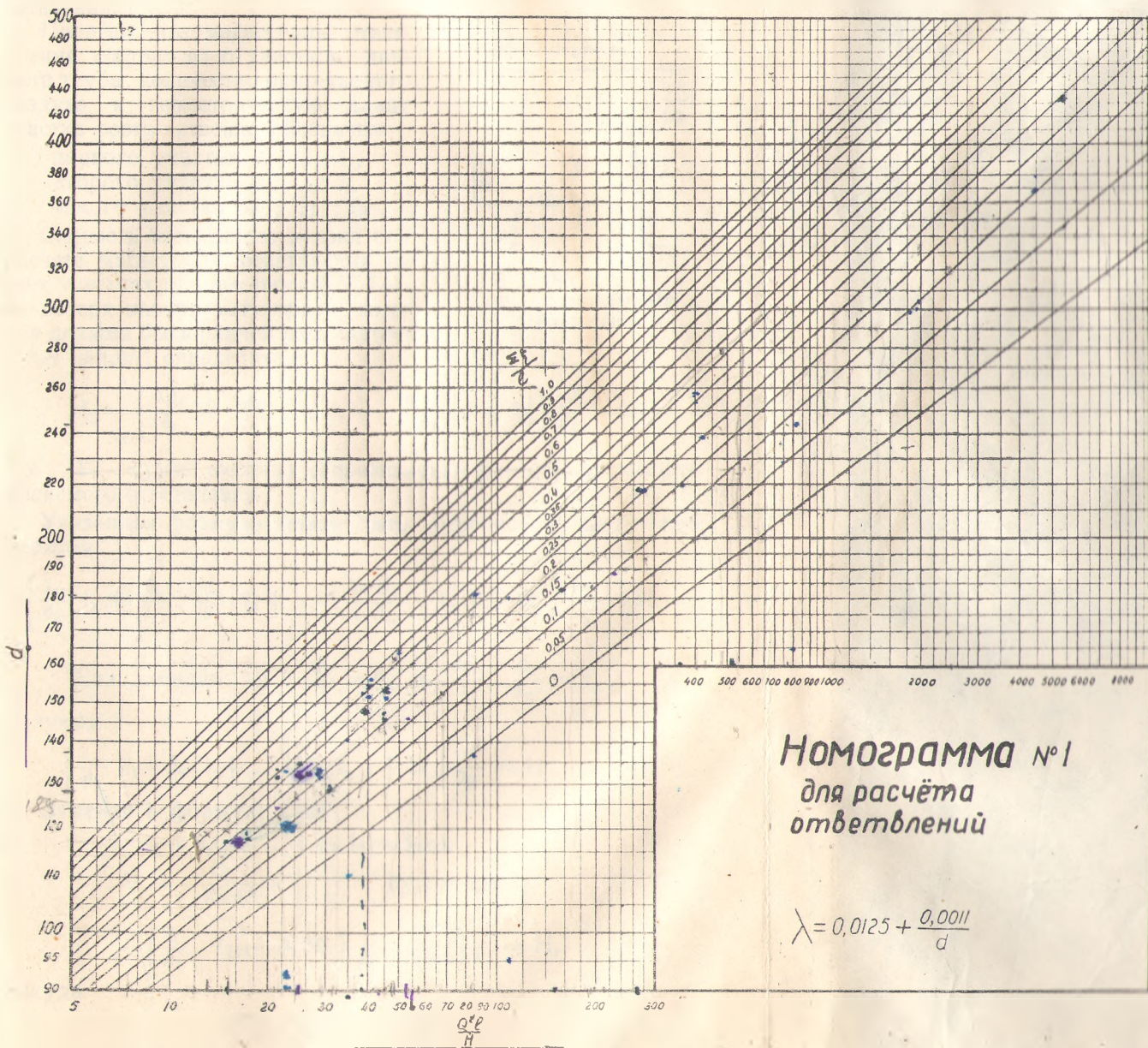
$$\text{откуда } H_{bx} = \xi_{bx} \cdot \frac{Q^2}{(13,7d_H)^4}.$$

Тогда в формуле (9) значение $\Sigma \xi$ следует брать без коэффициента входа (ξ_{bx}) и H за вычетом H_{bx} .

Расчет разветвленного ответвления

Разветвленное ответвление представляет собой ряд одиночных ответвлений, присоединяемых к магистрали ответвления как через дополнительные магистрали, так и непосредственно (рис. 2).

Расчет одиночного ответвления нами был рассмотрен. Остается рассмотреть расчет магистрали ответвления. При расчете магистрали ответвления количество протекаемого воздуха и располагаемый напор известны, остается определить диаметр



труб. Учитывая, что в расчете как дополнительной магистрали, так и основной магистрали отвления нет отличия, то в дальнейшем и будем рассматривать просто расчет магистрали отвления.

Полагая, что магистраль отвления состоит из n участков, диаметр трубы, количество протекаемого воздуха и геометрическую длину участка соответственно обозначим:

первого участка d_1 ; Q_1 ; l_1 ,
 второго участка d_2 ; Q_2 ; l_2 ,
 n -го участка d_n ; Q_n ; l_n .

Скорость воздушного потока при расчете магистрали отвления на всех участках примем равной V . Тогда потеря напора магистрали, которая должна быть равной располагаемому напору, определится:

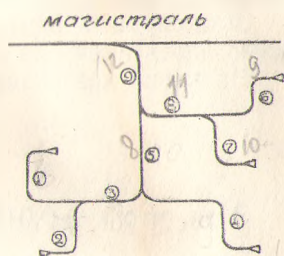


Рис. 2.
Схема разветвленного отвления.

$$H_2 = \left(\frac{\lambda_1 l_1}{d_1} + \frac{\lambda_2 l_2}{d_2} + \dots + \frac{\lambda_n l_n}{d_n} + \Sigma \xi \right) \frac{\gamma v^2}{2g} = H,$$

где $\Sigma \xi$ — сумма местных сопротивлений магистрали рассматриваемого отвления.

Указанная формула может быть переписана следующим образом:

$$\left[\frac{\lambda_1}{d_1} \left(l_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot l_2 + \dots + \frac{\lambda_n}{\lambda_1 d_n} \cdot l_n \right) + \Sigma \xi \right] \frac{\gamma v^2}{2g} = H.$$

Или, заменяя $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} = \beta_2$ и $\frac{\lambda_n}{\lambda_1} \cdot \frac{d_1}{d_n} = \beta_n$,

получим

$$\left[\frac{\lambda_1}{d_1} (l_1 + \beta_2 \cdot l_2 + \dots + \beta_n l_n) + \Sigma \xi \right] \frac{\gamma v^2}{2g} = H. \quad (10)$$

Заменяя в формуле (10)

$$l_1 + \beta_2 l_2 + \dots + \beta_n l_n = l_{расч} \quad (11)$$

и $V = \frac{Q_1}{15\pi d^2}$, будем иметь

$$\left(\frac{\lambda_1}{d_1} \cdot l_{расч} + \Sigma \xi \right) \frac{\gamma}{2g} \cdot \left(\frac{Q_1}{15\pi d^2} \right)^2 = H,$$

откуда

$$\frac{(13,7d_n)^4}{\left(\frac{\lambda_1}{d_1} + \frac{\Sigma \xi}{l_{расч}} \right)} = \frac{Q_1^2 l_{расч}}{H} \quad (12)$$

Полученная формула (12) идентична формуле (9) для расчета одиночного ответвления. Таким образом, расчет магистрали ответвления может быть сведен к расчету одиночного ответвления, вводя в расчетную формулу (9) вместо геометрической длины расчетную длину магистрали ответвления.

Для определения расчетной длины по формуле (11) необходимо знать значения коэффициентов β .

Значение коэффициентов β_n определяется из равенства

$$\beta_n = \frac{\lambda_n}{\lambda_1} \cdot \frac{d_1}{d_n} \quad (13)$$

Зная, что $\lambda = 0,0125 + \frac{0,0011}{d}$ и $d = \sqrt{\frac{Q}{15\pi v}}$, и подставляя эти значения в формулу (13), будем иметь:

$$\beta_n = \frac{\sqrt{Q_n} + 0,597 \sqrt{v}}{\sqrt{Q_1} + 0,597 \sqrt{v}} \cdot \frac{Q_1}{Q_n}$$

Значение величины $0,597 \sqrt{v}$ в зависимости от скорости дается в таблице 6.

Таблица 6

<i>м/сек</i>	14	16	18	20	22	24
$0,597 \sqrt{v}$	2,23	2,39	2,53	2,67	2,8	2,92

Учитывая, что в цеховых эксгаутерных установках скорости воздуха в трубопроводе колеблются в пределах 14—24 м/сек, значение величины $0,597 \sqrt{v}$ при определении коэффициента β_n можно принять равной 2,5. При этом следует отметить, что изменение величины $0,597 \sqrt{v}$ в пределах 2,2—2,9 существенного влияния на изменение коэффициента β_n не окажет.

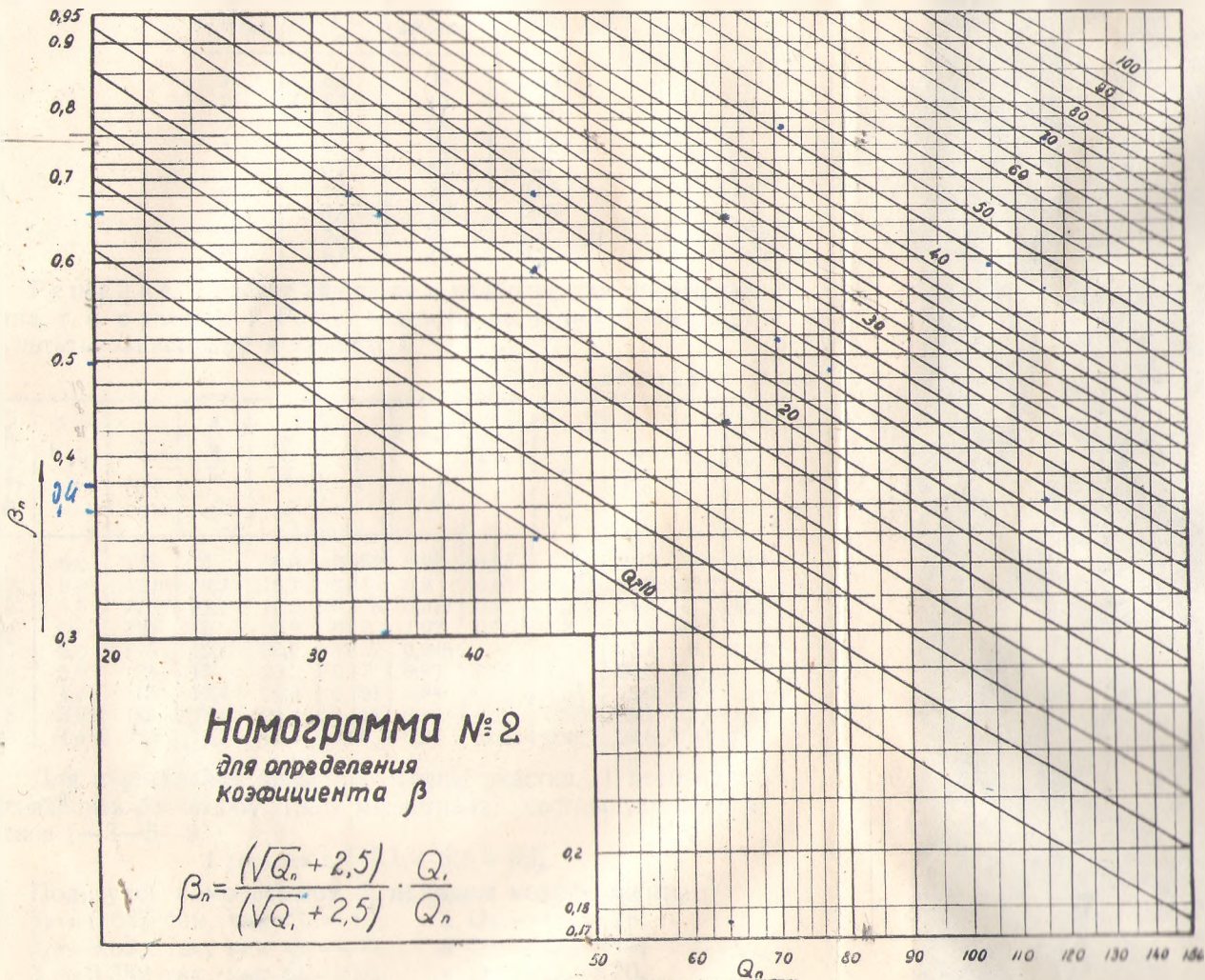
Тогда будем иметь

$$\beta_n = \frac{\sqrt{Q_n} + 2,5}{\sqrt{Q_1} + 2,5} \cdot \frac{Q_1}{Q_n} \quad (14)$$

Для определения коэффициента β_n по формуле (14) построена номограмма (№ 2) в логарифмических координатах, где по оси абсцисс отложены значения Q_n , а по оси ординат—значения коэффициента β_1 , приняв Q_1 за параметр. Порядок расчета разветвленного ответвления покажем на следующем примере.

Пример.

Рассчитать разветвленное ответвление (рис. 2), если предполагаемый напор $H=65$ мм вод. ст. Расчетные данные, относящиеся к отдельным участкам, даются в таблице 7.



На расчетной схеме (рис. 2) цифрами в кружках обозначаем номер участков.

Таблица 7

№ участка	l _{уч} , м	Q, м ³ /мин	Σ ξ
1	6,0	16	0,65
2	5,0	12	0,65
3	3,5	28	0,2
4	6,0	15	0,85
5	3,0	43	—
6	5,0	15	0,65
7	4,6	12	0,65
8	3,0	27	0,2
9	4,0	70	0,2

16
28,7
43,7
71,1

Решение. Расчет начинаем с наиболее удаленного участка, т. е. с участка 1. Расчет ведем по расчетной форме и результаты записываем в таблицу 8.

Таблица 8

№ участка	l _{уч} , м	d, мм	Q, м ³ /мин	V, м/сек	$\frac{\lambda}{d}$	$\xi' = \gamma \frac{l_{уч}}{d}$	Σ ξ	$\frac{\Sigma \xi}{\gamma}$	$\frac{\gamma v^2}{2g}$	H _z	H
1	6,0	135	16	18,6	0,152	0,91	0,65	1,56	21,7	33,9	33,3
2	5,0	120	12,7	18,7	0,18	0,9	0,65	1,55	21,9	33,9	
3	3,5	175	28,7	19,9	0,108	0,377	0,2	0,577	24,8	14,3	48,2
4	6,0	125	15	20,2	0,17	1,02	0,85	1,87	25,6	48,2	
5	3,0	215	43,7	20,0	0,082	0,246	—	0,246	25,1	6,1	54,3
6	5,0	125	15	20,2	0,17	0,85	0,65	1,5	25,6	3,84	
7	4,6	115	12,4	20,0	0,191	0,88	0,65	1,53	25,0	38,4	
8	3,0	165	27,4	21,4	0,116	0,35	0,2	0,55	28,7	15,9	54,3
9	4,0	275	71,1	19,9	0,06	0,24	0,2	0,44	24,8	10,9	65,2

Для определения диаметра трубы участка 1 необходимо определить расчетную длину магистрали, состоящую из участков 1—3—5—9.

$$l_{расч} = l_1 + \beta_3 l_3 + \beta_5 l_5 + \beta_9 l_9.$$

Пользуясь номограммой 2, находим коэффициенты:

$$\beta_3 = 0,687 \text{ так, как } Q_1 = 16, \quad \text{а } Q_p = Q_3 = 28;$$

$$\beta_5 = 0,52 \text{ так, как } Q_1 = 16, \quad \text{а } Q_p = Q_5 = 43;$$

$$\beta_9 = 0,382 \text{ так, как } Q_1 = 16, \quad \text{а } Q_p = Q_9 = 70.$$

Тогда

$$l_{расч} = 6 + 0,687 \cdot 3,5 + 0,52 \cdot 3 + 0,382 \cdot 4 \approx 11,5 \text{ м.}$$

Зная, что, $\Sigma \xi = 0,65 + 0,2 + 0,2 = 1,05$, находим

$$\frac{\Sigma \xi}{l_{расч}} = \frac{1,05}{11,5} = 1,091, \quad \text{а}$$

$$\frac{Q^2 l_{расч}}{H} = \frac{16^2 \cdot 11,5}{65} = 45,3.$$

Пользуясь номограммой № 1, по найденным величинам находим, что расчетный диаметр трубы—133 мм. Принимаем $d=135$ мм. Теперь, пользуясь расчетной формой и таблицами 2, 3 и 4, определяем потерю напора на участке 1 рассматриваемого ответвления.

Порядок расчета следующий: записываем в расчетную форму известные и найденные нами величины:

$$l_{yч} = 6 \text{ м}, d = 135 \text{ мм}, Q = 16 \text{ м}^3/\text{мин} \text{ и } \Sigma \xi = 0,65.$$

Зная d и Q , пользуясь таблицей 4, определяем скорость:

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{16}{0,858} = 18,6 \text{ м/сек}, \text{ а по скорости в таблице 3}$$

находим скоростной напор $\frac{\gamma v^2}{2g} = 21,7$. По таблице 2 находим отношение $\frac{\lambda}{d} = 0,152$ и вычисляем:

$$\xi' = l_{yч} \frac{\lambda}{d} = 6 \cdot 0,152 = 0,91.$$

$$\xi' = l_{yч} \frac{\lambda}{d} = 6 \cdot 0,152 = 0,91.$$

Находя сумму коэффициентов $\xi' + \Sigma \xi = 0,91 + 0,65 = 1,56$ и умножая их на скоростной напор, получаем потерю напора на участке, т. е.

$$H_z = (\xi' + \Sigma \xi) \frac{\gamma v^2}{2g} = 1,56 \cdot 21,7 = 33,9 \text{ мм вод. ст.}$$

Теперь переходим к расчету участка 2, который является одиночным ответвлением. Располагаемый напор его $H_2=33,9$.

Для расчета участка 2, как одиночного ответвления, определяем:

$$\frac{\Sigma \xi}{1} = \frac{0,65}{5} = 0,13 \text{ и } \frac{Q^2 l}{H} = \frac{12^2 \cdot 5}{33,9} = 21,3.$$

По номограмме № 1 находим, что расчетный диаметр трубы—117 мм. Принимая $d=120$, мы этим самым несколько больше будем отсасывать воздуха, что и отразим в нашем расчете, а именно: в расчетную форму выписываем следующие известные и найденные нами величины: $l_{yч} = 5$ м, $d = 120$ м, $\Sigma \xi = 0,65$ и располагаемый напор $H_z = 33,9$.

Далее находим по таблице 2 отношения $\frac{\lambda}{d} = 0,18$, определяем коэффициент

$$\xi' = 1 \cdot \frac{\lambda}{d} = 5 \cdot 0,18 = 0,9.$$

и сумму коэффициентов $\xi' + \Sigma \xi = 0,9 + 0,65 = 1,55$.

Теперь находим скоростной напор:

$$\frac{\gamma v^2}{2g} = \frac{H}{\xi' + \Sigma \xi} = \frac{33,9}{1,55} = 21,9,$$

а по скоростному напору по таблице 3 находим скорость $V=18,7$ м/сек.

Зная скорость v и диаметр трубы d , уточняем количество отсасываемого воздуха, а именно:

$$Q = CV = 0,68 \cdot 18,7 = 12,7 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Полученное количество воздуха $12,7 \text{ м}^3/\text{мин}$ и записываем в расчетную форму, вместо ранее принятого $Q = 12 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Переходим к расчету участка $\text{В. } \S$

Количество проходящего по участку З воздуха будет равно $28,7 \text{ м}^3/\text{мин}$. Диаметр трубы мы можем определить по расчету или по Q и V , задаваясь при этом скоростью, равной или несколько большей скорости воздуха предыдущего участка магистрали ответвления. Учитывая, что потеря напора в ответвлении должна быть равной располагаемому напору, целесообразнее диаметр трубы любого участка магистрали ответвления находить по расчету.

Расчетная длина оставшейся магистрали ответвления (З—5—9) будет:

$$l_{\text{расч}} = l_3 + \beta_5 l_5 + \beta_9 l_9, \text{ где коэффициенты}$$

β_5 и β_9 находим по номограмме № 2:

$$\beta_5 = 0,76, \text{ так как } Q_1 = Q_3 = 28,7 \text{ м}^3/\text{мин}, \text{ а } Q_{\text{п}} = Q_5 = 43,7;$$

$$\beta_9 = 0,565, \text{ так как } Q_1 = Q_3 = 28,7 \text{ м}^3/\text{мин}, \text{ а } Q_{\text{п}} = Q_9 = 70,7.$$

$$\text{Тогда } l_{\text{расч}} = 3,5 + 0,76 \cdot 3 + 0,565 \cdot 4 = 8,04,$$

$$\frac{\sum \xi}{l_{\text{расч}}} = \frac{0,2 + 0,2}{8,04} = 0,05,$$

$$\frac{Q^2 l_{\text{расч}}}{H} = \frac{28,7^2 \cdot 8,04}{65 - 33,9} \approx 212.$$

По номограмме № 1 находим: $d = 175 \text{ мм}$.

Далее определяем потерю напора на участке З и результаты подсчетов заносим в расчетную таблицу.

Расчет участка 4 представляет расчет одиночного ответвления.

Определяем

$$\frac{\sum \xi}{l} = \frac{0,85}{6,0} = 0,14 \text{ и}$$

$$\frac{\theta^2 l}{H} = \frac{15^2 \cdot 6,0}{48,2} = 28,0.$$

По номограмме № 1 находим: $d = 125 \text{ мм}$.

Результаты дальнейшего расчета заносим в таблицу 8 .

Расчет участка 5 ведем, как расчет магистрали ответвления.

$$\text{Для этого определяем } l_{\text{расч}} = l_5 + \beta_9 l_9,$$

где $\beta_9 = 0,74$, так как $Q_1 = Q_5 = 43,7 \text{ м}^3/\text{мин}$, а

$$Q_{\text{п}} = Q_9 = 70,7 \text{ м}^3/\text{мин}; \text{ тогда } l_{\text{расч}} = 3 + 0,74 \cdot 4 = 6,0,$$

$$\frac{\sum \xi}{l_{\text{расч}}} = \frac{0,2}{6} = 0,033 \text{ и } \frac{\theta^2 l_{\text{расч}}}{H} = \frac{43,7^2 \cdot 6}{65 - 48,2} = 680.$$

Теперь по номограмме № 1 находим: $d=215$ мм.

Определяем потерю напора на участке 5 и результаты подсчетов заносим в расчетную таблицу.

Расчет участка 6 ведется, как расчет магистральной ответвления. Поэтому определяем:

$$l_{расч} = l_6 + \beta_8 l_8,$$

где $\beta_8 = 0,67$, так как $Q_1 = Q_6 = 15$ м³/мин, а

$$Q_{п} = Q_8 = 27 \text{ м}^3/\text{мин}, \quad l_{расч} = 5,0 + 0,67 \cdot 3 = 7,0,$$

$$\frac{\sum \xi}{l_{расч}} = \frac{0,65 + 0,2}{7,0} \approx 0,12 \quad \text{и} \quad \frac{Q^2 l_{расч}}{H} = \frac{15^2 \cdot 7,0}{54,3} = 29,0.$$

По номограмме № 1 округленно находим: $d=125$ мм.

Расчет потери напора на участке 6 заносим в расчетную таблицу.

Расчет участка 7 ведется, как расчет одиночного ответвления:

$$\frac{\sum \xi}{l} = \frac{0,65}{4,6} = 0,14 \quad \text{и} \quad \frac{Q^2 l}{H} = \frac{12^2 \cdot 4,6}{38,4} = 17,2. \quad \}$$

По номограмме № 1 округленно находим: $d=115$ мм.

Результаты дальнейшего расчета участка 7 заносим в расчетную таблицу, внося соответствующее изменение в количество отсасываемого воздуха.

Расчет участка 8 ведем, как расчет одиночного ответвления.

$$\frac{\sum \xi}{l} = \frac{0,2}{3} = 0,067 \quad \text{и} \quad \frac{Q^2 l}{H} = \frac{27,4^2 \cdot 3}{54,3 - 38,4} = 141.$$

По номограмме № 1 находим: $d=165$ мм.

Дальнейший расчет ведем по расчетной форме.

Переходим к расчету последнего участка ответвления. Расчет участка 9 ведем, как расчет одиночного ответвления:

$$\frac{\sum \xi}{l} = \frac{0,2}{4} = 0,05 \quad \text{и} \quad \frac{Q^2 l}{H} = \frac{71,1^2 \cdot 4}{65 - 54,3} = 1860.$$

По номограмме № 1 находим: $d=275$ мм.

Результаты расчета заносим в расчетную таблицу.

Общая потеря напора в ответвлении получилась 65,2, а располагаемый напор—65,0. Разница чрезвычайно незначительна.

Расчет транспортной сети

Рассмотренный нами расчет разветвленных трубопроводов относится к движению чистого воздуха. При расчете пневматических установок, предназначенных для удаления и транспортирования отходов, мы должны учитывать находящийся в воздушном потоке материал.

Потерю напора в трубопроводах для смеси принято определять по формуле

$$H_{см} = H_z (1 + K\mu) + H_n, \quad (15)$$

где: $H_{см}$ — потеря напора для смеси в $мм$ вод. ст.,

H_z — потери напора для чистого воздуха =

$$= \left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \xi \right) \frac{\gamma v^2}{2g} \text{ мм вод. ст.,}$$

K — коэффициент, зависящий от μ и от отношения скорости воздуха к скорости витания (причем с увеличением этого отношения коэффициент K уменьшается),

μ — весовая концентрация,

H_n — дополнительная потеря напора на подъем материала = $\mu h \gamma$ $мм$ вод. ст. (где h — высота подъема материала в $м$).

Учитывая дополнительные потери напора при движении смеси, расчет разветвленного трубопровода необходимо вести по другой, несколько измененной расчетной форме, представленной в таблице 9.

Таблица 9

№ участка	$l_{уч.}$ $м$	d $мм$	$Q_{м}^3/мин$	$V_{м} м/сек$	$\frac{\lambda}{d}$	$\frac{P}{\gamma} = \frac{v^2}{g}$	$\Sigma \xi$	$\frac{\Sigma \xi + \lambda}{d}$	$\frac{\gamma v^2}{2g}$	H_z	$+ K\mu$	$\frac{H_z'}{H_z} = \frac{1 + K\mu}{1}$	$\frac{H_n}{\mu h \gamma}$	$\frac{H_{см}}{H_z + H_n}$	$H_{см}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Учитывая, что расчет магистрали ясен из представленной расчетной формы (табл. 9), остановимся только на расчете ответвления.

Потеря напора в ответвлении, как было ранее указано, должна равняться располагаемому напору, т. е.

$$H_{см} = H_z (1 + K\mu) + H_n = \frac{\gamma v^2}{2g} \left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \xi \right) (1 + K\mu) + \mu h_0 \gamma, \quad (16)$$

откуда находим:

$$\frac{\gamma v^2}{2g} \left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \xi \right) = \frac{H_{см} - \mu h_0 \gamma}{1 + K\mu}. \quad (17)$$

Заменяя в формуле (17)

$$\frac{H_{см} - \mu h_0 \gamma}{1 + K\mu} = H_{расч}, \quad (18)$$

получим:

$$\frac{\gamma v^2}{2g} \left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \xi \right) = H_{расч}. \quad (19)$$

Полученная формула аналогична формуле (8), а поэтому следует:

$$\frac{(13.7d)^4}{\left(\frac{\lambda}{d} + \frac{\Sigma \xi}{l}\right)} = \frac{Q^2}{N_{\text{расч}}} \quad (20)$$

Исходя из того, что расчетная формула (20) аналогична формуле (9), по которой составлена номограмма № 1, расчет ответвлений для смеси аналогичен расчету ответвлений для чистого воздуха.

Это дает нам возможность при расчете ответвлений для смеси пользоваться расчетными номограммами (№ 1) и (№ 2).

Рассмотрим некоторые возможные частные случаи значений $N_{\text{расч}}$.

По формуле (18) имеем:

$$N_{\text{расч}} = \frac{N_{\text{см}} - \mu h_m \gamma}{1 - K_{\mu}},$$

где $N_{\text{см}} = N_z (1 + K_{\mu}) + \mu h_m \gamma$.

Принимая равную весовую концентрацию для всех участков магистрали и ответвлений, получим:

$$N_{\text{расч}} = \frac{N_z (1 + K_{\mu}) + \mu \gamma (h_m - h_0)}{1 - K_{\mu}}, \quad (21)$$

где: h_m — высота подъема материала в магистрали,

h_0 — высота подъема материала в ответвлении.

При $h_m = h_0$ будем иметь:

$$N_{\text{расч}} = \frac{N_z (1 + K_{\mu})}{1 + K_{\mu}} = N_z. \quad (22)$$

Таким образом, принимая равную концентрацию для всех участков магистрали и ответвлений, расчет разветвленного трубопровода для смеси сводится к его расчету для чистого воздуха. Полный же напор с учетом влияния смеси определится:

$$N_{\text{см}} = N_z (1 + K_{\mu}) + \mu h_m \gamma. \quad (23)$$

При расчете цеховых эксгаустерных установок, работающих при низкой концентрации, очень часто вообще пренебрегают наличием в воздушном потоке отходов и разветвленный трубопровод рассчитывают, как для чистого воздуха.

Считаем, что изложенный метод расчета разветвленных трубопроводов является наиболее простым и строгим, дает ясную картину движения воздуха и взаимосвязь всех основных расчетных величин (d , v , Q и N).