

Инженер Г. И. ФУКС

**К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ  
НАИВЫГОДНЕЙШЕГО ДИАМЕТРА  
РАЗВЕТВЛЕННОГО ТРУБОПРОВОДА  
СЖАТОГО ГАЗА**

---

Томск---1929

## **К вопросу о выборе наиболее выгодного диаметра разветвленного трубопровода сжатого газа.**

При проектировании трубопровода для сжатого газа или пара, в частности воздухопровода пневматической сило-распределительной установки, вопрос о выборе диаметра труб является основным. Задав-шись, как это обычно делают, скоростью газа в трубе или каким-либо допустимым падением давления, диаметр определить легко. Но при этом нет уверенности, что выбранные диаметры действительно наиболее выгодные, т. е. дадут наименьшую стоимость 1 куб. метра газа.

Blaesz\*) дает способ подсчета наиболее выгодной скорости, по которой можно затем подсчитать диаметр трубы. Этот способ вполне подходит для простой трубы. Но для сложного трубопровода он, очевидно, неприменим, т. к. легко может оказаться, что наиболее выгодная скорость будет различной для различных его частей. Остается лишь путь подбора: сравнить несколько вариантов подсчетов по стоимости 1 куб. метра сжатого газа и выбрать наиболее выгодный. Этот путь довольно длинный и, кроме того, не дает полной уверенности в правильности выбора варианта.

Между, тем поставленная задача по существу во всех ее частях однозначна, т. е. имеет только одно возможное решение при данных конкретных условиях.

Применение метода эквивалентных длин трубопровода особенно упрощает практическое разрешение этого вопроса. Впервые этот метод эквивалентности был применен, как известно, Томсоном, при расчете электрической сети. Инж. Я. Карчевский\*\*) применил этот способ для решения вопроса о выборе диаметра трубопровода для воды. Специальная форма уравнений, написанная им, и ограничения, не позволяют использовать его соотношения непосредственно для расчета диаметров газопровода.

Во избежание недоразумений необходимо оговориться, что предварительное (до проектирования) точное решение вопроса о выборе наиболее выгодных диаметров разветвленного трубопровода, возможно только с известной степенью точности, зависящей отчасти от опыта проектирующего. Это становится понятным, если учесть, что при предварительном расчете приходится задаваться рядом величин, которые окончательно и точно выясняются лишь в конце расчета. Приведенный метод характеризуется тем, что при пользовании им:

1. Число неизвестных величин, которыми приходится задаться предварительно, сводится к минимуму.
2. Путем повторного, в случае необходимости, пересчета, мы получаем все более точное решение вопроса.
3. При всякой заданной установке (т. е. известных размерах трубопровода) совершенно точно решается вопрос, является ли эта установка наиболее выгодной.

\*) V. Blaesz Dis strömung in Rohren

\*\*) Я. Карчевский. О расчете наиболее выгодного диаметра труб при насосном отоплении. Вестник Инженеров, 1915 г.

Таким образом сокращается и упрощается работа проектирующего, а также дается ему в руки надежный способ контроля полученных результатов. Это и является оправданием указываемого метода.

## I.

Наивыгоднейшим диаметром трубопровода для сжатого газа считается такой диаметр или совокупность их при разветвленном трубопроводе, который дает наиболее дешевую стоимость одного куб. метра газа или пара на месте потребления. Стоимость 1 куб. метра слагается из значительного числа отдельных слагаемых, главные из которых:

1. Расход мощности (энергии) на сжатие газа.
2. Расход воды на охлаждение сжимаемого газа.
3. Расход на обслуживание (рабочая сила, смазочный и обтирочный материал, хозяйственные расходы и т. д.).
4. Расход на амортизацию капитальных затрат машинной установки, зданий.
5. Расход на амортизацию трубопроводов.
6. Расходы на текущий и капитальный ремонт всех сооружений для получения и транспортировки сжатого газа.

К группе 4 и 5 расходов можно прибавить, в случае необходимости, проценты на затраченный капитал и т. д.

Из этих слагаемых вполне достаточно в предварительный расчет включить наиболее важные статьи расхода. Далее, нет необходимости включать те расходы, как это будет видно дальше, которые будут оставаться практически постоянными при различных диаметрах трубопровода. Таковыми будут, например, расход на амортизацию машинного оборудования, расход на воду для охлаждения и т. д. Таким образом мы выделим расходы:

1. На энергию для получения сжатого газа.
2. На амортизацию и ремонт трубопроводов.
3. Остальные или прочие.

Расход на энергию для получения сжатого газа естественно зависит от следующих условий:

1. Количество сжимаемого газа. Пусть отдельные потребители расходуют сжатый газ в количествах  $V_1, V_2, \dots, V_n$  куб. метров в секунду.

Отдельные потребители могут расходовать газ неравномерно, а именно:

$$n_1, n_2, \dots, n_n \text{ часов в год.}$$

2. Степень сжатия потребляемого газа, т. е. отношение давлений газа потребляемого и поступающего в компрессор.

$$\frac{p}{p_1}$$

3. Степень совершенства компрессора. Вообще говоря, это величина переменная, зависящая от нагрузки. Но в каждом данном случае возможно с той или иной степенью точности задать наперед, хотя бы сообразуясь с предполагаемым графиком нагрузки и данными испытания устанавливаемого типа компрессора (гарантии фирмы), некоторый средний коэффициент отдачи. Обозначим его буквой  $\eta$ , понимая под ним изотермический коэф. отдачи газового компрессора и адиабатический коэф. для парового компрессора.

4. Стоимость энергии на валу компрессора, которую примем в „а“ рублей за лошади. силу в час.

Пользуясь этими обозначениями, а также известным выражением для затраты работы на сжатие 1 куб. метра газа, имеем полный годовой расход на энергию для сжатия газа или пара

$$K'_m = \frac{a p_1 10^4 (v_1 n_1 + v_2 n_2 + \dots)}{75 \eta} \ln \frac{p}{p_1} \text{ рублей,}$$

если идеальным процессом считать изотермический процесс или

$$K'_m = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{a p_1 10^4 (v_1 n_1 + v_2 n_2 + \dots)}{75 \eta} \left[ \left( \frac{p}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right] \text{ рублей,}$$

при идеальном адиабатическом процессе (сжатие пара.)

Вычисленный таким образом расход энергии на сжатие будет минимальным, но не наивыгоднейшим в данной установке, т. к. при этом потери давления в трубопроводе должны отсутствовать. Это обусловливает собою бесконечно большие диаметры трубопроводов, т. е., такие же расходы по их амортизации и ремонту. Поэтому в действительности компрессор должен сжимать газ до несколько большего давления, чем это необходимо в месте потребления. Это допустимое падение давления назовем „х“ атмосфер и тогда:

$$K_1 = \frac{a p_1 \cdot 10^4 \Sigma (v \cdot n)}{75 \cdot \eta} \ln \frac{p + x}{p_1} \text{ рублей} \dots \dots \dots (1)$$

$$K_1 = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{a p_1 10^4 \Sigma (v n)}{75 \cdot \eta} \left[ \left( \frac{p + x}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right] \text{ рублей.} (1^1)$$

Расход на амортизацию и ремонт трубопровода, состоящего из отдельных труб диаметром  $d_1, \dots, d_2$  метр. и т. д., и соответственно, длины

$l_1, \dots, l_2, \dots, l_3, \dots$  и т. д. метров будет зависеть от стоимости единицы длины каждой трубы в установке и допустимого для данной установки процентного отчисления на амортизацию и ремонт. Последняя величина может считаться заданной, т. е., полагаем, что ежегодные отчисления на амортизацию и ремонт с рубля стоимости трубопровода составляют

с рублей.

Стоимость 1 метра труб различного диаметра, как показывает подсчет, можно выразить с большой степенью точности соотношением

$g d^f$  рублей, где:

$g$  и  $f$  . . . . . постоянные величины

$d$  — диаметр трубы в метрах.

Для железных труб на муфтах эта зависимость совершенно точна в пределах от 2" до 8" труб. Достаточно близкое совпадение мы имеем и для других труб.

Приняв эту зависимость, легко подсчитать стоимость всего трубопровода. Нужно только учесть, что в стоимость его нужно также включить стоимость соединительных частей, фасонных частей, арматуры, работы по укладке и т. д. Указанные величины также зависят от диаметра труб, но, поскольку последний при проектировании неизвестен, их нельзя также определить предварительно. Отметим лишь, что стоимость земляных работ при укладке труб в земле может быть здесь не

учтена, т. к. последняя практически не зависит от диаметра трубы. Следовательно, этот расход можно причислить к группе прочих расходов. Расходы на соединительные части и проч., зависящие от диаметра трубопровода, мы учтем тем, что вместо действительных длин отдельных участков

$$l_1, \dots, l_2, \dots, l_3, \dots$$

введем фиктивные их длины

$$L'_1, \dots, L'_2, \dots, L'_n, \dots \text{ метров.}$$

Эти фиктивные длины подберем таким образом, чтобы стоимость всей трубы, например первой, выполненной с длиной  $L'_1$ , учитывая лишь стоимость трубопровода, равнялась бы действительной стоимости ее, при длине  $l_1$ , со всеми добавочными расходами на соединительные и фасонные части, арматуру и проч. Очевидно, вообще:

$$L' = k_2 l$$

где  $k_2 > 1$ .

Величину „ $k_2$ “ при первоначальном проектировании можно задать:

а) на глаз, с тем, чтобы по получении результата свериться, правильно ли она задана.

б) По исполнительным сметам проектов трубопроводов аналогичных устройств, вычисляя отношение стоимости 1 метра готового трубопровода к стоимости 1 метра трубы.

в) Из примерной предварительной калькуляции стоимости 1 метра готовой трубы в установке, задаваясь средней практической скоростью газа.

Необходимо отметить, что неопределенность в выборе величины „ $k_2$ “ только кажущаяся, временная, при предварительном расчете. По сводке стоимости в конце расчета сейчас же выявляется, если эта величина выбрана неправильно, и тогда расчет можно повторить до достаточного совпадения. Задавшись указанными фиктивными длинами частей трубопровода, вычисляем полную годовую стоимость трубопровода

$$K_2 = cr(L'_1 d_1^f + L'_2 d_2^f + \dots) \text{ рублей (2)}$$

Полные годовые затраты на получение 1 куб. метра сжатого газа в данной установке выразятся соотношением:

$$K = K_1 + K_2 + K_3 \quad \text{рублей, где}$$

$K_1$  — полная годовая затрата на энергию (ур—ние 1 и 1')

$K_2$  — полная годовая затрата по трубопроводу (ур—ние 2)

$K_3$  — сумма прочих расходов, практически независящая от диаметра трубопровода.

Основное условие наивыгоднейших диаметров трубопровода будет, очевидно

$$K \sim \text{minimum} \dots \dots \dots (3)$$

### Падение давления и диаметры трубопровода.

Рассматривая величины, входящие в ур—ния (1) и (1') и (2), мы видим, что здесь входят величины падения давления во всей установке „ $x$ “ и диаметры трубопроводов  $d_1$ ,  $d_2$  и т. д. Полное падение давления складывается тем или иным образом, в зависимости от геомет-

рических соотношений трубопровода и отдельных падений давлений в каждой трубе „x<sub>1</sub>“, „x<sub>2</sub>“, „x<sub>3</sub>“ и т. д.

В свою очередь зависимость между падением давления и диаметром каждой трубы может быть выражена известным соотношением:

$$\Delta p = \lambda \cdot \gamma' \frac{1}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} \quad \text{где}$$

$\lambda$  — коэффициент сопротивления

$\gamma'$  — удельный вес протекающего по трубопроводу газа в  $\text{kg}/\text{mt}^3$ .

$w$  — скорость газа в  $\text{mt}/\text{sc}$ .

$$g = 9,81 \frac{\text{mt}}{\text{sc}^2}.$$

Выражая падение давления в атмосферах, имеем:

$$x = \frac{\lambda \gamma'}{10^4} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{W^2}{2g}$$

Если по данной трубе протекает  $V'$  куб. метров в секунду сжатого газа плотностью  $\gamma'$  то, называя объем газа несжатого плотности  $\gamma_0$  через  $V$ , имеем очевидно,

$$V' = V \frac{\gamma_0}{\gamma'}$$

Далее, скорость газа:

$$W = \frac{4 V'}{\pi d^2}$$

Называя отношение:

$$\frac{\gamma'}{\gamma_0} = b$$

и подставляя в выражении для  $x$  имеем:

$$x = \frac{B V^2}{d^5}, \dots \dots \dots (4)$$

где:

$$B = \frac{16 \lambda \gamma_0}{10^4 \cdot \pi^2 \cdot 2g b} = 816 \cdot 10^{-8} \lambda \frac{\gamma_0}{b} \dots \dots \dots (5)$$

По существу соотношений (4) и (5) можно добавить следующее: Отношение плотностей сжатого и сжимаемого газа  $b$  можно вычислять, не считаясь с падением давления в данной трубе ( $x$ ), т. к. это падение практически весьма мало в сравнении с абсолютным давлением газа. Для газопровода, таким образом:

$$b = \frac{p}{p_1} \frac{273 + t_0}{273 + t_2}$$

где  $t_0$  и  $t_2$  — температуры несжатого и сжатого газа соответственно.

В трубопроводе для сжатого пара отношение должно быть взято из таблицы или диаграммы.

Коэффициент сопротивления  $\lambda$  представляет собою величину, зависящую от многих переменных, в том числе от диаметра трубопро-

вода и скорости. Наиболее обоснованной надо признать зависимость, основанную на законе динамического подобия, от числа Рейнольдса:

$$R = \frac{W d}{\nu} \quad \text{где}$$

$\nu$  — кинематическая вязкость \*)

В дальнейшем принята зависимость:

$$\lambda = 0,3164 R^{-0,25}$$

для  $R$  до 200.000 и

$$\lambda = 0,0072 + 0,6104 R^{-0,35}$$

для  $R$  большего 200.000. В практических пределах принятых соотношений  $\lambda$  колеблется от 0,016 до 0,012, что позволяет выбрать эту величину предварительно достаточно надежно.

Приведенная формула (4) для подсчета потери давления нуждается в уточнении в том смысле, что вместо геометрической длины  $l$  надо подставить длину

$$L = l + l_s,$$

где „ $l_s$ “ — длина трубы, эквивалентная местным сопротивлениям трубопровода. Называя коэффициенты местных сопротивлений  $\xi_1, \xi_2$  и т. д. и суммируя их

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \dots,$$

вычисляем длину трубы, эквивалентную местным сопротивлениям:

$$l_s = \Sigma \xi \frac{d}{\lambda}$$

Т. о., эту величину можно определить при данном трубопроводе. Вообще же, при предварительном расчете

$$L = k_1 l, \quad \text{где} \quad k_1 > 1$$

и может быть определена также, как соответствующая ей величина  $k_2$ , введенная выше.

Итак, окончательно

$$x = \frac{BL V^2}{d^5} \dots \dots \dots (4')$$

Основное уравнение наивыгоднейшего диаметра трубопровода, написанное выше в общей форме (3), математически, как известно, выражается тем, что производная от  $K$  должна равняться нулю. Выбор независимой переменной, по которой берется производная, роли не играет. В данном случае за независимую переменную принята величина  $x$  — падение давления от компрессора к потребителю. Уравнение минимума:

$$\frac{dK}{dx} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

Из этого уравнения можно отыскать  $x$ , а затем по связи (5) найти соответствующий диаметр трубы.

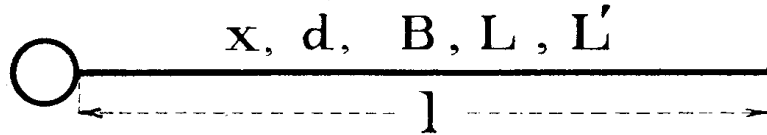
\*) Blasius Das Aenlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. Mitt. u. Vorsch. VDJ H 131.

Ombeck Druckverlust strömendes Flüssigkeit in geraden zylindri Rohrleitungen. M u. VDJ H 158—159.

## II.

Частные случаи.

1. Установка состоит из одной трубы, по которой сжатый газ подается потребителю.



В зависимости от рода установки, годовая стоимость энергии для сжатия будет:

$$K_1 = \frac{ap_1 10^4 (v \cdot n)}{75 \cdot \eta} \ln \frac{p+x}{p_1} \quad \text{или}$$

$$K_1 = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{ap_1 10^4 \cdot (v \cdot n)}{75 \cdot \eta} \left[ \left( \frac{p+x}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Годовая стоимость расходов по трубопроводу

$$K_2 = c r d^4 L'$$

Полная стоимость

$$K = K_1 + K_2 + K_3.$$

Условие минимума:

$$\frac{dK}{dx} = \frac{dK_1}{dx} + \frac{dK_2}{dx} = 0.$$

Учитывая связь  $x = \frac{BLV^2}{d^5}$  и произведя необходимые вычисления, имеем:

$$x^{1+0,2f} = \frac{c r f}{5A} \cdot (p+x)^{\frac{1}{k}} L' (BLV^2)^{0,2f} \dots \dots \dots (7)$$

где:

$$A = \frac{ap_1 (v \cdot n) 10^4}{75 \cdot \eta_{is}} \dots \dots \dots (8')$$

для основного изотермического сжатия, и

$$A = \frac{ap_1^k 10^4 \cdot (v \cdot n)}{75 \cdot \eta_{ad}} \dots \dots \dots (8'')$$

для основного (8'') адиабатического процесса.

Обе эти формулы с удобством можно свести к одной:

$$A = \frac{a p_1^k 10^4 (v \cdot n)}{75 \cdot \eta} \dots \dots \dots (8)$$

которая переходит в формулу (8') при изотермическом характере идеального процесса ( $k=1$ ). Одновременно и ур-ние (7) переходит в более простое при  $k=1$ . На несложном доказательстве того, что ур-ние (7) дает действительно минимум значения функции  $K$ , останавливаться не будем.



Точное решение ур-ния (7) возможно графически, как точка пересечения кривой:

$$y = x^{(1 + 0,2 \eta) \kappa} \quad \text{и прямой:}$$

$$y = \left[ \frac{\text{crf}}{5A} L' (BLV^2)^{0,2 \eta} \right]^{\kappa} (p + x)$$

В обычных случаях практики, в виду малости величины  $x$  в сравнении с  $p$ , можно считать:

$$x \sim \left[ \frac{\text{crf}}{5A} L' (BLV^2)^{0,2 \eta} \right]^{\frac{1}{1 + 0,2 \eta \kappa}} \frac{1}{p} \dots \dots \dots (9)$$

По найденной величине  $x$  определяется диаметр трубы  $d$  и задача, т. о., решена.

Непосредственное определение искомого диаметра трубы может быть произведено из этого же ур-ния (9). Вставляя вместо  $x$  диаметр из отношения:

$$x = \frac{BLV^2}{d^5}$$

и учитывая значение  $B$  по ур-нию (5), имеем:

$$d^m / m = 1000 \left( \frac{D}{N} \right)^{\frac{0,2}{1 + 0,2 \eta}} \dots \dots \dots (10)$$

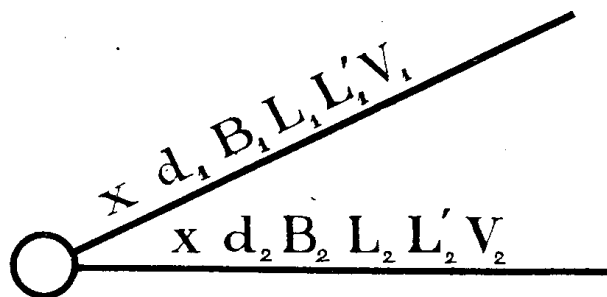
где:  $D = \frac{54,5 a (\nu \eta) \gamma_0}{\eta \text{crf} \cdot b} \cdot 10^{-4} \dots \dots \dots (10')$

и  $N = \frac{L'}{L} \frac{1}{\lambda V^2} \dots \dots \dots (10'')$

Решение ур-ния (9) и (10) естественно производить подбором, т. к. предварительно, до определения диаметра, мы не можем знать величин  $L'$ ,  $L$  и  $\lambda$ . Для одной трубы отношение  $\frac{L'}{L}$  не должно значительно отклоняться от единицы, каковое значение и можно принять при первоначальном подсчете.

### 2-й частный случай.

Установка состоит из двух труб, включенных параллельно



По прежнему:

$$K_1 = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{a p_1 \cdot 10^4 \Sigma (\nu \eta)}{75 \cdot \eta} \left[ \left( \frac{p + x}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{1}} - 1 \right]$$

Годовая стоимость трубопровода

$$K_1 = c r [L_1' d_1^f + L_2' d_2^f]$$

Между диаметрами труб и падением давления в них должно существовать соотношение

$$x = \frac{B_1 L_1 V_1^2}{d_1^5} = \frac{B_2 L_2 V_2^2}{d_2^5}$$

Таким образом, математически  $d_1$  и  $d_2$  являются функциями от  $x$ . т. е.

$$\frac{d K_2}{d x} = \frac{\partial K_1}{\partial d_2} \cdot \frac{d d_1}{d x} + \frac{\partial K_2}{\partial d_2} \cdot \frac{d d_2}{d x}$$

Найдя, аналогично 1-му случаю, производную  $\frac{d K}{d x} = 0$ , имеем:

$$x^{1+0,2f} = \frac{c r f}{5 A} (p+x)^{\frac{1}{k}} [L_1' (B_1 L_1 V_1^2)^{0,2f} + L_2' (B_2 L_2 V_2^2)^{0,2f}] \dots (11)$$

Где значение  $A$ , согласно (8):

$$A = \frac{a p_1^k \sum v n}{75 \cdot \eta}$$

Самый ход вычисления соотношения (11) показывает, что он может быть применен к любому числу параллельных труб. В общем случае имеем:

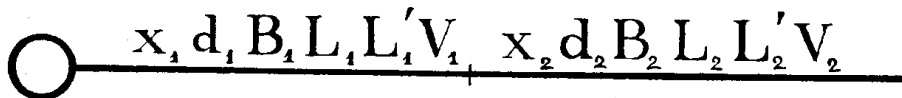
$$x^{1+0,2f} = \frac{c r f}{5 A} (p+x)^{\frac{1}{k}} \sum_1^n [L' (B L V^2)^{0,2f}] \dots (11')$$

Заметим, что в этом случае диаметры отдельных труб системы связаны соотношением:

$$\frac{d_1}{d_2} = \left( \frac{B_1 L_1 V_1^2}{B_2 L_2 V_2^2} \right)^{0,2}$$

$$\frac{d_1}{d_3} = \left( \frac{B_1 L_1 V_1^2}{B_3 L_3 V_3^2} \right)^{0,2} \text{ и т. д. } \dots (12)$$

3-й частный случай.



Установка состоит из двух последовательно включенных трубопроводов. В общем случае  $V_1 \neq V_2$ . Величины  $K_1$  и  $K_2$  вычисляются в общем виде, как и в случае 2.

Общее падение давления

$$x = x_1 + x_2 \dots (13)$$

$x_1$  и  $x_2$  падение давления в 1-й и 2-й трубе соответственно. Связь между падением давления в каждой трубе и диаметром последней

$$x_1 = \frac{B_1 L_1 V_1^2}{d_1^5}; \quad x_2 = \frac{B_2 L_2 V_2^2}{d_2^5} \dots (14)$$

Задача нахождения минимума функции:

$$K = K_1 + K_2 (+ K_3) \dots \dots \dots (15)$$

сводится к определению минимума функции от 4-х переменных

$$x_1, x_2, d_1 \text{ и } d_2$$

связанных между собою дополнительными связями (12) и (13).

Произведя вычисления, имеем:

$$x_1^{1+0,2f} = \frac{c r f}{5 A} (p+x)^{\frac{1}{k}} L'_1 (B_1 L_1 V_1^2)^{0,2f}$$

$$x_2^{1+0,2f} = \frac{c r f}{5 A} (p+x)^{\frac{1}{k}} L'_2 (B_2 L_2 V_2^2)^{0,2f} \dots \dots \dots (16)$$

Откуда легко получить:

$$x^{1+0,2f} = \frac{c r f}{5 A} (p+x)^{\frac{1}{k}} \left\{ \left[ L'_1 (B_1 L_1 V_1^2)^{0,2f} \right]^{\frac{1}{1+0,2f}} + \right. \\ \left. + \left[ L'_2 (B_2 L_2 V_2^2)^{0,2f} \right]^{\frac{1}{1+0,2f}} \right\}^{1+0,2f} \dots \dots \dots (17)$$

Практически, при отыскании наивыгоднейшего диаметра (падения давления) трубопровода из последовательных труб можно воспользоваться и ур-нием (16) и (17). Общее падение давления  $x$  обычно невелико в сравнении с  $p$  и формулы (14) и (16) можно писать аналогично (9). Отсюда можно вывести заключение, что на величину диаметра каждой трубы последовательно включенного трубопровода диаметры остальных труб оказывают лишь слабое влияние, и их можно вычислять, по крайней мере, в первом приближении, независимо друг от друга.

Ход рассуждений, приведенных здесь, очевидно, не изменится, если число труб будет больше двух.

Число ур-ний (16) будет равно числу отдельных труб, а общее ур-ние (17) в случае большого числа их напишется так

$$x^{1+0,2f} = \frac{c r f}{5 A} (p+x)^{\frac{1}{k}} \left\{ \sum_1^n \left[ L' (B L V^2)^{0,2f} \right]^{\frac{1}{1+0,2f}} \right\}^{1+0,2f} \dots \dots \dots (17')$$

Заметим, что в этом случае диаметры отдельных труб системы также связаны определенным соотношением, которое получается, исключая  $x_1$  и  $x_2$  из систем (14) и (16). Производя необходимые вычисления, имеем:

$$\frac{d_1}{d_2} = \left[ \frac{L'_2 (B_1 L_1 V_1^2)}{L'_1 (B_2 L_2 V_2^2)} \right]^{\frac{0,2}{1+0,2f}} \\ \frac{d_1}{d_3} = \left[ \frac{L'_3 (B_1 L_1 V_1^2)}{L' (B_3 L_3 V_3^2)} \right]^{\frac{0,2}{1+0,2f}} \dots \dots \dots (18)$$

Можно считать, что в общем виде задача разрешена окончательно для обоих последних частных случаев. Найдя полное падение давления  $x$  (или частичные  $x_1$ ,  $x_2$  и т. д.) определяем необходимые диаметры. Конечно, практически и в этих случаях задача решается не

сразу, ввиду неопределенности при решениях значений  $L$ ,  $L'$  и  $B$  ( $\lambda$ ). Но путем постепенного подбора задача практически решается довольно быстро.

### III.

#### Эквивалентная длина трубы по сопротивлению и стоимости.

Приведенный выше метод определения наивыгоднейшего падения давления в трубопроводе, т. е. наивыгоднейшего диаметра его отдельных частей, является общим методом.

Помощью его можно разрешить поставленную задачу относительно любого разветвленного трубопровода, поскольку он всегда состоит из системы параллельных и последовательных трубопроводов.

Но с увеличением числа отдельных ветвей системы растет число неизвестных величин и, главное, самые уравнения становятся настолько сложными, что ими неудобно пользоваться практически. Поэтому можно считать этот метод удобным только при простых схемах из одних параллельных или последовательных труб. В остальных, более сложных случаях, удобнее воспользоваться методом эквивалентных длин по сопротивлению и стоимости, чтобы упростить начертание и решение уравнений минимума.

Трубой, эквивалентной по сопротивлению какой-либо заданной трубе диаметра  $\delta$ , мы будем называть такую трубу диаметра  $d$ , которая будет иметь одинаковое с заданной падение давления. Очевидно, что в таком определении не все еще однозначно. В каждом случае необходимо указать, на какой расход газа подсчитывается эквивалентная труба. Назвав длину трубы диаметром  $\delta$ , определяющую ее сопротивление, буквой  $L$ , а длину эквивалентной ей по сопротивлению трубы диаметра  $d$  буквой  $L_3$ , имеем очевидно, вообще

$$L_3 \neq L.$$

Само собою разумеется, можно также определить трубу эквивалентную по сопротивлению 2, 3 и более отдельным трубам, как угодно включенным по отношению друг к другу. Диаметр эквивалентной трубы может быть сделан по произволу равным диаметру одной из труб системы.

Условимся в дальнейшем в случае параллельных труб, рассчитывать эквивалентную длину, считая ее диаметр равным диаметру одной из них, например 1-й, и рассчитывая ее на расход газа  $V$ , равный сумме расходов параллельных ветвей, т. е:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

где  $V_1, V_2, \dots$  — расход газа по отдельным параллельным трубам.

Коэф. сопротивления этой эквивалентной трубы, поскольку он зависит от скорости газа в трубе, вообще говоря, не будет равен коэф. сопротивления первой трубы  $\lambda_1$ . Тем не менее, его можно считать равным  $\lambda_1$ , т. к. это, в свою очередь, вызовет лишь соответственное изменение длины эквивалентной трубы, которой мы можем придать исключительно математический, а не реальный смысл.

Исходя из определения, можно написать для системы параллельных труб соотношение

$$x = \frac{B_1 L_1 V_1^2}{d_1^5} = \frac{B_2 L_2 V_2^2}{d_2^5} = \dots = \frac{B_1 L_{3p} (V_1 + V_2 + \dots)^2}{d_1^5}$$

Откуда

$$\frac{L_{\text{эп}}}{L_1} = \frac{V_1^2}{(V_1 + V_1 \dots)_1} \quad \text{или}$$

$$L_{\text{эп}} V^2 = L_1 V_1^2 \dots \dots \dots (19)$$

Соотношением (19) окончательно и однозначно определяется эквивалентная длина трубы по сопротивлению данной системе параллельных труб ( $L_{\text{эп}}$ ).

При определении эквивалентной длины для системы труб, включенных последовательно, условимся считать диаметр эквивалентной трубы равным диаметру трубы, стоящей раньше по направлению течения газа. Расход газа через эквивалентную трубу примем равным расходу газа через основную трубу  $V_1$ , равно, как и коэффициенты сопротивления эквивалентной и 1-й трубы будем считать одинаковым:

По условию, для последовательных труб:

$$x = x_1 + x_2 + x_3 + \dots$$

$$\frac{B_1 L_{\text{эс}} V_1^2}{d_1^5} = \frac{B_1 L_1 V_2^2}{d_1^5} + \frac{B_2 L_2 V_2^2}{d_2^5} + \frac{B_3 L_3 V_3^2}{d_3^5} + \dots$$

Откуда:

$$\frac{L_{\text{эс}}}{L_1} = 1 + \frac{B_2 L_2 V_2^2}{B_1 L_1 V_1^2} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^5 + \frac{B_3 L_3 V_3^2}{B_1 L_1 V_1^2} \left(\frac{d_1}{d_3}\right)^5 + \dots$$

Воспользовавшись соотношением (18) имеем:

$$\frac{L_{\text{эс}}}{L_1} = 1 + \left(\frac{L_2'}{L_1}\right)^{\frac{1}{1+0.2f}} \left(\frac{B_2 L_2 V_2^2}{B_1 L_1 V_1^2}\right)^{\frac{0.2f}{1+0.2f}} +$$

$$+ \left(\frac{L_3'}{L_1}\right)^{\frac{1}{1+0.2f}} \left(\frac{B_3 L_3 V_3^2}{B_1 L_1 V_1^2}\right)^{\frac{0.2f}{1+0.2f}} + \dots \dots \dots (20)$$

Соотношение (20) окончательно и однозначно определяет длину трубы диаметром  $d_1$ , эквивалентную по сопротивлению системе последовательных труб ( $L_{\text{эс}}$ ).

Трубой, эквивалентной по стоимости какой либо заданной трубе диаметра  $d$ , мы будем называть такую трубу, диаметром  $d$ , которая будет иметь ту же стоимость, что и заданная. Обобщая это определение, приходим к трубе, эквивалентной по стоимости данной системе труб.

Если система труб составлена из отдельных труб, диаметры которых и длины соответственно

$$d_1, d_2, d_3 \dots \dots \text{и т. д.}$$

$$L_1', L_2', L_3' \dots \dots \text{и т. д.}$$

То полная стоимость этих труб:

$$K_2 = r (L_1' d_1^f + L_2' d_2^f + \dots)$$

По определению эквивалентной по стоимости трубы, считая ее диаметр равным диаметру 1-й трубы:

$$r L_3' d_1^f = r (L_1' d_1^f + L_2' d_2^f + \dots)$$

Откуда:

$$\frac{L_3'}{L_1'} = 1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^f \left(\frac{L_2'}{L_1'}\right) + \dots$$

При замене эквивалентной трубой системы параллельных труб, имеем, согласно связи между диаметром труб (12):

$$\frac{L'_{\text{эп}}}{L_1'} = 1 + \left( \frac{B_2 L_2 V_2^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{0,2f} \frac{L_2'}{L_1'} + \left( \frac{B_3 L_3 V_3^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{0,2f} \frac{L_3'}{L_1'} + \dots \quad (22)$$

Это равенство позволяет вычислить длину эквивалентной по стоимости трубы для данной системы параллельно включенных труб ( $L'_{\text{эп}}$ ).

Соответствующее равенство для системы последовательных труб напишется, используя (18).

$$\begin{aligned} \frac{L'_{\text{эс}}}{L_1'} = 1 + & \left( \frac{L_2'}{L_1'} \right)^{\frac{1}{1+0,2f}} \left( \frac{B_2 L_2 V_2^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{\frac{0,2f}{1+0,2f}} + \\ & + \left( \frac{L_3'}{L_1'} \right)^{\frac{1}{1+0,2f}} \left( \frac{B_3 L_3 V_3^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{\frac{0,2f}{1+0,2f}} + \dots \quad (23) \end{aligned}$$

Заметим, что из (20) и (23) непосредственно следует:

$$\frac{L'_{\text{эс}}}{L_1} = \frac{L'_{\text{эс}}}{L_1'}, \text{ что можно написать и так: } \frac{L'_{\text{эс}}}{L_{\text{эс}}} = \frac{L_1'}{L_1} \dots \dots \dots \quad (24)$$

При приведении к эквивалентной трубе системы последовательных труб отношение эквивалентных длин по стоимости и сопротивлению равно отношению длины по стоимости и сопротивлению для приводимой трубы. Конечно, это соотношение правильно только при соблюдении всех указанных правил приведения. Оно важно тем, что облегчает вычисления при приведении труб к эквивалентным.

#### IV.

### Приведение системы труб к эквивалентной трубе.

Применяя способ эквивалентных длин по сопротивлению и стоимости, легко привести разобранные выше последние 2 частных случая к 1-му, т. е. к эквивалентной трубе, для которой мы имеем готовые решения (9) и (10).

В самом деле, систему параллельных труб, согласно (19) и (22), можно привести к одной трубе, характерной следующим свойствами.

1. Длина ее по сопротивлению (19)

$$L_{\text{эп}} = \frac{L_1 V_1^2}{(V_1 + V_2 + \dots)^2}$$

2. Длина ее по стоимости (22)

$$L'_{\text{эп}} = L_1' + L_2' \left( \frac{B_2 L_2 V_2^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{0,2f} + L_3' \left( \frac{B_3 L_3 V_3^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{0,2f} + \dots$$

3. Коэффициент сопротивления и состояние газа в этой трубе равны аналогичным величинам 1-й трубы.

4. Расход газа через эту трубу равен суммарно расходу системы.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

Написав ур-ние наивыгоднейшего падения давления для этой трубы, согласно ур-нию (7), имеем:

$$x^{1+0,2f} = \frac{c r f}{5 A} (p+x)^{\frac{1}{k}} L'_{\text{эп}} (B_1 L_{\text{эп}} V^2)^{0,2} \dots \dots \dots \quad (25)$$

Подставляя соответствующие значения  $L'_{\text{эп}}$  и  $L_{\text{эп}}$  из написанных выше условий, и производя соответствующие преобразования, имеем:

$$x^{1+0,2f} = \frac{\text{crf}}{5A} (p+x)^{\frac{1}{\kappa}} \left( L_1' (B_1 L_1 V_1^2)^{0,2f} + L_2' (B_2 L_2 V_2^2)^{0,2f} + \dots \right)$$

что тождественно сходится с ур-нием (11).

Заметим, что результат не изменится, если сначала привести трубу 2-ю и 3-ю к эквивалентной с диаметром  $d_2$ , а затем полученную трубу и 1-ю привести к эквивалентной с диаметром  $d_1$ .

Т. к. ур-ние (25) вполне аналогично (7), то из него легко получить приближенные ур-ния, аналогичные (9) и (10)

$$x \sim \left[ \frac{\text{crf}}{5A} L'_{\text{эп}} (B_1 L_{\text{эп}} V^2)^{0,2f} \right]^{\frac{1}{1+0,2f}} p^{\frac{1}{\kappa(1+0,2f)}} \dots \dots \dots (25)$$

и

$$d_1^{m/m} = 1000 \frac{\left[ \frac{54,5 \cdot 10^{-4} a \Sigma(vn) \gamma_c}{\eta \text{crf} b_1} \right]^{\frac{0,2}{1+0,2f}}}{\left[ \frac{L'_{\text{эп}}}{L_{\text{эп}}} \frac{1}{\lambda_1 V^2} \right]^{\frac{0,2}{1+0,2f}}} \dots \dots \dots (26)$$

Последнее ур-ние удобнее использовать в несколько измененной форме, т. к. по определению  $L_{\text{эп}} V^2 = L_1 V_1^2$ :

$$d_1^{m/m} = 1000 \left( \frac{D}{N} \right)^{\frac{0,2}{1+0,2f}} \dots \dots \dots (26)$$

где:

$$D = \frac{54,5 \cdot 10^{-4} \cdot a \Sigma(vn) \gamma_c}{\eta \text{crf} b_1} \text{ и } \dots \dots \dots (26)$$

$$N = \frac{L'_{\text{эп}}}{\lambda_1 L_1 V_1^2} \dots \dots \dots (26)$$

Для системы последовательно соединенных труб, приведенных к одной эквивалентной трубе, ур-ние минимума (7) напишется так:

$$x^{1+0,2f} = \frac{\text{crf}}{5A} (p+x)^{\frac{1}{\kappa}} L'_{\text{эс}} (B_1 L'_{\text{эс}} V_1^2)^{0,2f} \dots \dots \dots (27)$$

А так как для этой системы:

$$L'_{\text{эс}} = L_1' + L_1' \left( \frac{L_2'}{L_1'} \right)^{\frac{1}{1+0,2f}} \left( \frac{B_2 L_2 V_2^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{\frac{0,2f}{1+0,2f}} + \dots \dots$$

$$L_{\text{эс}} = L_1 + L_1 \left( \frac{L_2}{L_1} \right)^{\frac{1}{1+0,2f}} \left( \frac{B_2 L_2 V_2^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{\frac{0,2f}{1+0,2f}} + \dots \dots$$

то, по подстановке и соответствующих преобразованиях, получим:

$$x^{1+0,2f} = \frac{\text{crf}}{5A} (p+x)^{\frac{1}{\kappa}} \left\{ \left[ L_1' (B_1 L_1 V_1^2)^{0,2f} \right]^{\frac{1}{1+0,2f}} + \right. \\ \left. + \left[ L_2' (B_2 L_2 V_2^2)^{0,2f} \right]^{\frac{1}{1+0,2f}} + \dots \dots \right\}^{1+0,2f}$$

что сходится с ур-нием (17).

И здесь, как нетрудно убедиться непосредственно, результат не изменится, если сначала найти трубу эквивалентную 2-й и 3-й с диаметром  $d_2$ , а затем эквивалентную этой найденной и первой с диаметром  $d_1$ .

Исходя из точного ур-ния (27) можно написать приближенные:

$$x \sim \left[ \frac{c r f}{5 A} L'_{\text{эс}} (B_1 L_{\text{эс}} V_1^2)^{0,2 f} \right]^{\frac{1}{1+0,2 f}} p^{\frac{1}{\kappa(1+0,2 f)}} \dots \dots (28)$$

$$d_1 = 1000 \left( \frac{D}{N} \right)^{\frac{0,2}{1+0,2 f}} \dots \dots \dots (29)$$

где:

$$D = \frac{54,5 \cdot a \Sigma (v n) \gamma_c \cdot 10^{-4}}{\tau c r f b_1} \dots \dots \dots (29')$$

и:

$$N = \frac{L'_{\text{эс}}}{L_{\text{эс}}} \frac{1}{\lambda_1 V_1^2} \dots \dots \dots (29'')$$

и наконец, воспользовавшись (24), с той же точностью:

$$d_1 = 1000 \left( \frac{D}{N} \right)^{\frac{0,2 f}{1+0,2 f}}, \dots \dots \dots (30)$$

где величина  $D$ , как и выше (ур-ние 29), а:

$$N = \left( \frac{L'_1}{L_1} \frac{1}{\lambda_1 V_1^2} \right) \dots \dots \dots (30')$$

Всякий трубопровод, как бы сложен он ни был по своей схеме, может быть рассмотрен, как состоящий из ряда параллельных и последовательных труб.

Применяя, начиная с самых удаленных от начала труб, приведение к одной эквивалентной трубе, мы для каждого трубопровода приходим к одной эквивалентной по сопротивлению и стоимости трубе, диаметр которой вычисляется по ур-нию (26) или (30).

Определение остальных диаметров сводится к подсчетам их по формулам (12) или (18), в зависимости от способа их приключения к предыдущей трубе.

Очевидно, что и в общем случае мы имеем дело по существу с подбором наивыгоднейших диаметров. Величины  $L'$  и  $L$ , а также коэффициент сопротивления  $\lambda$  ( $B$ ) могут быть, пока неизвестны диаметры, выбраны только на глаз, более или менее удачно. Задав их, определяем диаметры, подсчитываем по последним  $L'$ ,  $L$  и  $\lambda$  более точно для каждой трубы и производим подсчет снова. Обычно уже 2-ой пересчет, принимая во внимание необходимость округления полученных диаметров до размеров сортамента, дает настолько точные результаты, что надобность в дальнейших подсчетах отпадает.

## V

### Сводка и упрощение расчетных формул.

Для параллельных труб эквивалентная длина по сопротивлению вычисляется по соотношению

$$\frac{L_{\text{эп}}}{L_1} = \frac{V_1^2}{(V_1 + V_2)^2} \dots \dots \dots (19)$$



Эквивалентная длина по стоимости:

$$\frac{L'_{\text{эп}}}{L_1'} = 1 + \left( \frac{L_2'}{L_1'} \right) \left( \frac{B_2 L_2 V_2^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{0,2f} \dots \dots \dots (22)$$

Воспользовавшись (5), имеем:

$$\frac{L'_{\text{эп}}}{L_1'} = 1 + \frac{\left( \frac{L_2'}{L_1'} \right)}{\left( \frac{b_2 \lambda_1 L_1 V_1^2}{b_1 \lambda_2 L_2 V_2^2} \right)^{0,2f}} \dots \dots \dots (31)$$

Определив диаметр  $d_1$ , определяем диаметр 2-й трубы по формуле:

$$\frac{d_1}{d_2} = \left( \frac{B_1 L_1 V_1^2}{B_2 L_2 V_2^2} \right)^{0,2} \dots \dots \dots (12)$$

упрощение которой дает:

$$\frac{d_1}{d_2} = \left( \frac{b_2 \lambda_1 L_1 V_1^2}{b_1 \lambda_2 L_2 V_2^2} \right)^{0,2} \dots \dots \dots (32)$$

Для последовательных труб эквивалентные длины по сопротивлению и стоимости, вычисляются по соотношению:

$$\frac{L'_{\text{эс}}}{L_1'} = \frac{L_{\text{эс}}}{L_1} = 1 + \left( \frac{L_2'}{L_1'} \right)^{\frac{1}{1+0,2f}} \left( \frac{B_2 L_2 V_2^2}{B_1 L_1 V_1^2} \right)^{\frac{0,2f}{1+0,2f}} \dots (20) \text{ и } (23)$$

Воспользовавшись (5), имеем:

$$\frac{L'_{\text{эс}}}{L_1'} = \frac{L_{\text{эс}}}{L_1} = 1 + \frac{\left( \frac{L_2'}{L_1'} \right)^{\frac{1}{1+0,2f}}}{\left( \frac{b_2 \lambda_1 L_1 V_1^2}{b_1 \lambda_2 L_2 V_2^2} \right)^{\frac{0,2f}{1+0,2f}}} \dots \dots \dots (33)$$

Определив диаметр первой трубы, определяем диаметр второй ( $d_2$ ) по формуле:

$$\frac{d_1}{d_2} = \left( \frac{L_2'}{L_1'} \frac{B_1 L_1 V_1^2}{B_2 L_2 V_2^2} \right)^{\frac{0,2}{1+0,2f}} \dots \dots \dots (18)$$

упрощение которой дает:

$$\frac{d_1}{d_2} = \left( \frac{L_2'}{L_1'} \frac{b_2 \lambda_1 L_1 V_1^2}{b_1 \lambda_2 L_2 V_2^2} \right)^{\frac{0,2}{1+0,2f}} \dots \dots \dots (34)$$

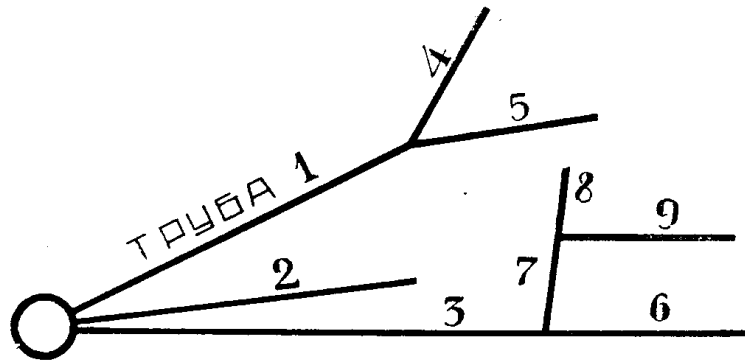
VI.

### Пример нахождения наивыгоднейших диаметров разветвленного трубопровода.

Требуется найти наивыгоднейшие диаметры воздухопровода сило-распределительной пневматической установки. Потребление воздуха предполагается так:

В течение 7 часов в сутки потребляется 55 куб. метр. воздуха в минуту, приведенного к атмосферным условиям. Кроме того в течение 12 часов в сутки работают устройства с потреблением 25 куб. метров воздуха в минуту. Число рабочих дней в году 220. Давление воздуха у потребителя 5 атмосфер по манометру.

Схема трубопроводов установки



Длина отдельных труб, расход воздуха, арматура и местные сопротивления даны в следующей таблице.

Таблица № 1.

| № трубы | Длина<br>метры | Расход в<br>куб. метр.<br>воздуха | Арматура и местные сопротивления |       |         |                     |
|---------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------|---------|---------------------|
|         |                |                                   | Вентиль                          | Отвод | Тройник | Водоотдели-<br>тель |
| 1       | 300            | 30                                | 1                                | 2     | —       | 1                   |
| 2       | 80             | 10                                | 2                                | —     | —       | 1                   |
| 3       | 450            | 40                                | 1                                | —     | —       | 2                   |
| 4       | 120            | 20                                | 1                                | 1     | 1       | —                   |
| 5       | 120            | 20                                | 1                                | 1     | 1       | —                   |
| 6       | 60             | 8                                 | 1                                | —     | —       | —                   |
| 7       | 80             | 35                                | —                                | —     | 1       | —                   |
| 8       | 40             | 15                                | 1                                | —     | —       | —                   |
| 9       | 50             | 25                                | 1                                | 1     | 1       | —                   |

К установке предполагаются поршневые компрессора с изотермической отдачей  $\eta_{is} = 0,65$ . Привод от электромоторов, к. п. действия их  $\eta = 0,96$ . Стоимость тока—4 копейки за киловатт-час.

Состояние воздуха принять: атмосферного—1 атм. абсолютная, температура  $15^{\circ}\text{C}$ . Температура сжатого воздуха в трубах 1 и 3— $25^{\circ}\text{C}$ , в трубе 2— $35^{\circ}\text{C}$ , в остальных трубах— $15^{\circ}\text{C}$ . К установке предполагаются черные железные трубы, соединенные муфтами на резьбе, в наружной укладке. Стоимость их взять по „Справочнику цен на рабочую силу“ и т. д. на 1 мая 1928 г. для г. Москвы за № 8 с надбавкой 15%. Стоимость работ по сборке и укладке труб исчислить по „Расценочным ведомостям“ на строительные работы для гор. Томска от 26 мая 1928 года с надбавкой 20%. Годовые отчисления по амортизации и ремонту труб считать в 18%.

По данным цен Справочника был построен в логарифмических координатах график цен на трубы с надбавкой 15% в зависимости от диаметра. Из графика имеем:

$$r = 229,5$$

$$f = 1,456.$$

Удельный вес воздуха при 1 atm. abs. и 15° C  $\gamma_0 = 1,185$ .

$$\text{Далее } b = \frac{p}{p_1} \frac{273 + t_0}{273 + t_2}$$

для труб 1 и 3 . . . . .  $b = 5,8$

2 . . . . .  $b = 5,61$

для прочих труб . . . . .  $b = 6,0$

Для предварительного расчета принята  $\lambda = 0,015$ .

Для ориентировки в величинах  $k_1$  и  $k_2$  была подсчитана величина  $L$  и  $L'$  для трубы № 4, задаваясь скоростью  $W \sim 5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ . Этот расчет показал, что можно взять

$$k_1 = k_2 = 1,5.$$

Согласно заданию:

$$\Sigma v n = \left( \frac{55}{60} \cdot 7 + \frac{25}{60} \cdot 12 \right) 220 = 2510$$

Стоимость 1 л. с. в час

$$a = 0.04 \cdot (,736 = 0.0295 \text{ руб.}$$

Для удобства подсчета вычислены  $V$  и  $V^2$  для каждой трубы.

| №           | 1    | 2      | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-------------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V \dots$   | 0.5  | 0.167  | 0.667 | 0.333 | 0.333 | 0.134 | 0.583 | 0.25  | 0.417 |
| $V^2 \dots$ | 0.25 | 0.0278 | 0.440 | 0.111 | 0.111 | 0.018 | 0.340 | 0.062 | 0.174 |

Далее, производим замену труб эквивалентными начиная с 4 и 5 труб.

а) Приведение труб 4 и 5 к трубе IV.\*

Трубы параллельные (ф. 31)

$$\frac{L_{IV}'}{L_4'} = 1 + \frac{\left( \frac{L_5'}{L_4'} \right)}{\left( \frac{b_5 \lambda L_4 V_4^2}{b_4 \lambda L_5 V_5^2} \right)^{0,2f}} = 1 + \frac{\left( \frac{120}{120} \right)}{\left( \frac{6,0 \cdot 0,015 \cdot 120 \cdot 0,111}{6,0 \cdot 0,015 \cdot 120 \cdot 0,111} \right)^{0,791}} = 2.$$

в) Приведение труб IV и 1 к трубе I.

Трубы последовательные (ф. 32).

$$\frac{L_1'}{L_1} = \frac{L_1}{L_1} = 1 + \frac{\left( \frac{L_{IV}'}{L_1} \right)^{1+0,2f}}{\left( \frac{b_1 \lambda L_1 V_1^2}{b_1 \lambda L_4 V_4^2} \right)^{0,2f}} \quad \frac{1}{1+0,2f} = 0,775$$

$$\frac{0,2f}{1+0,2f} = 0,2255$$

$$\frac{L_1'}{L_1} = \frac{L_1}{L_1} = 1 + \frac{\left( \frac{2 \cdot 120}{300} \right)}{\left( \frac{6,0 \cdot 300 \cdot 0,25}{5,8 \cdot 120 \cdot 0,111} \right)^{0,225}} = 1,568$$

\*) Числовые подсчеты производились пользуясь логарифмической сеткой.

Опуская промежуточные вычисления, приведем лишь окончательные результаты для остальных труб.

Приведение труб 8 и 9 к эквивалентной VIII трубе дает  $\frac{L_{viii'}}{L_8'} = 2.81$

" " VIII и 7 " VII "  $\frac{L_{vii'}}{L_7'} = \frac{L_{vii}}{L_7} = 1.76$

" " VII и 6 " VI "  $\frac{L_{vi'}}{L_6'} = 8.13$

" " VI и 3 " III "  $\frac{L_{iii'}}{L_3'} = \frac{L_{iii}}{L_3} = 1.32$

Приведение всех труб к одной эквивалентной.

Паралл. система (ф. 31):

$$\begin{aligned} \frac{L_3'}{L_1'} &= 1 + \frac{\left(\frac{L_2'}{L_1'}\right)}{\left(\frac{b_2 \lambda L_1 V_1^2}{b_1 \lambda L_2 V_2^2}\right)^{0,291}} + \frac{\left(\frac{L_{iii'}}{L_1'}\right)}{\left(\frac{b_3 \lambda L_1 V_1^2}{b_1 \lambda L_{iii} V_3^2}\right)^{0,291}} = \\ &= 1 + \frac{80}{\left(\frac{5,61}{5,80} \cdot \frac{1,568 \cdot 300 \cdot 0,25}{80 \cdot 0,0278}\right)^{0,291}} + \\ &+ \frac{1,32 \cdot 450}{\frac{1,568 \cdot 300}{\left(\frac{1,568 \cdot 300 \cdot 0,250}{1,32 \cdot 450 \cdot 0,440}\right)^{0,291}}} = 2,654. \end{aligned}$$

Далее имеем, (ф. 26''):

$$D = \frac{54,5 \cdot 10^{-4} \cdot a \Sigma(vn)}{\eta c r f b_1} \gamma_0$$

что по подстановке дает:

$$D = \frac{54,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0295 \cdot 2510 \cdot 1,185}{0,65 \cdot 0,96 \cdot 0,18 \cdot 229,5 \cdot 1,456 \cdot 5,8} = 21,95 \cdot 10^{-4}$$

$$N = \frac{L_{эп'}}{\lambda_1 L_1 V_1^2} = \frac{2,654 \cdot 300 \cdot 1,5 \cdot 1,568}{0,015 \cdot 1,568 \cdot 300 \cdot 0,25 \cdot 1,5} = 758$$

$$\frac{D}{N} = 2,900 \cdot 10^{-6} \quad \text{Согласно (26')}$$

$$d_1 = 1000 \left(\frac{D}{N}\right)^{\frac{0,2}{1+0,21}} = 132 \text{ м/м.}$$

Определение остальных диаметров:

Труба 2 (ф. 32)

$$\frac{d_1}{d_2} = \left( \frac{b_2 \lambda L_1 V_1^2}{b_1 \lambda L_2 V_2^2} \right)^{0,2} = \left( \frac{5,61}{5,80} \frac{1,583 \cdot 300 \cdot 0,25}{80 \cdot 0,0278} \right)^{0,2} = 2,2$$

$$d_2 = 60^{m/m}.$$

Опуская дальнейшие аналогичные вычисления, даем лишь окончательные их результаты

$$\begin{array}{ll} \frac{d_3}{d_3} = 1,16 & d_3 = 153^{m/m} \\ \frac{d_1}{d_4} = 1,28 & d_4 = 103 \\ d_4 = d_5 & d_5 = 103 \\ \frac{d_3}{d_6} = 2,29 & d_6 = 66,8 \\ \frac{d_7}{d_6} = 2,14 & d_7 = 143 \\ \frac{d_7}{d_8} = 1,53 & d_8 = 93,5 \\ \frac{d_9}{d_8} = 1,28 & d_9 = 119,5 \end{array}$$

Округляя полученные цифры до нормальных размеров сортамента, имеем размеры, помещенные в следующей таблице № 2. В этой же таблице сведены данные, необходимые для дальнейших подсчетов.

Пользуясь данными этих таблиц, подсчитываем по тем же формулам (31) и (33) эквивалентные длины труб более точно.

Приведение труб 4 и 5 к эквивален. трубе IV дает  $\frac{L_{IV}'}{L_4'} = 2$

„ „ IV и 1 „ „ I  $\frac{L_I'}{L_1'} = \frac{L_1}{L_1} = 1,525$

Приведение труб 8 и 9 к эквивален. трубе VIII  $\frac{L_{VIII}'}{L_8'} = 3,1$

„ „ 7 и VIII „ „ VII  $\frac{L_{VII}'}{L_7'} = \frac{L_{VII}}{L_7} = 1,94$

„ „ 6 и VII „ „ VI  $\frac{L_{VI}'}{L_6'} = 8,22$

„ „ VI и 3 „ „ III  $\frac{L_{III}'}{L_1'} = \frac{L_{III}}{L_1} = 1,31$

Трубы 1 и 2 и 3 сводим к одной трубе (I):

$$\frac{L_3'}{L_1} = 2,58$$

Таблица № 2.

| № трубы | Диаметр в м/м d | Площадь в см <sup>2</sup> f | Количество газа м <sup>3</sup> /с V | b    | Скорость в м/с V | Кинематическая вязкость v | Число Рейнольдса R | Коэф. сопротивления λ | Сумма местных сопротивл. Σξ | $\frac{d}{\lambda}$ | $\frac{d}{\lambda}$ | Длина в м l | L   | κ <sub>1</sub> |
|---------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------|------|------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|-------------|-----|----------------|
| 1       | 125             | 122,5                       | 0,5                                 | 5,8  | 7,04             | 2,315·10 <sup>-6</sup>    | 380000             | 0,0140                | 21,5                        | 8,93                | 192                 | 308         | 492 | 1,64           |
| 2       | 63              | 31,2                        | 0,167                               | 5,61 | 9,55             | 2,458                     | 245000             | 0,0151                | 21,0                        | 4,17                | 88                  | 80          | 168 | 2,1            |
| 3       | 150             | 176,5                       | 0,667                               | 5,8  | 6,51             | 2,315                     | 422000             | 0,0137                | 21                          | 10,95               | 230                 | 450         | 680 | 1,51           |
| 4       | 100             | 78,5                        | 0,333                               | 6,0  | 7,09             | 2,215                     | 320000             | 0,0144                | 8,5                         | 6,95                | 59                  | 120         | 179 | 1,49           |
| 5       | 100             | 78,5                        | 0,333                               | 6,0  | 7,09             | —                         | 320000             | 0,0144                | —                           | —                   | —                   | —           | —   | —              |
| 6       | 63              | 31,2                        | 0,134                               | —    | 7,16             | —                         | 201500             | 0,0157                | 7                           | 4,01                | 28                  | 60          | 88  | 1,47           |
| 7       | 150             | 176,5                       | 0,583                               | —    | 5,50             | —                         | 372000             | 0,0140                | 1                           | 10,08               | 11                  | 80          | 91  | 1,14           |
| 8       | 89              | 62                          | 0,260                               | —    | 6,83             | —                         | 273000             | 0,0149                | 7                           | 5,96                | 42                  | 40          | 82  | 2,05           |
| 9       | 125             | 122,5                       | 0,417                               | —    | 5,67             | —                         | 320000             | 0,0144                | 8,5                         | 8,7                 | 74                  | 50          | 124 | 2,48           |

Определение L' произведено в следующей таблице:

| № трубы | d м/м | Стоимость 1 мт. | Стоимость рабсилы | Сумма | Стоимость труб + работа | Стоимость арм. и фасон. частей | Полная стоимость | L'  | κ <sub>2</sub> |
|---------|-------|-----------------|-------------------|-------|-------------------------|--------------------------------|------------------|-----|----------------|
| 1       | 125   | 10,62           | 1,64              | 12,26 | 3780                    | 1134                           | 4914             | 462 | 1,50           |
| 2       | 63    | 4,20            | 1,00              | 5,20  | 416                     | 164                            | 580              | 138 | 1,72           |
| 3       | 150   | 14,80           | 1,97              | 16,77 | 7540                    | 2168                           | 9708             | 655 | 1,46           |
| 4       | 100   | 7,73            | 1,31              | 9,04  | 1087                    | 238                            | 1325             | 172 | 1,43           |
| 5       | 100   | 7,73            | 1,31              | 9,04  | 1087                    | 238                            | 1328             | 172 | 1,43           |
| 6       | 63    | 4,20            | 1,00              | 5,20  | 312                     | 55                             | 367              | 88  | 1,46           |
| 7       | 150   | 14,80           | 1,97              | 16,77 | 1340                    | 384                            | 1724             | 117 | 1,45           |
| 8       | 89    | 6,38            | 1,31              | 7,69  | 308                     | 62                             | 370              | 58  | 1,45           |
| 9       | 125   | 10,62           | 1,64              | 12,26 | 614                     | 234                            | 848              | 80  | 1,6            |

Откуда получается более точное значение

$$N = 690 \quad \text{и} \quad d_1 = 134^{\text{м/м}}.$$

Определяя по формулам (32) и (34) значения остальных диаметров, имеем значения их, сведенные в следующей таблице. Третья строчка дает значения диаметров, наиболее близкие по нормальному сортаменту.

| № трубы | 1   | 2  | 3   | 4   | 5   | 6  | 7   | 8   | 9                  |
|---------|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|--------------------|
| d       | 134 | 65 | 155 | 105 | 105 | 69 | 140 | 99  | 132 <sup>м/м</sup> |
|         | 125 | 63 | 150 | 100 | 100 | 63 | 150 | 100 | 125 <sup>м/м</sup> |

Разница в диаметрах труб по первому варианту настолько незначительна, что практически можно было считать подбор труб законченным после первого подсчета.