Доцент А. С. Бетехтин.

О наивыгоднейшем среднем давлении в воздухопроводной сети и наивыгоднейшем давлении у компрессора для уже существующих установок.

§ 1. Неосвещенность этого вопроса.

Наивыгоднейшим средним давлением воздухопроводной сети будем считать такое давление, при котором суммарные потери энергии от утечек и от всех видов потери давления будут наименьшими.

Вопрос о наивыгоднейшем среднем давлении в сети, равно как и вопрос о наивыгоднейшем давлении у компрессора, являются вопросами большой теоретической и практической важности. Между тем, оба эти вопроса почти не освещены в специальной литературе. Причина этого, столь странного на первый взгляд, упущения кроется в большой сложности аналитического решения вопроса, обусловленной сложностью взаимозависимостей различных величин, предопределяющих величину различных категорий потерь в сетях сжатого воздуха.

В настоящей работе мы попытаемся дать общее решение вопроса о наивыгоднейшем среднем давлении в сети и у компрессора. Сложность конечных выражений для минимума потерь для некоторых более общих случаев и возможная приближенность решений до известной степени могут быть оправданы сложностью самого вопроса и отсутствием сколько-нибудь исчерпывающих решений его в нашей и заграничной литературе.

§ 2. Возможные случаи при определении наивыгоднейшего среднего давления в сети P_m и наивыгоднейшего давления у компрессора.

При решении поставленной задачи могут встретиться два основных случая:

1. Диаметры воздухопроводов известны — случай уже существующей установки.

2. Диаметры воздухопроводов неизвестны, т. е. установка находится в стадии проектирования.

Для обоих основных случаев возможны следующие варианты:

a) Давление у приемников известно, одинаково и остается неизменным (например, в случае наличия в сети дросселирующих приспособлений).

b) Давление у различных групп приемников неодинаково, но среднее давление у каждой из групп известно и может считаться неизменным, например, в случае существующей установки, работающей без дросселирующих приспособлений.

c) Давление у приемников неизвестно и является величиной переменной.

Кроме того при всех вариантах возможно одно из двух допущений:

1. Потеря энергии от охлаждения воздуха мало зависит от изменений P_m, так что ее можно считать постоянной.

2. Изменениями величины потерь энергии от охлаждения в зависимости от изменения P_m пренебречь нельзя.

Допущение, что потери энергии от охлаждения воздуха остаются постоянными, при изменениях P_m, может иметь место либо для установок, где расход воды на охлаждение воздуха в компрессоре автоматически регулируется при изменениях давления, либо для установок с подогревателями сжатого воздуха на различных участках шахты. На практике обычно приходится иметь дело с изменяющейся величиной потерь энергии от охлаждения воздуха.

§ 3. Основные формулы для определения различных категорий потерь энергии сжатого воздуха*)

При определении различных категорий потерь энергии воздуха мы будем пользоваться следующими формулами:

Для потерь энергии от утечек $L_v = 2\,Ap^2_m + A\,(5 - P_{ср})\,p_m$ кг-м в час (1), где $A = 1{,}4 \,.\, 1900.\ K_с\ Д_{ср}.\ L \,.\, 10^{-4} = 0{,}266\ K_с\ Д_{ср}\ L$ (причем $Д_{ср}$ в мм., а L в м.)

Для потери энергии вследствие потери давления от трения:

$$L_{\Delta pr} = \frac{10000\ T_m \,.\, \Delta p_r}{T_0\ p_m}\ V_{час} \text{ кг-м. в час} \quad \ldots\ldots (2)$$

Для потерь энергии от охлаждения воздуха:

$L_t = 600\ p_k\ V_{час}$ кг-м в час—при неизменной температуре всасываемого воздуха . . . . (3)

Суммарные потери энергии в случае неизменной температуры всасываемого воздуха:

$$E = 2\ A\,p_m{}^2 + [A\ (5 - P_{ср}) + 1200\ V_{час}]\ P +$$

$$+ \frac{10000\ T_m}{T_0}\ \frac{\Delta P_2 \,.\, V_{час}}{P_m} - 600\ P_{ср}\ V_{час} \quad \ldots\ldots\ldots (4)$$

Случай изменяющейся температуры засасываемого воздуха не рассматриваем, чтобы не усложнять и без того сложные уравнения.

§ 4. Наивыгоднейшее среднее давление в сети и у компрессора для уже существующей установки.

1. Первая группа случаев: потери энергии от охлаждения воздуха принимаем постоянными, т. е. $L_t = \text{const}$.

а) Простейший случай—неразветвленная сеть с одинаковым и неизменным давлением у всех приемников, равным 5 ata.

Пусть длина сети $L_м$, диаметр воздухопровода $Д$ мм, число приемников n, коэффициент одновременности их работы K. Если все приемники однотипны, например, отбойные молотки, то при среднем потреблении отбойным молотком 1 куб. м. свободного воздуха в минуту, полезный часовой расход воздуха $V_{час} = 60\ nk$ куб. м. в час.

Потери энергии от утечек для этого случая:

$$L_2 = 2\ Ap^2_m + A\ (5 - P_n)\ P_m = 2\ Ap^2_m, \text{ так как } p_n = 5 \text{ ата.}$$

Потери энергии от трения воздуха в трубах:

$$L_{\Delta p} = \frac{10000\ T_m\ \Delta p_r \,.\, 60\ nk}{T_0\ P_m} \text{ кг-м. в час, или } L_{\Delta p_r} = \frac{b \,.\, \Delta p_r}{P_m}, \text{ где } b =$$

$$= \frac{600000\ nk \,.\, T_m}{T_0} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

*) См. статью „О потерях энергии в сетях сжатого воздуха". Бетехтин А. С. „Горный Журнал" 1936 г. № 1.

Так как потери от охлаждения воздуха считаем не зависящими от P_m то, очевидно, и $T_m = \text{const}$.

Суммарные потери энергии для этого случая:

$$E = 2\ Ap_m{}^2 + \frac{b}{P_m}\ \Delta P_r$$

Освободимся от Δp_r; $\Delta p_r = \dfrac{0{,}00129\ \beta\ P_0\ V_{час}{}^2\ L}{R\ T_m\ Д^5\ P_m} =$

$$= \frac{0{,}00129\ \beta \,.\, 10000^2\ (60\ nk)^2\ L}{R\ T_m\ Д^5\ P_m}$$

При неизменных n и k, $\beta = \text{const}$; при постоянных L, T_m и $Д$, $\Delta p_r = \dfrac{C}{P_m}$

где $C = \dfrac{0{,}00129\ \beta \,.\, 10000^2\ (60\ nk)^2\ L}{R\ T_m\ Д^5}$ . . . (6) и $\dfrac{b\,\Delta p_r}{P_m} = \dfrac{b\,C}{P_m{}^2} = \dfrac{B}{P_m{}^2}$,

где $B = b\,.\,C = \dfrac{0{,}00129\ \beta \,.\, (60\ nk)^3 \,.\, 10000^3\ L}{R\ T_0\ Д^5}$ . . . . (7)

Тогда $E = 2\ AP_m{}^2 + \dfrac{B}{P_m{}^2}$

Берем первую производную от E по P_m:

$$\frac{dE}{dP_m} = 4\ Ap_m - \frac{2B}{P^3{}_m}$$

Берем вторую производную от E по P_m:

$$\frac{d^2E}{dP^2{}_m} = 4\ A + \frac{6B}{P^4{}_m}$$

Так как коэффициенты A и B каждый в отдельности больше нуля, а P_m всегда больше нуля, то $4\ A + \dfrac{6\ B}{P_m{}^4} > 0$, т. е. функция E имеет minimum.

Приравнивая нулю $\dfrac{dE}{dP_m}$, получим $4\ AP_m{}^4 = 2\ B$, откуда

$$P_m = \sqrt[4]{\frac{B}{2A}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (8)$$

Таково будет наивыгоднейшее среднее давление в сети для этого простейшего случая.

Наивыгоднейшее давление у компрессора для этого случая

$$P_k = 2\ p_m - p_n = 2\sqrt[4]{\frac{B}{2\ A}} - 5 \text{ ата} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (9)$$

Численный пример. Дано: $L = 1000$ м.; $nk = 12$; $Д = 76$ мм.; $\beta = 1{,}06$, $K_c = 0{,}5$ *)

*) По кривым Флейшера для скорости 7,2 м-сек и $P_m \cong 6$ ата.

Коэффициенты $A = 0{,}266 \,.\, K_c\, Д\, L = 0{,}266 \,.\, 0{,}5 \,.\, 76 \,.\, 1000 = 10108 \cong 1{,}01 \,.\, 10^4$

$$B = \frac{0{,}00129 \,.\, 1{,}06 \,.\, (60 \,.\, 12)^3 \,.\, 10000^3 \,.\, 1000}{29{,}27 \,.\, 288 \,.\, 76^5} = 23800000 = 2{,}38 \,.\, 10^7.$$

$$P_m = \sqrt[4]{\frac{2{,}38 \,.\, 10^7}{2 \,.\, 1{,}01 \,.\, 10^4}} = \sqrt[4]{1178} \cong 5{,}86 \text{ ата.}$$

Тогда

$$P_k = 2\, p_m - 5 = 11{,}72 - 5 = 6{,}72 \text{ ата.}$$

Обратимся к выражению для P_m в общем виде для этого случая.

$$P_m = \sqrt[4]{\frac{0{,}00129\ \beta \,.\, P_0^3\ (60\ V)^3\ L}{RT_0 \,.\, 2 \,.\, 0{,}266 \,.\, K_c\ Д^6\ L}} = \sqrt[4]{\frac{a \,.\, \beta \,.\, V^3}{K_c \,.\, Д^6}} \ \ldots \ (10),$$

где $a = \dfrac{0{,}00129 \,.\, 60^3\, P_0^3}{RT_0 \,.\, 2 \,.\, 0{,}266}$ . . . (11) можно считать величиной постоянной.

Выражение (10) показывает, что для рассматриваемого простейшего случая (а) наивыгоднейшее среднее давление в сети P_m не зависит от длины участка, прямо пропорционально расходу воздуха в степени $\frac{3}{4}$, обратно пропорционально диаметру участка в степени 1,5 и зависит от $\sqrt[4]{\beta / K_c}$. Это выражение показывает также, что ошибка в величине коэффициентов β и K_c не оказывает существенного влияния на конечный результат, поскольку P_m пропорционально $\sqrt[4]{\beta / K_c}$.

При сравнительно малых значениях B, т. е. при малых расходах воздуха и значительной величине диаметра $Д$, величина P_m может получиться менее величины давления у приемников. Это будет случай фиктивного минимума потерь и фиктивного найвыгоднейшего давления, так как в силу своей сущности P_m не может быть меньше P_n; результат $P_m < P_n$ указывает на то, что для данного давления у приемников при данном диаметре воздухопровода и данном расходе воздуха невозможно получить минимум потерь энергии. Выражение (10) указывает пути для превращения фиктивного среднего давления P_m в реальное: если нельзя изменить давление или расход воздуха, то всегда можно изменить диаметр воздухопровода; уменьшение диаметра воздухопровода в „а" раз увеличивает величину P_m в „a" ^{1,5} раз, и всегда можно изменить диаметр $Д$ так, чтобы $\left(\dfrac{Д}{Д_1}\right)^{1,5} P_{m\,.\,\text{фик}} > P_n$.

Итак, к имевшемуся условию минимума потерь энергии для этого случая $P_m = \sqrt[4]{\dfrac{B}{2A}}$ прибавляется второе условие, именно $P_m > P_n$.

Однако и дополнительное условие ещё не исчерпывает полностью вопроса.

Так как для двух неизвестных P_m и ΔP_r, кроме двух основных уравнений: $2\, AP^2_m + A\, (5 - P_n)\, P_m + \dfrac{b \,.\, \Delta p_r}{P_m} = E$ и $\Delta p_r = \dfrac{C}{P_m}$ имеем еще третье $P_m = \dfrac{2\, P_n + \Delta\, P_r}{2}$ или $\Delta\, p_r = 2\, P_m - 2\, P_n$, то не исключена возможность, что ΔP_n, найденное из выражения $\Delta P_r = \frac{C}{P_m}$, при наивыгоднейшем P_m не будет соответствовать значению ΔP_r, найденному из уравнения $\Delta P_r = 2\,P_m - 2\,P_n$. Действительно, наличие третьего уравнения $\Delta\,P_r = 2\,P_m - 2\,P_n$ и уравнения $\Delta\,P_r = \frac{C}{P_m}$ по существу дает для заданных элементов сети и постоянного расхода воздуха вполне определенные значения для P_m и $\Delta\,P_r$. Решение системы этих уравнений дает:

$$P_m = \frac{1}{2}\left(P_n + \sqrt{P^2{}_n + 2\ C}\right) \ldots\ldots\ldots\ldots (12) \text{ и}$$

$$\Delta\,P_r = -P_n + \sqrt{P^2{}_n + 2\ C} \ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

Как же поступать в тех случаях, когда величина P_m, найденная из условия минимума потерь энергии расходится с величиной P_m, найденной из уравнения (12) и являющейся истинным реальным средним давлением в сети для данных условий, чтобы добиться возможно большего совпадения наивыгоднейшего P_m с P_m реальным?

Так как расход воздуха и длина участка вряд ли могут быть подвергнуты изменению, то наиболее доступной величиной, с которой можно оперировать, является диаметр участка. Значит, решая совместно уравнения (10) и (12), можно найти такой диаметр, при котором наивыгоднейшее среднее давление не будет отличаться от реального.

Если возможно варьировать величину расхода воздуха, например, в сторону его увеличения, можно поступать таким же образом решая уравнения (10) и (12) относительно V.

В нашем численном примере как раз налицо случай расхождения между наивыгоднейшем P_m и фактическим средним давлением. Фактическое среднее давление из уравнения (12):

$P_m = 0{,}5\ (5 + \sqrt{25 + 2\,.\,3{,}21}) = 0{,}5\ (5 + \sqrt{31{,}42}) = 5{,}3$ ата, а наивыгоднейшее $P_m = 5{,}86$ ата.

Численное значение C для нашего примера $\backsim 3{,}21$. Для любого нового диаметра $C_1 = \frac{3{,}21\,.\,76^5}{Д^5}$

Решая уравнения: $\sqrt[4]{\frac{a\,.\,\beta\,.\,V^3}{K_c\,.\,Д^6}} = 0{,}5\left(P_n + \sqrt{P_n{}^2 + \frac{2\,.\,3{,}21\,.\,76^5}{Д^5}}\right)$

получим: $\left(\frac{a\,.\,\beta\,.\,V^3}{K_c}\right)^{1/4} \cdot \frac{1}{Д^{1,5}} - 0{,}5\ P_n = 0{,}5\sqrt{P_n{}^2 + \frac{6{,}42\,.\,76^5}{Д^5}}$ или, называя

$\left(\frac{a\,.\,\beta\,.\,V^3}{K_c}\right)^{1/4}$ через K и возведя обе части во вторую степень, получим:

$$\frac{K^2}{Д^3} - \frac{P_n K}{Д^{,5}} + 0{,}25\ p^2{}_n = 0{,}25\ p^2{}_n + \frac{0{,}25\,.\,6{,}42\,.\,76^5}{Д^5}$$

Откуда $K^2\,Д^2 - 5\ K\,.\,Д^{3,5} = 0{,}25, 6{,}42\,.\,76^5$ при $P_n = 5$ ата.

В нашем случае $K = \left(\frac{0{,}00129\,.\,60^3\,.\,12^3\,.\,10000^3\,.\,1{,}06}{29{,}27\,.\,288\,.\,2\,.\,0{,}266\,.\,0{,}5}\right)^{1/4} = 3{,}885\,.\,10^3;$

$K^2 \cong 1{,}51 \cdot 10^7$ и $0{,}25 \cdot 6{,}42 \cdot 76^5 = 4{,}07 \cdot 10^9$, так что, после сокращения на 10^3 получим:

$15100 Д^2 - 19{,}425\ Д^{3,5} = 4{,}07 \cdot 10^6$, откуда $Д = 82{,}2$ мм. Значит, ближайший стандартный диаметр $Д = 82{,}5$ мм вместо принятого 76 мм дает достаточно удовлетворительное совпадение наивыгоднейшего и фактического значения P_m. Действительно, для этого случая $P_m = 5{,}86 \sqrt[4]{\left(\frac{76}{82{,}5}\right)^6} = 5{,}19$ ата.

$P_k = 10{,}38 - 5 = 5{,}38$ ата, $\Delta P_r = \frac{C}{P_m} = 0{,}41$ ата и $\Delta P_{фак} = 2\,P_m - 2\,P_n = 0{,}38$ ата.

Расхождение в величине ΔP_r невелико и практически почти неощутимо. Таким образом, наивыгоднейшее давление у компрессора в данном случае будет лежать в пределах $5{,}38 \div 5{,}41$ ата. Практически пришлось бы держать давление $P_k = 5{,}4$ ата.

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. При заданном расходе воздуха и диаметре воздухопровода можно говорить лишь об условном минимуме потерь энергии и условном наивыгоднейшем среднем давлении в сети.

2. Если возможно изменять некоторые данные, например, расход воздуха или диаметр воздухопровода, то условное наивыгоднейшее давление может стать наивыгоднейшим реальным.

3. Для получения достаточного совпадения в величине условного и фактического наивыгоднейшего давления необходимо и достаточно:

а) В случае, если можно изменять диаметр воздухопровода, то новый диаметр, при котором условное наивыгоднейшее давление сделается равным наивыгоднейшему реальному, определится из условия:

$$K^2\ Д_1^2 - K P_n Д_1^{3,5} = 0{,}5 \cdot C \cdot Д^5 \ \dots\dots\dots \ (14),$$

где $K = \left[\frac{0{,}00129 \cdot (60\ пк)^3 \cdot 10000^3 \cdot \beta}{R\ T_0 \cdot 0{,}266 \cdot 2 \cdot K_c\ Д^6}\right]^{1/4}$, $C = \frac{0{,}00129 \cdot \beta \cdot 10000^2\ (60\ nk)^2 L}{R\ T_m\ Д^5}$

и $Д$ — первоначально заданный диаметр. Затем по новому диаметру находим $C_1 = \frac{C Д^5}{Д_1^5}$, по найденному C_1 находим $P_m = 0{,}5\ (P_n + \sqrt{P_n^2 + 2\,C_1})$, из выражения $\Delta\ P_r = \frac{C_1}{P_m}$ находим наивыгоднейшее ΔP_r и, наконец, из выражения $P_k = P_n + \Delta P_r$ — наивыгоднейшее давление у компрессора.

б) Если можно изменять расход воздуха V, то из выражения

$$M^2\ V_1^{3/4} - 0{,}5\ C_2\ V_1^{5/4} = Mp_n \ \dots\dots\dots \ (15)$$

определяется $V_1 = 60\ n_1\ k_1$, из выражения $P_m = 0{,}5\ (P_n + \sqrt{P_n^2 + 2C\left(\frac{V_1}{V}\right)^2}$ находится P_m, а по P_m ΔP_r и P_k, как в предыдущем случае.

Здесь $M = \left(\frac{0{,}00129\,\beta \cdot 10000}{R\ T_0 \cdot 0{,}266 \cdot 2 \cdot K_c\ Д^6}\right)^{1/4} = \frac{K}{(V^3\ Д^6)^{1/4}}$, V — первоначальный часовой расход воздуха, C имеет прежнее значение, а $C_1 = \frac{C}{V^2}$.

Для рассматриваемого нами численного примера наивыгоднейший расход воздуха V при прежнем диаметре 76 мм составил бы 580 куб. м. в час, или ∞ 10 приемников по 1 куб. м. в мин.

Для этого условия $P_m = 5{,}265$ ата, $\Delta P_r = 0{,}53$ ата и $P_k = 5.3$ ата $\cong 5{,}5$ ата.

Понятно, что с точки зрения экономичности работы предпочтителен первый вариант (замена трубопровода $Д = 76$ мм на $Д = 82{,}5$ мм), так как при втором варианте, при меньшем количестве приемников, приходится поддерживать большее рабочее давление и иметь большие суммарные потери, нежели при первом варианте.

в) Неразветвленная сеть с одинаковым и неизменным давлением у всех приемников, не равным 5 ата.

Пусть попрежнему даны L, $Д$, n и K и пусть давление у приемников $P_n \gtrless 5$ ата.

В этом случае полезный часовой расход воздуха

$$V_{\text{час}} = 60\ nk\ [1 + 0{,}2\ (P_n - 5)] = 12\ nk\ P_n \text{ куб. м. в час.}$$

Уравнение для суммарных потерь энергии примет вид:

$\Sigma = 2\ Ap_m^2 + A\ (5 - p_n)\ p_m + \dfrac{B_1}{P_m^2}$, где B_1 будет отличаться от B лишь тем, что вместо $(60\ nk)^3\,\beta$ в выражении для B_1 войдет $\beta_1\ (12\ nkP_n)^3$, т. е. $B_1 = \left(\dfrac{P_n}{5}\right)^3 \dfrac{\beta_1}{\beta} . B.$

Первое условие для минимума потерь энергии:

$$4\ AP_m + A\ (5 - P_n) - \frac{2B_1}{P_m^3} = 0 \text{ или}$$

$$4\ AP_m^4 + A\ (5 - P_n)\ P_m^3 - 2\ B_1 = 0, \text{ или}$$

$$4\ AP_m^4 + A\ (5 - P_n)\ P_m^3 - 2\ B\left(\frac{P_n}{5}\right)^3 \frac{\beta_1}{\beta} = 0 \ldots\ldots \quad (16)$$

Решая это уравнение, получим условное значение для наивыгоднейшего P_m.

Дополнительные условия для реального минимума потерь попрежнему остаются в силе.

Как видно из уравнения (16)—на величину P_m в данном случае, кроме A и B, будет влиять еще и величина среднего давления у приемников.

Численный пример. Пусть как и в предыдущем примере, $L = 1000$ м, $nk = 12$; $Д = 76$ мм и $P_n = 5{,}5$ ата. Изменяется K_c и β; $\beta_1 \cong 1{,}02$, $K_c \cong 0{,}45$.

Значения коэффициентов: $A = 0{,}266 . 0{,}45 . 76 . 1000 = 9{,}1 . 10^3$,

$$B = 2{,}38{,}10^7;\ \frac{\beta_1}{\beta} = \frac{1{,}02}{1{,}06} = 0{,}962,$$

$$\left(\frac{P_n}{5}\right)^3 = \left(\frac{5{,}5}{5}\right)^3 = 1{,}33.$$

Уравнение для условного минимума потерь примет вид:

$$4 . 9100\ P_m^4 + 9100 . P_m^3\ (5 - 5{,}5) - 2 . 2{,}38 . 10^7 . 1{,}33 . 0{,}962 = 0, \text{ или}$$

$$36400\ P_m^4 - 4550\ P_m^3 - 6{,}06 . 10^7 = 0, \text{ или}$$

$$P_m^4 - 0{,}125\ P_m^3 - 1665 = 0, \text{ откуда}$$

$$P_m = 6{,}42 \text{ ата и } P_k = 2\ P_m - P_n = 12{,}84 - 5{,}5 = 7{,}34 \text{ ата.}$$

Отсюда вывод, что давление у компрессора должно расти быстрее, чем давление у приемников (было 6,7 ата, стало не 7,2, а 7,34 ата).

Если бы мы пренебрегли членом P_m^3, $P_m = 6{,}4$ ата, т. е. ошибка была меньше $1/3$ % и лежала бы за пределами точности манометра.

Как и в предыдущем примере, здесь тоже будет расхождение по величине между условным наивыгоднейшим P_m и фактическим средним давлением в воздухопроводе. Фактическое среднее давление $P_m' = 0{,}5 \left(5{,}5 + \sqrt{5{,}5^2 + 2 \cdot 3{,}21 \cdot \left(\frac{5{,}5}{5}\right)^2}\right) = 0{,}5\ (5{,}5 + 6{,}165) = 5{,}83$ ата вместо 6,42 ата. Замена диаметра 76 мм диаметром в 82,5 мм уменьшит P_m до $P_m = 6{,}42 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{76}{82{,}5}\right)^6}$ ата (без учета незначительного изменения K_c) или до 5,68 ата.

Одновременно P_m^1 будет $0{,}5 \left(5{,}5 + \sqrt{5{,}5^2 + 6{,}42 \cdot 1{,}21 \cdot \left(\frac{76}{82{,}5}\right)^2}\right) = 5{,}765$. Как видно, фактическое среднее давление уменьшилось с изменением диаметра всего на 0,065 ат, или на 1,1%, тогда как условное наивыгоднейшее давление P_m уменьшилось на 0,84 ата, или $\backsim$ на 13%. Очевидно, что, оставив часть воздухопровода при прежнем диаметре, мы можем повысить величину P_m с 5,68 до $5{,}765 \div 5{,}8$, т. е. добиться полного совпадения фактического и условного наивыгоднейшего давления и для этого случая. Часть длины воздухопровода, подлежащая замене трубопроводом диаметром в 82,5 мм, найдется из уравнения $5{,}8 = 6{,}42 \sqrt[4]{\left(\frac{76}{82{,}5}\right)^6 \cdot \frac{1000}{X + (1000 - X)\left(\frac{76}{82{,}5}\right)^5}}$ откуда $X = 740$ м.

Так как среднее давление у приемников на практике редко превышает 6 ата, то членом с P_m, а также β_1/β можно пренебречь, и условие для реального минимума потерь энергии для этого случая можно представить в виде:

$$P_m = \sqrt[4]{\frac{B \cdot p_n^3}{250 A} \cdot \left(\frac{Д}{Д_1}\right)^{1,5}} = 0{,}5 \left(P_n + \sqrt{P_n^2 + 2\,C\left(\frac{Д}{Д_1}\right)^5}\right) \quad \ldots (17)$$

$$\text{или в виде } M V_1^{3/4} - 0{,}5 C_2 V_1^{5/4} = M p_n \quad \ldots\ldots\ldots (18)$$

смотря потому, какой из факторов можно подвергать изменению—диаметр воздухопровода или количество воздуха.

§ 5. Определение наивыгоднейшего среднего давления разветвленной сети при постоянстве потерь от охлаждения воздуха.

В виду того, что в этом случае хотя и достижима неизменность давления у различных групп приемников, но весьма трудно достижима одинаковость давлений у всех приемников в сети, рассмотрим сначала более общий случай, а именно: при одинаковости давлений у приемников одной и той же группы давления у разных групп приемников различны и кроме того зависят от полезного расхода воздуха на данном участке сети. Неизменность давления на участках и, наконец, одинаковость давления у всех групп приемников можно будет рассмотреть в дальнейшем, как упрощенные варианты этого более сложного случая.

В рассматриваемом нами общем случае разветвленной сети коэффициенты A и B будут иметь несколько иное математическое выражение, а именно: $A = 0{,}266\ K_c . Д_{ср}\ L . 10^{-4}$

Здесь $Д_{ср}$ — средний диаметр воздухопроводной сети, определяемый из выражения $Д_{ср} = \frac{Д_1 l_1 + Д_2 l_2 + ... + Д_n l_n}{l_1 + l_2 + \ldots l_n}$, $L = \Sigma\, l$, т. е. суммарной длине сети, и K_c — коэффициент несовершенства сети определяется по средней скорости воздуха, находимой аналогично среднему диаметру сети.

Коэффициент $B = b . C$ будет иметь в данном случае более сложный вид:

$$\text{Действительно } b = \frac{10000 . 60\ nk\ T_m}{T_0} = \frac{10000 . 12 . nk\ P_{ср} . T_m}{T_0}$$

$$\text{и } C = \frac{0{,}00129\ \beta . 10000^2\ (12\ nk\ P_{ср})^2\ L_э}{R\ T_m\ Д^5}$$

В выражениях для b и C сложной величиной будет $P_{ср}$, так как при неравенстве давлений у различных групп приемников $P_{ср}$ будет функцией потери давления от компрессорной до приемников каждого участка. Кроме того, B будет иметь различные значения для различных участков, вследствие чего выраженные для C еще более усложняется, так что C можно будет принять за постоянный коэффициент лишь при наличии особых условий. Найдем эти условия.

Неодинаковость падения давления до различных рабочих участков заставляет ввести какое-то с р е д н е е п а д е н и е д а в л е н и я о т т р е н и я $\Delta P_{r,ср}$. Так как в общем случае количество воздуха V час, диаметр воздухопровода и длина его различны для разных участков, то определение $\Delta P_{r,ср}$ представляет значительные трудности. В первом приближении

$$\Delta P_{r,ср} = \frac{\Delta P_{r,\max} + \frac{l_1}{l_{\max}} . \Delta P_{r,\max} + \ldots . + \frac{l_n}{l_{\max}} \Delta P_{r,\max}}{n_y} =$$

$$= \frac{\Delta P_{r,\max}\ (l_{\max} + l_1 + l_2 + l_3 + \ldots l_n)}{l_{\max} . n_y} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (19)$$

где $\Delta P_{r,\max}$ — падение давления на наиболее удаленном участке длиною (считая от компрессорной) $l_{\max}$, l_1, l_2, $l_3 \ldots l_n$ — расстояние от компрессорной других участков, а n_y — число всех участков или число групп приемников. Однако выражение (19) справедливо лишь в том случае, когда падение давления на единицу длины одинаково как для магистрали, так и для ответвлений, что обычно не имеет места.

Другой способ определения $\Delta P_{r,ср}$ заключается в том, что длины всех ответвлений и второстепенных магистралей заменяются некоторыми „приведенными к сечению магистрали“ длинами, т. е. такими фиктивными длинами участков с диаметрами, всюду равными диаметру главной магистрали, на которых, при количестве протекающего по ним воздуха, равном полному часовому или минутному расходу воздуха V_u, теряется такое же давление, что и на реальных участках. Поясним это примером. Пусть имеется сравнительно несложная сеть, представленная на фиг. 1-й. Длины и диаметры воздухопроводов на отдельных участках, а также расход воздуха на них представлены в таблице 1-й.

Таблица 1.

№№ по порядку	Наименование участка	Длина участка в м.	Средний расход воздуха В куб. м в мин.	Средний расход воздуха В кг. в час	β	Диаметр воздухоп. в мм.	Скорость воздуха в м/сек.	Примечание
Без №	*KA*	500	50	3400	0,87	106,5	13,4	Средн. температура воздуха в воздухопроводе принята 25° С. Ср. температура засасываемого воздуха 15° С и $\gamma_0 = 1,186$.
1	*AB*	1500	23	1560	0,98	94,5	7,81	
2	Bb_1	600	10	678	1,09	70	6,2	
3	Bb_2	400	13	881	1,05	76	6,8	
4	*AF*	1000	27	1830	0,96	94,5	9,27	
5	*Ff*	800	15	1015	1,03	82,5	6,68	
6	*EF*	500	12	814	1,07	76	6,30	
7	Ee_1	400	4	271	1,25	50	4,85	
8	Ee_2	300	8	542	1,14	70	5,14	

Предположим теперь, что длину участка E_{e2} мы пожелали бы заменить длиной, приведенной к сечению магистрали. Назовем эту длину $l_{э8}$. Она определится из следующих рассуждений:

Реальное падение давления на участке E_{e2} $\Delta P_{r,8} = \dfrac{0{,}00129\ \beta_8\ P_0^2\ V_8^2\ l_8}{R\ T\ d^5_8\ P_m}$

или, если обозначить величину $\dfrac{0{,}00129\ P_0^2}{R\ T}$, постоянную для всех участков

через C_0,

$$\Delta P_{r,8} = \frac{C_c\ \beta_8\ V_8^2\ l_8}{d_8^5\ P_m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (20)$$

То же самое падение давления $\Delta P_{r,8}$, полученное при условии, что через участок l_8 протекает в с е к о л и ч е с т в о в о з д у х а, идущего через магистраль, т. е. V_u и что диаметр ответвления l_8 равен диаметру магистрали *Д*, выразится так:

$$\Delta P_{r,8} = \frac{C_0\ \beta_u\ V_u^2\ l_{э,8}}{Д^5\ P_m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (21),$$

где β_u — коэффициент трения, соответствующий часовому расходу воздуха V_u.

Приравнивая правые части уравнений (20) и (21) и решая полученное выражение относительно $l_{э,8}$, имеем:

$$l_{э,8} = l_8 \left(\frac{Д}{d_8}\right)^5 \left(\frac{V_8}{V_u}\right)^2 \frac{\beta_8}{\beta_u}\ \text{м.} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22)$$

В частности для данных таблицы № 1

$$l_{э,8} = 300 \left(\frac{106{,}5}{70}\right)^5 \left(\frac{8}{50}\right)^2 \frac{1{,}14}{0{,}87} \cong 84\ \text{м.}$$

Подобным же образом приведенные длины найдутся и для других участков.

Замена реальных длин длинами, приведенными к сечению магистрали, позволит любой из участков $KAFEe_1$, $KAFEe_2$, $KAFf$, $KABb_1$ и $KABb_2$ рассматривать в о д и н а к о в ы х у с л о в и я х р а б о т ы, так как количество протекающего по ним воздуха и сечение воздуходроводов одни и теже. Мы таким образом получаем ряд как бы независимых друг от друга участков, отличающихся т о л ь к о д л и н о й. Поэтому падения давления на этих участках будут относиться, как соответствующие приведенные длины. Называя падение давления для участка с наибольшей приведенной длиной через ΔP_{max} и обозначая участки сокращенно через Ke_1 (участок $KAFEe_1$),

Kb_2 (участок $KABb_2$) и т. д., получим выражение для среднего падения давления от трения:

$$\Delta P_{r,\text{ср}} = \frac{\Delta P_{r\max} + \Delta P_{r\max}\dfrac{l_{ke_2}}{l_{\max}} + \Delta P_{r\max}\dfrac{l_{kf}}{l_{\max}} + \ldots}{n_y} \quad \text{или}$$

$$\Delta P_{r,\text{ср}} = \frac{\Delta P_{r,\max}\,(l_{\max} + l_{ke2} + l_{kf} + \ldots + l_{kb2})}{l_{\max} \cdot n_y} \quad \ldots\ldots\ldots (23)$$

где $l_{\max}$ — приведенная длина, соответствующая длине участка с наибольшим падением давления (т. е. максимальная из приведенных длин), а n_y — число участков.

Не отличаясь по внешнему виду от формулы (19) формула (23) значительно точнее ее, так как она действительна при любом законе потери давления на единицу длины в любом из участков воздухопровода.

Среднее давление у приемников, необходимое и для определения количества потерь, определится на основании следующих соображений: пусть P — давление у наиболее отдаленной группы приемников в ата, а ΔP_t — падение давления от охлаждения воздуха, при расстоянии от компрессорной в 1,5 км и более фактически одинаково для всех групп приемников. Тогда давление у компрессора может быть выражено, с одной стороны, как $P_k = P + \Delta P_t + \Delta P_{r,\max}$ *), а с другой стороны как $P_k = P_{\text{ср}} + \Delta P_t + \Delta P_{\text{ср}}$.

Приравнивая правые части и решая полученное уравнение относительно $P_{\text{ср}}$, найдем: $P_{\text{ср}} = P + \Delta P_{r,\max} - \Delta P_{\text{ср}} = P + \Delta P_{r,\text{ср}} \dfrac{l_{\max} \cdot n_y}{l_{\max} + l_1 + l_2 + \ldots + l_n} - \Delta P_{r,\text{ср}} = P + \Delta P_{r\text{ср}} \left(\dfrac{l_{\max} \cdot n_y}{\Sigma\, l_э} - 1\right)$, где $l_1, l_2, l_3, . l_n$ — приведенные длины участков Kb_1, Kb_2 и т. д., или, обозначая $\left(\dfrac{l_{\max} \cdot n_y}{\Sigma\, l_э} - 1\right)$ через α, получим:

$$P_{\text{ср}} = P + \alpha\,\Delta P_{r,\text{ср}} \quad \ldots\ldots (24) \quad \text{и} \quad \Delta P_{r,\max} = (\alpha + 1)\,\Delta P_{r\,\text{ср}}.$$

Коэффицнент α можно рассматривать, как степень неравномерности потери давления до приемников.

Часовой расход воздуха приемниками выразится:

$$V\,\text{час} = 12\, nkp_{\text{ср}} \quad \text{или} \quad 12\, nk\,(P + \Delta P_{\text{ср}}) \ldots\ldots\ldots (25),$$

если расход воздуха отдельным приемником при 5 ата $v_0 = 1$ куб. м. в мин. и V час $= 12\, nk \cdot v_{\text{ср}}\, (P + \alpha \Delta P_{2,\text{ср}})$, если $v_{\text{ср}}$ — средний минутный расход воздуха на один приемник при разнотипных приемниках.

Потеря энергии от потери давления выразится:

$$L_{\Delta p_2} = \frac{10000 \cdot 12\, nk\,(P + \alpha \Delta P_{r,\text{ср}})\; T_m \cdot \Delta P_{r,\text{ср}}}{T_0\, P_m}$$

Но
$$\Delta P_{r,\text{ср}} = \frac{0{,}00129 \cdot 10000^2\, \beta_u\, [12\, nk\,(P + \alpha\, \Delta P_{r,\text{ср}}]^2\, \Sigma\, l_э}{R\; T_m \cdot Д^5\, P_m\, n_y} \quad \ldots\ldots (26)$$

*) Хотя потери энергии от охлаждения воздуха и будут постоянны, падение давления от охлаждения P_t учесть все же необходимо, т. к. оно входит, как слагаемое, в выражение P_k.

так что в конечном счете

$$L_{\Delta p_r} = \frac{0{,}00129\ \beta_u \, . \, 10000^3 \, . \, (12\, nk)^3\ (P + \alpha\ \Delta P_{r,\text{ср}})^3\ T_m \, . \, \Sigma\, l_э}{T_0 \, . \, R \, . \, T_m \, . \, Д^5\ P_m^2\ n_y} \quad . \, . \, . \, (27)$$

Отсюда коэффициент

$$B = \frac{0{,}00129\ \beta_u\ 10000^3 \, . \, 12^3 \, . \, (nk)^3\ \Sigma\, l_э}{T_0\ R\ Д^5\ n_y} = \frac{7{,}62 \, . \, 10^{10}\ \beta_u\ (nk)^3\ \Sigma\, l_э}{T_0\ Д^5\ n_y} \quad . \, . \, (28)$$

$$\Delta P_{r,\text{ср}} = 6{,}35 \, . \, 10^5\ \beta_u\ \frac{(nk)^2\ (P + \alpha\ \Delta P_{r,\text{ср}})^2\ \Sigma\, l_э}{T_m \, . \, Д^5 \, . \, P_m\ n_y} \quad . \, . \, . \, . \, . \, . \, (29)$$

и

$$\Delta P_{r,\max} = (\alpha + 1)\ \Delta P_{r,\text{ср}} \quad . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, (30)$$

Заменим $\alpha\ \Delta P_{r,\text{сред.}}$ через P_m.

С одной стороны, $P_m = \dfrac{P_k + P_{\text{ср}}}{2} = \dfrac{P_k + p + \alpha\ \Delta P_{r,\text{ср}}}{2}$

С другой стороны, $P_k = P + \Delta P_t$*) $+ \Delta P_{r,\max}$. Заменив P_k в предыдущем выражении, получим:

$$P_m = \frac{P + \Delta P_t + \Delta P_{r,\max} + P + \alpha\, \Delta P_{r,\text{ср}}}{2} = \frac{2\, p + \Delta P_t + \cdot\, \Delta P_{r,\text{ср}}\ (1 + 2\alpha)}{2} \quad (31)$$

откуда

$$\Delta P_{r,\ \text{сред.}} = \frac{2p_m - 2p - \Delta P_t}{(1 + 2\alpha)} \quad . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, (32)$$

Тогда

$$P + \alpha\, \Delta P_{r,\text{ср}} = \frac{P + 2\,\alpha\, p + (2\, P_m - 2\, p - \Delta P_t)\ \alpha}{1 + 2\,\alpha} = \frac{2\,\alpha\, P_m}{1 + 2\,\alpha} + \frac{P - \alpha\, \Delta P_t}{1 + 2\,\alpha}$$

Наконец, называя $P - \alpha\, \Delta P_t$ через F, получим:

$$P_{\text{ср}} = P + \alpha\, \Delta P_{r,\text{сред.}} = \frac{2\,\alpha\, P_m}{1 + 2\,\alpha} + \frac{F}{1 + 2\,\alpha} \quad . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, (33)$$

Суммарные потери энергии будут:

$$E = 2\, Ap_m^2 + A\left[5 - \left(\frac{2\,\alpha\, P_m}{1 + 2\,\alpha} + \frac{F}{1 + 2\,\alpha}\right)\right] P_m + B\left[\frac{2\,\alpha\, P_m}{1 + 2\,\alpha} + \frac{F}{1 + 2\,\alpha}\right]^3 \frac{1}{P_m^2} \quad (34)$$

Условие для минимума потерь энергии:

$$4\, A\, P_m - A\left(5 + \frac{F}{2\,\alpha + 1}\right) - \frac{4\, A\, \alpha\, P_m}{2\,\alpha + 1} + \frac{B}{(2\,\alpha + 1)^3}\Big[3\ (2\,\alpha\, P_m + F)^2\ 2\,\alpha\, P_m^2 -$$

$$- 2\, P_m\ (2\,\alpha\, P_m + F)^3\Big]\ \frac{1}{P_m^4} = 0,$$

или после преобразований

$$2\, A\ (2\,\alpha + 1)^2\ (\alpha + 1)\, P_m^4 + \left[\frac{A\ (2\,\alpha + 1)^3}{2}\left(5 - \frac{F}{2\,\alpha + 1}\right) + 4\,\alpha^3\, B\right] P_m^3 -$$

$$- 3\,\alpha\, B\, F^2\ P_m - B\, F^3 = 0.$$

Разделив все члены этого уравнения на B получим:

$$\frac{2\, A}{B}\,(2\,\alpha + 1)^2\ (\alpha + 1)\, P^4{}_m + \left[4\,\alpha^3 + \frac{A\,(2\,\alpha + 1)^2}{2\, B}\,(5\,(2\,\alpha + 1) - F)\right] P_m^3 -$$

$$- 3\,\alpha\, F^2\, P_m - F^3 = 0 \quad . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, (35)$$

В большинстве случаев членом $4\alpha^3$ вполне можно пренебречь. Действительно, в сетях с надлежаще подобранными диаметрами $\alpha \leqslant 0{,}1$, P_m вряд ли больше 7 ата и F порядка 5. Пронебрежение членом $4\alpha^3$ даст ошибку меньше 1%, т. е. меньшую, нежели точность отсчета по манометру. В частных случаях, при малых значениях α и ΔP_t можно пренебречь всем членом с P_m^3, и тогда уравнение для условного минимума потерь значительно упрощается.

В дальнейшем для определения наивыгоднейшего среднего давления в сети мы будем пользоваться выражением

$$\frac{2A}{B}(2\alpha+1)^2(\alpha+1)P_m^4+\frac{A(2\alpha+1)^2}{2B}(5(2\alpha+1)-F)P_m^3-$$

$$-3\alpha F^2P_m-F^3=0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (36)$$

за исключением тех случаев, когда $\alpha > 0{,}1$.

Как видно из выражения (36) зависимость P_m от различных факторов, характеризующих разветвленную сеть, оказывается довольно сложной. Только для сетей, для которых $\alpha < 0{,}1$ и $B \leqslant 30\ A$, наивыгоднейшее значение условного P_m может быть с достаточной степенью точности определено из уравнения

$$\frac{2A}{B}(2\alpha+1)^2(\alpha+1)P_m^4-3\alpha F^2 p_m-F^3=0 \quad \ldots\ldots \quad (37)$$

Численный пример. Найдем наивыгоднейшую величину P_m для частного случая—именно для сети, представленной на фиг. 1-й. Характерные величины для этой сети даны в таблице 1-й. Давление у наиболее отдаленного приемника примем $P=5{,}0$ ата. Приемники—отбойные молотки; полезный расход свободного воздуха на молоток 1 куб. м. в мин. при 5 ата, с учетом износа молотка.

Падение давления от охлаждения ΔP_t примем 1,2 ата. *)

Порядок расчета:

1. Находим общую длину сети $\Sigma l = 6000$ *м.*
2. Находим средний диаметр воздухопроводной сети.

$$D_{\text{ср}}=\frac{106{,}5.500+94{,}5(1500+1000)+82{,}5.800+76(400+500)+}{6000}$$

$$\frac{+70(600+300)+50.400}{6000}=\frac{506900}{6000}=84{,}48\ \textit{мм} \cong 85\ \textit{мм}$$

3. Находим среднюю скорость воздуха в сети:

$$C_{\text{ср}}=\frac{13{,}4.500+7{,}8.1500+6{,}2.600+6{,}8.400+9{,}27.1000+6{,}68.800+}{6000}$$

$$\frac{+6.3.500+4{,}85.400+5{,}14.300}{6000}=\frac{46001}{6000}=7{,}58\cong 7{,}6\ \textit{м}\ \text{в сек.}$$

4. По кривым фиг. 2 находим коэффициент K_F для наиболее невыгодного случая — именно для $P_m=7$ ат, абс. $K_F=0{,}60$. Тип прокладки принимаем обычный, т. е. $K_n=1$; сварка труб отсутствует, т. е. $K_s=1$.

*) Оно зависит от температуры в воздухосборнике и от средней температуры у приемников. Для существующей шахты то и другое известно, а значит, известно и ΔP_t.

5. Находим коэффициент несовершенства сети:

$$K_c = K_F . K_n . K_c = 0{,}6 . 1 . 1 = 0{,}6.$$

6. Находим коэффициент A:

$$A = 0{,}266\, K_c D_{\text{ср}} \Sigma l = 0{,}266 . 0{,}60 . 85 . 6000 = 8{,}14 . 10^4.$$

7. Определяем длины отдельных участков, приведенные к сечению магистрали:

$$l_{э1} = l_{AB}\left(\frac{D}{d_1}\right)^5 \left(\frac{V_1}{V_u}\right)^2 \beta_1 / \beta_u = 1500 \left(\frac{106{,}5}{94{,}5}\right)^5 \left(\frac{23}{50}\right)^2 \frac{0{,}98}{0{,}87} = 666 \text{ м}$$

$$l_{э2} = 600 \left(\frac{106{,}5}{70}\right)^5 \left(\frac{10}{50}\right)^2 \cdot \frac{1{,}09}{0{,}87} = 240 \text{ м}$$

$$l_{э3} = 400 \left(\frac{106{,}5}{76}\right)^5 \left(\frac{13}{50}\right)^2 \cdot \frac{1{,}05}{0{,}87} = 180 \text{ м}$$

$$l_{э4} = 1000 \left(\frac{106{,}5}{94{,}5}\right)^5 \left(\frac{27}{50}\right)^2 \cdot \frac{0{,}96}{0{,}87} = 600 \text{ м}$$

$$l_{э5} = 800 \left(\frac{106{,}5}{82{,}5}\right)^5 \left(\frac{15}{50}\right)^2 \cdot \frac{1{,}03}{0{,}87} = 314 \text{ м}$$

$$l_{э6} = 500 \left(\frac{106{,}5}{76}\right)^5 \left(\frac{12}{50}\right)^2 \cdot \frac{1{,}07}{0{,}87} = 196 \text{ м}$$

$$l_{э7} = 400 \left(\frac{106{,}5}{50}\right)^5 \left(\frac{4}{50}\right)^2 \cdot \frac{1{,}25}{0{,}87} = 158 \text{ м}$$

$$l_{э8} = 300 \left(\frac{106{,}5}{70}\right)^5 \left(\frac{8}{50}\right)^2 \cdot \frac{1{,}14}{0{,}87} = 84 \text{ м}.$$

8. Находим приведенные длины от компрессорной до каждой группы приемников:

$$l_1 = l_{kb_1} = 500 + 666 + 240 = 1406 \text{ м}$$

$$l_2 = l_{kb_2} = 500 + 666 + 180 = 1346 \text{ м}$$

$$l_3 = l_{kf} = 500 + 600 + 314 = 1414 \text{ м}$$

$$l_4 = l_{ke_1} = 500 + 600 + 196 + 158 = 1454 \text{ м}$$

$$l_5 = l_{ke_2} = 500 + 600 + 196 + 84 = 1380 \text{ м}.$$

9. Выбираем участок с максимальной приведенной длиной $l_{\max}$. Таковым, очевидно, будет участок l_{ke_1} с длиною 1454 *м*.

10. Определяем среднее падение давления до приемников в функции от $\Delta P_{\max}$

$$\Delta P_{r,\text{ср}} = \Delta P_{\max}\left(\frac{1454 + 1406 + 1346 + 1414 + 1380}{1454 . 5}\right) =$$

$$= \frac{7000}{7270} = 0{,}963\, \Delta P_{\max}$$

11. Определяем коэффициент α:

$$\alpha = \frac{l_{\max} n_y}{\Sigma l_э} - 1 = \frac{7270}{7000} - 1 = 0{,}0386$$

12. Определяем коэффициент B:

$$B = \frac{7{,}62 . 10^{10} \beta_n (nk)^3 \Sigma l_э}{T_0 n_y D^5}, \text{ или}$$

$$B = \frac{7{,}62 . 10^{10} . 0{,}87 . 50^3 . 7000}{288.5 . 106{,}5^5} = 2{,}94 . 10^6 \text{ при } T_0 = 288° K$$

13. Определяем значение F для данного случая при заданных значениях P и ΔP_t:

$$F = P - \alpha \Delta P_t = 5 - 0{,}0386 . 1{,}2 = 5 - 0{,}0463 = 4{,}9537$$

14. Находим условие для минимума потерь для данного частного случая:

$$\frac{2A}{B}(2\alpha + 1)^2 (\alpha + 1) P_m{}^4 + \frac{A}{2B}(2\alpha + 1)^2 (5(2\alpha + 1) - F) P_m{}^3 - 3\alpha F^2 P_m = F^3, \text{ или}$$

$$\frac{2.8{,}14 . 10^4 . 1{,}077^2 . 1{,}0386}{2{,}94 . 10^6} P_m{}^4 + \frac{8{,}14 . 10^4 . 1{,}077^2}{2.2{,}94 . 10^6}(5.1{,}077 - 4{,}954) P_m{}^3 -$$

$$- 3.0{,}0386 . 4{,}954^2 P_m = 4{,}954^3, \text{ или}$$

после умножения обеих частей уравнения на 100:

$$6{,}675 P_m{}^4 + 0{,}673 P_m{}^3 - 293{,}0 P_m \cong 12150$$

15. Решая последнее уравнение относительно P_m, получим:

$$P_m = 6{,}75 \text{ ата.}$$

16. Находим $\Delta P_{r,\text{ср}}$:

$$\Delta P_{r,\text{ср}} = \frac{2P_m - (2P + \Delta P_t)}{2\alpha + 1} = \frac{13{,}5 - 10 - 1{,}2}{1{,}0772} \cong 2{,}135 \text{ ата.}$$

17. Находим $\Delta P_{r,\max} = (\alpha + 1) \Delta P_{r,\text{ср}} = 1{,}0386 . 2{,}135 = 2{,}22$ ата.

18. Находим наивыгоднейшее давление у компрессора:

$P_k = P + \Delta P_t + \Delta P_{r,\max} = 5 + 1{,}2 + 2{,}22 = 8{,}42$ ата.

Среднее падение давления $\Delta P_{r,\text{ср}}$, найденного из уравнения (29), будет 1,887 ата и реальное $P_m = 0{,}25\left[2P + \Delta p_t + \sqrt{(2p + \Delta p_t)^2 + 8c\left(\frac{P_{\text{ср}}}{P}\right)^2}\right. =$

$$= 6{,}6 \text{ ата, т. к. } P_{\text{ср}} = 5 + 0{,}0386 . 1{,}887 = 5{,}081$$

и c для $\Delta P_{r,\text{ср}}$ 12,27 и для $\Delta P_{r,\max}$ $c = 12{,}74$.

Таким образом и в этом случае имеется расхождение между условным и реальным значением P_m. Правда, мы нигде не учитывали падение давления в арматуре и фасонных частях, равное в среднем от 10 до 20% от реального падения. Но даже и при учете этих добавочных потерь совпадение реального и наивыгоднейшего значения P_m для уже существующей сети можно рассматривать, как счастливое исключение; обычно же всегда между значением наивыгоднейшего среднего давления в сети и реальным его значением имеется более или менее существенное расхождение. Устранение этого расхождения возможно, хотя и представляет известные трудности. Оно должно итти по пути изменения эквивалентных длин одного или нескольких участков, т. е.

по пути изменения диаметров этих участков. Это вызывает одновременное изменение A, B, α и F.

Тогда отыскивается условное наивыгоднейшее среднее давление для новых условий и сравнивается с реальным значением P_m для этого случая. Иногда изменения в величине α и F бывают настолько ничтожны, что ими можно пренебречь, и тогда решение вопроса значительно упрощается.

Для нашего численного примера замена диаметра на участке AB с 94,5 *мм* до 100,5 *мм* дает следующие результаты:

$$\Sigma l_э = 6696, \ \alpha = 0{,}086, \ F = 4{,}90$$

Уравнение для условного минимума потерь примет вид:

$$8{,}26\, P_m^4 + 1825\, P_m^3 - 620\, P_m = 11780$$

Этому уравнению удовлетворяет значение $P_m = 6{,}60$ ата:

$$\Delta P_{r,\,ср} = \frac{13{,}2 - 11{,}2}{1{,}172} = 1{,}7 \text{ ата.}$$

$$\Delta P_{r,\,\max} = 1{,}086 . 1{,}7 = 1{,}846 \text{ ата, реальное } \Delta P_{r,\max} = \frac{12{,}74}{25}\ \frac{(5{,}18)^2}{6{,}6} =$$

$$= 2{,}03, \text{ реальное } P_m (\text{при } P_{ср} = 5 + 0{,}086 . 2{,}03 = 5{,}18)\ 6{,}63 \text{ ата.}$$

Давление у компрессора, найденное из условной величины P_m:

$P_k = 5 + 1{,}2 + 1{,}85 = 8{,}05$ ата, и реальное давление, $P_k'\ 5 + 1{,}2 + 2{,}03 = 8{,}23$ ата.

Как видно, в данном случае мы имеем уже меньше расхождения между условной и реальной величиной P_m. Так, в первом случае расхождения в величине P_m составляло $6{,}75 - 6{,}13 = 0{,}62$ ата или 10%, тогда как теперь оно $6{,}63 - 6{,}60 = 0{,}03$ ата или около 0,5%. Так как потери в конечном счете выражены, как функция P_m, то при достаточном совпадении условного и реального P_m для получения минимума потерь достаточно поддерживать у компрессора давление, обусловленное действительной величиной потерь давления и наименьшим давлением у приемников, т. е. $P + \Delta P_t + \Delta P_{\max}$ или $P_{ср} + \Delta P_t + \Delta P_{r,\,ср}$, как среднее из давлений P_k и P_k'. В нашем примере $\backsim 8{,}15$ ата.

В случае, если давление у приемников различно, но не зависит от $\Delta P_{r,ср}$, то уравнение для условного минимума потерь энергии значительно упрощается, а именно:

$$2AP_m^2 + AP_m (5 - P_{ср}) + B\,\frac{P_{ср}}{P_m^2} = E,$$

или

$$4AP_m + A(5 - P_{ср}) - \frac{2BP_{ср}}{P_m^3} = O,$$

откуда

$$4AP_m^4 + A(5 - P_{ср})\,P_m^3 = 2BP_{ср},$$

или

$$P_m^4 + \frac{A}{4A}(5 - P_{ср})\,P_m^3 = \frac{2BP_{ср}}{4A} \quad \ldots\ldots (38)$$

$P_{ср}$ можно рассматривать в данном случае, как $\dfrac{P_1 n_1 + P_2 n_2 + .. + P_n n_n}{\Sigma n}$, где P_1, P_2, P_3 — средние из измеренных давлений у групп приемников с числом n_1, n_2, n_3.

Если давление у всех приемников одинаково, можно пользоватся предыдущим уравнением, взяв P_n вместо $P_{ср}$. В простейшем случае, когда $P_n = 5$, уравнение обращается в $P_m = \sqrt[4]{\frac{B.P_n}{2A}} = \sqrt[4]{2{,}5\,\frac{B}{A}}$

§ 6. Разветвленная сеть с переменными потерями от охлаждения и неодинаковым давлением у приемников.

Суммарные потери энергии для этого случая, согласно уравнений и могут быть выражены *):

$$E = 2AP_m^2 + [A(5 - P_{ср}) + 14400\,nk\,P_{ср}]P_m + B^1 P_{ср}\frac{\Delta P_{r,ср}}{P_m} - 7200\,nkP_{ср} \quad .(39)$$

Рассмотрим сначала общий случай — $P_{ср}$ зависит от падения давления, от трения и от охлаждения воздуха; дросселирующих приспособлений не установлено.

Для большинства современных воздухопроводных сетей падение давления от охлаждения воздуха ΔP_t можно считать практически одинаковым для всех групп приемников ввиду значительной протяженности сетей. Величина $\Delta P_t \cong 0{,}165\,P_k$ согласно нашим допущениям *).

Для выражения $P_{ср}$ и $\Delta P_{r,ср}$ в функции от P_m, имеем следующие уравнения:

$$a)\ P_{ср} = P + \alpha\Delta P_{r,ср};\quad b)\ \Delta P_{r,ср} = \frac{C^1 P^2_{ср}}{P_m};\quad c)\ P_m = \frac{2P_{ср} + \Delta P_{r,ср} + \Delta P_t}{2}$$

Заменив ΔP_t через $0{,}165\,P_k = 0{,}165\,(2P_m - P_{ср})$ и решая уравнения (a) и (c) относительно $P_{ср}$, получим:

$$P_{ср} = \frac{1{,}67\,\alpha P_m}{1{,}84\alpha + 1} + \frac{P}{1{,}84\alpha + 1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (40)$$

Тогда

$$\Delta P_{r,ср} = \frac{C^1}{P_m}\left[\frac{1{,}67\alpha P_m}{1{,}84\alpha + 1} + \frac{P}{1{,}84\alpha + 1}\right]^2 \quad \ldots\ldots (41),$$

где P — давление у наиболее удаленной группы приемников в ата.

Так как α обычно не свыше 0,2, то $1{,}835\,\alpha$ округляем до $1{,}84\,\alpha$. Заменяя $P_{ср}$ и $\Delta P_{r,ср}$ в основном уравнении для суммарных потерь, получим

$$E = 2AP_m^2 + \left[A\left(\frac{(9{,}2\alpha + 5 - P)}{1{,}84\alpha + 1} - \frac{1{,}67\alpha P_m}{1{,}84\alpha + 1}\right) + 14400\,nk\left(\frac{1{,}67\alpha P_m}{1{,}84\alpha + 1} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{P}{1{,}84\alpha + 1}\right)\right]P_m + \frac{B^1 C^1}{P^2_m}\left(\frac{1{,}67\alpha P_m + p}{1{,}84\alpha + 1}\right)^3 - 7200\,nk\left(\frac{1{,}67\alpha P_m + p}{1{,}84\alpha + 1}\right) \quad ..(42)$$

Приравниваем нулю первую производную от E по P_m:

$$4AP_m + \frac{A}{1{,}84\alpha + 1}\left(9{,}2\alpha + 5 - P - 3{,}34\alpha P_m\right) + \frac{14400\,nk}{1{,}84\alpha + 1}(3{,}34\alpha P_m + P) +$$

$$+ \frac{B^1 C^1}{(1{,}84\alpha + 1)^3}\left(\frac{1{,}67^3\alpha^3 P_m^3 - 3.1{,}67\alpha P^2 P_m - 2P^3)}{P_m^3} - \frac{7200.1{,}67\alpha\,nk}{1{,}84\alpha + 1} = 0\right.$$

*) См. вышеупомянутую работу Бетехтина А. С. „О потерях энергии в сетях сжатого воздуха“.

После приведения подобных членов и освобождения от знаменателя, получим:

$$(1{,}84\alpha+1)^2\,[4A(\alpha+1)+14400.3{,}34\alpha\, nk]\,P_m{}^4+\Big\{[A(9{,}2\alpha+5-P)+$$
$$+7200(2P-1{,}67\alpha)]\,(1{,}84\alpha+1)^2+1{,}67^3\,\alpha^3\,B^1\,C^1\Big\}P^3{}_m-3.1{,}67\alpha\,B^1\,C^1\,P^2\,P_m-$$
$$-2B^1\,C^1\,P^3=0\quad\ldots\ldots\ldots\ldots\ (43)$$

Нетрудно видеть, что весьма сложное выражение (43) при равенстве давления у всех приемников, т. е. при $\alpha=0$, принимает более простой вид:

$$4AP_m{}^4+[A(5-P)+14400\,nkP]\,P_m{}^3-2B^1\,C^1P^3=0$$

Так как $B^1\,C^1$ — наш прежний коэффициент B, то, разделив все члены окончательного уравнения (43) на $2B$ и обозначив:

$$\frac{4A(\alpha+1)+14400.3{,}34\alpha\,nk}{2B}=M\quad\ldots\ldots\ldots\ (44)$$

$$\frac{[A(9{,}2\alpha+5-P)+7200\,nk(2P-1{,}67\alpha)]\,(1{,}84\alpha+1)^2+1{,}67^3\,\alpha^3\,B^1\,C^1}{2B}=N\ .\ (45),$$

получим:

$$(1{,}84\alpha+1)^2\,MP_m{}^4+NP_m{}^3-2{,}5\alpha P^2\,P_m-P^3=0\quad\ldots\ldots\ (46),$$

т. е. уравнение, аналогичное по виду уравнению (37) с теми же степенями P_m, но только с другими, более сложного вида коэффициентами.

Уравнение (46), а также сложность выражений для коэффициентов M и N невольно наводят на мысль о том, что если бы какое-либо рудоуправление решило организовать постоянный контроль над потерями энергии в компрессорных установках, то первым мероприятием его должно бы явиться уравнивание давлений у всех групп приемников (т. е. достижение $\alpha=0$) хотя-бы путем установки у ответвлений дросселирующих приспособлений. В противном случае, при почти ежедневных изменениях величины α, контроль над потерями был бы практически весьма трудно осуществим, так как решение уравнения (46) с дальнейшим согласованием величин условного и реального значения P_m является делом довольно трудным.

Найдем наивыгоднейшее давление в сети и у компрессора для численного примера, рассмотренного нами в § 4 настоящей статьи.

Мы имели $\alpha=0,\ 0386$; $A=8{,}14.10^4$; $B=2{,}94.10^6$; $nk=50$ и $P=5$ ата. Отсюда:

$$(\alpha+1)=1{,}0386;\ (1{,}84\alpha+1)^2=1{,}148;\ 1{,}67\alpha=0{,}0645;\ 9{,}2\alpha=0{,}355;\ M=0{,}0301;$$
$$(1{,}84\alpha+1)^2\,M=0{,}03534;\ N=0{,}692;\ 2{,}5\alpha P^2=2{,}412\ \text{и}\ P^3=125.$$

Уравнение (46) примет вид (после умножения обеих частей на 100):

$$3{,}534P_m{}^4+69{,}2\,P_m{}^3-241{,}2\,P_m=12500$$

Значение P_m, удовлетворяющее этому уравнению, будет $P_m=5{,}40$ ата.

Полученное для величины P_m значение показывает, что для данных условий, в частности при заданных диаметрах воздухопроводов, возможен только фиктивный минимум потерь, так как P_m не может быть меньше $\dfrac{1{,}84\,P_{\text{ср}}+\Delta P_{r,\text{ср}}}{1{,}67}$, как это следует из уравнений: $P_m=\dfrac{2P_{\text{ср}}+\Delta P_{r,\text{ср}}\,\Delta P_t}{2}$

и

$$\Delta P_t=0{,}165\,(2P_m-P_{\text{ср}})$$

Если даже $P_{ср} = 5$ (а на самом деле оно несколько больше) и $\Delta P_{r,ср}$ примем (по § 5) 1,85 ата, то P_m должно быть порядка 6,6 ата. Для получения реального минимума потерь возможны два пути: *a*) уменьшение рабочего давления у приемников и *b*) уменьшение диаметров воздухопроводов. Первый путь вполне приемлем, если первоначально заданное давление P_n превышало 5 ата. Второй путь хотя и уменьшает количественные потери, но ведет к сильному увеличению потерь давления от трения. Первый путь уменьшает коэффициент при P_m^3 в уравнении для минимума потерь почти прямо-пропорционально уменьшению P, второй путь ведет к уменьшению обоих коэффициентов M и N.

Очевидно, что при настоящем состоянии рудничного воздушно-силового хозяйства СССР наиболее естественным является второй путь, т. е. замена труб на некоторых участках трубами другого диаметра с дальнейшей систематической проверкой наивыгоднейшего среднего давления в сети P_m, а отсюда и наивыгоднейшего давления у компрессора.

§ 7. Влияние среднего диаметра сети на величину фиктивного и реального наивыгоднейшего давления у компрессора.

Основное уравнение для наивыгоднейшего среднего теоретического давления в сети $(1{,}84\alpha + 1)^2 MP^4_m + NP^3_m - 2{,}5\,\alpha P^2 P_m - P^3 = 0$ показывает, что при заданном давлении у наиболее отдельной группы приемников *) величина P_m зависит от α, M и N. Каждый из этих коэффициентов является функцией диаметров труб на отдельных участках сети, а значит и функцией ее среднего диаметра. При этом зависимость величин α, M и N от $D_{ср}$ является довольно сложной. В частности, например, одновременное увеличение или уменьшение сечений всех трубопроводов на один и тот же $^0/_0$ не изменяет величины эквивалентных длин (как это следует из уравнения 22), а стало быть, и величины α, тогда как коэффициенты M и N изменяют свои значения.

Особенно резко изменяется при этом значение M. Действительно

$$M = \frac{4A(\alpha + 1) + 14400 . 3{,}34\alpha\ nk}{2B};$$

но величина A прямо-пропорциональна величине среднего диаметра сети, и с увеличением диаметров на некоторый $^0/_0$ она увеличивается на тот же $^0/_0$; величина же $B = B^1 . C^1$, причем величина C^1 обратно пропорциональна пятой степени диаметра магистрали, и с увеличением D на $X^0/_0$ уменьшается в $\left(1 + \frac{X}{100}\right)^5$ раз. Отсюда при $\alpha = 0$ величина M при изменении диаметров всех трубопроводов на $X^0/_0$, увеличится в $\left(1 + \frac{X}{100}\right)^6$ раз, при $\alpha \neq 0$, изменение величины M будет тем резче, чем меньше α и nk, т. е. чем меньше доля величины $14400 . 3{,}34\,\alpha\, nk$ в общей величине $4A(\alpha + 1) + 14400 . 3{,}34\,\alpha\, nk$. Для коэффициента N изменение его величины с изменением величины диаметров трубопроводов, включая и магистраль, будет менее резким, т. к. в этом случае превалирующим является член $7200\,nk\,(2P - 1{,}67\alpha)$; член $A\,(9{,}2\alpha + 5 - P)$, с увеличением D увеличивается, а член $1{,}67^3\,\alpha^3 . B^1 C^1$ — уменьшается, так что даже при $\alpha = 0$ увеличение диаметра магистрали на $X^0/_0$ может уменьшить величину N как максимум

*) Вернее, у группы, работающей в наиболее тяжелых условиях, в частности у группы, хотя и не наиболее удаленной от компрессора, но имеющей ненормально малые сечения ответвлений.

в $\left(1+\frac{X}{100}\right)^5$ раз. Если же, как это чаще всего бывает в действительности, меняется лишь величины диаметров ответвлений и второстепенных магистралей, то величина α будет изменяться сравнительно мало, равно как и величина M и N, т. к. в этом случае C^1, являющийся одним из множителей в выражении $B=C^1 B^1$, будет пропорционально лишь $\Sigma l_э$, причем величина $\Sigma l_э$ будет изменяться не в отношении $\left(1+\frac{X}{100}\right)^5$, а значительно меньше и тем меньше, чем больше длина магистрали и чем меньше число переоборудуемых участков. Менее резко будет изменяться также и коэффициент M. Во всяком случае, несомненно лишь одно: при увеличении диаметров сети на отдельных ее участках коэффициенты M и N будут увеличиваться, а при уменьшении диаметров — уменьшаться, при сравнительно малых колебаниях величины α. Так как увеличение M и N согласно уравнения (46) обусловливает уменьшение P_m, то наивыгоднейшее теоретическое среднее давление в сети P_m с увеличением диаметров воздухопроводов хотя бы на отдельных участках уменьшается. С этой точки зрения увеличение диаметров воздухопроводов является желательным.

Если обратимся к реальной величине P_m, то, решая совместно уравнение

$$P_m=\frac{2P_{ср}+\Delta P_{r,ср}+\Delta P_t}{2},\quad P_{ср}=\frac{1{,}67\,\alpha P_m+P}{1{,}84\alpha+1},\quad \Delta P_{r,ср}=\frac{C^1 P^2_{ср}}{P_m}$$

и

$$\Delta P_t=0{,}165\,(2P_m-P_{ср})$$

относительно P_m, получим, что в общем случае величина P_m должна удовлетворять уравнению:

$$1{,}67\,[(1{,}84\alpha+1)^2-(1{,}84\alpha+1)\,1{,}84\alpha-1{,}67\alpha^2 C^1]\,P^2_m-[2.1{,}67\alpha P C^1+$$
$$+1{,}84.(1{,}84\alpha+1)P]\,P_m-C^1P^2=0,$$

откуда P_m, после приведения подобных членов при P^2_m, выразится:

$$P_m=\frac{3{,}34\alpha PC^1+1{,}84\,(1{,}84\alpha+1)\,P+}{3{,}34\,(1{,}84\alpha+1-1{,}67\alpha^2 C^1)}$$
$$\frac{+\sqrt{P^2\,[3{,}34\alpha C^1+1{,}84\,(1{,}84\alpha+1)]^2+4.1{,}67\,(1{,}84\alpha+1-1{,}67\alpha^2 C^1)\,C^1 P^2}}{3{,}34\,(1{,}84\alpha+1-1{,}67\alpha^2 C^1)}. \quad (47)$$

Как видно из последнего выражения, с увеличением диаметров отдельных участков сети P_m будет уменьшаться, хотя и медленно. Действительно $C^1-\varphi(\Sigma l_э)$; но эквивалентная длина любого участка с увеличением его диаметра уменьшается в $\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^5$ раз, где d_0 — первоначальный, а d_1 — увеличенный диаметр воздухопровода на данном участке. Однако $\Sigma l_э$ будет уменьшаться медленнее, чем уменьшаются отдельные эквивалентные длины и тем медленнее, чем длиннее магистраль по сравнению $\Sigma l_э - l_{маг.}$ При этом необходимо отметить, что в выражении под корнем C^1 входит как с плюсом, так и с минусом, и результирующий член с C^1 будет иметь вид:

$$3{,}34\,C^1\,[3{,}34\alpha^2 C^1+(1{,}84\alpha+1)(3{,}67\alpha+2)-3{,}34\alpha^2 C^1]=$$
$$=3{,}34\,C^1(1{,}84\alpha+1)(3{,}67\alpha+2)=6{,}68\,C^1(1{,}84\alpha+1)^2$$

Влияние C^1 на величину знаменателя в выражении для P_m будет ничтожно, так как в правильно запроектированных сетях α порядка 0,1 и даже менее, а C^1 не превысит 0,5 *), так что величиной $1{,}67\,\alpha^2 C_1$ можно пренебречь. Таким образом в окончательном виде:

$$P_m = \frac{3{,}34\alpha P C^1 + 1{,}84\,(1{,}84\alpha + 1)\,P + P\,(1{,}84\alpha + 1)\sqrt{6{,}68\,C^1 + 1{,}84^2}}{3{,}34\,(1{,}84\alpha + 1)}$$

или

$$P_m = P\left[\frac{\alpha C^1}{1{,}84\alpha + 1} + 0{,}55 + 0{,}3\sqrt{6{,}68\,C^1 + 1{,}84^2}\right] \quad \ldots\ldots (48)$$

Исходя из последнего выражения, можно утверждать, что с увеличением диаметров воздухопроводов P_m уменьшается сравнительно медленно, причем в сетях с неравномерным давлением у приемников уменьшение P_m с увеличением диаметра участков (при прочих равных условиях) идет медленнее, чем в сетях с одинаковым давлением у приемников. В последнем случае

$$P_m = P\,\frac{1{,}84 + \sqrt{1{,}84^2 + 6{,}68\,C^1}}{3{,}34}$$

или

$$P_m = P\left(0{,}55 + 0{,}3\sqrt{6{,}68\,C^1 + 1{,}84^2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots (49)$$

Анализ выражений для фиктивного значения P_m, при котором имеет место минимум потерь энергии сжатого воздуха, и реального значения P_m, как функций потерь давления и давления у приемников, позволяет наметить путь к уничтожению обычно имеющегося между этими величинами расхождения. Так как изменение диаметров воздухопроводов на отдельных участках сети вызывает для обоих P_m изменение их величины в одинаковом направлении, но с разной интенсивностью, то очевидно, всегда возможно такое изменение диаметров воздухопроводов на отдельных участках, при котором реальное значение P_m совпадает с фиктивным. Чем больше первоначальное расхождение между обоими значениями P_m, тем резче должны быть изменения в величине диаметров отдельных участков и тем большее количество участков должно быть переоборудовано. Для первого раза решение этого вопроса сопряжено со значительной затратой времени, так как придется, вероятно, испробовать несколько комбинаций для получения удовлетворительного совпадения между значениями P_m. Однако в дальнейшем, когда с течением времени будет изменяться конфигурация сети и число работающих приемников, поддерживать совпадение между обоими значениями P_m будет значительно легче, так как для этого потребуется изменение сечения на одной-двух второстепенных магистралях. Во всяком случае, та экономия, которая неизбежно получится при работе с минимумом потерь энергии, всегда с избытком окупит оплату сил, затраченных на отыскание наивыгоднейшего реального P_m.

Так, в установках средней производительности порядка 100 *куб. м* в мин. при средней протяженности сети в 15—20 *км* потери воздуха на утечку считают около 20% от полезного расхода воздуха, что в данном случае составит 20 *куб. м* в мин. Если на каждом *куб. м* полезного используемого воздуха съэкономить на потерях энергии только 1000 *кг/м*, а подобная экономия вполне возможна,— то при стоимости одного *кг/м*

---

*) Из выражения $\Delta P_{r,\text{ср}} = \dfrac{C^1 P_{\text{ср}}}{P_m}$ при $\Delta P_{r,\text{ср}} = 2$ ата, $P_{\text{ср}} = 5$ ата и $P_m = 6$ ата, получим $C^1 = \dfrac{12}{25} = 0{,}48$. С увеличением $P_{\text{ср}}$ и уменьшением $\Delta P_{r,\text{ср}}$ C^1 еще уменьшится.

в $2{,}4 . 10^{-5}$ коп., ежегодная экономия благодаря уменьшению качественных потерь составит $\frac{2{,}4 . 10^{-5} . (100-20) . 60 . 5{,}5 . 3 . 345 . 1000}{100} = 6557$ руб. 76 к. при трехсменной работе и продолжительности работы установки в 5,5 ч. в смену.

Количественные потери тоже могут быть уменьшены, как минимум, на 15%, или до 17 *куб. м* в минуту вместо 20, что при стоимости 1 *куб. м* воздуха в 0,6 коп. даст в течение года еще $\frac{0{,}6 . 20 . 15 . 60 . 5{,}5 . 3 . 345}{100} =$ $= 6147$ руб. 90 коп.

Таким образом суммарная экономия не потерях в ценностном выражении составит для данного случая около 6557 р. 76 к. + 6147 р. 90к. = 12705 руб. 66 коп., или округленно 12700 руб. в год.

В действительности же экономия будет значительно выше, так как практика показывает, что фактическая стоимость 1 куб. *м* свободного воздуха значительно выше запроектированной: так, для Прокопьевского рудоуправления Кузбассугля фактическая стоимость 1 куб. *м* воздуха оказывается 1,07 коп. вместо запроектированной 0,5 коп.

Расходы на содержание добавочного штата, ведающего контролем потерь, будут порядка 7000—8000 руб. в год, так что организация службы контроля потерь воздуха экономически целесообразна даже для установки средней производительности. Что же касается более крупных воздушно-силовых установок, как например на Анжерке, на шахте 9—15, на Прокопьевской Коксовой, на шахте „СТО" Красногвардейского рудоуправления, на руднике Темир-Тау Сталинского металлургического завода и многих других, то здесь рентабельность контроля потерь не вызывает никаких сомнений.

§ 8. Влияние отдельных категорий потерь энергии сжатого воздуха на величину среднего наивыгоднейшего давления в сети

Анализ коэффициентов уравнения (46), выражающего условия для минимума потерь энергии для наиболее общего случая, позволяет сделать следующие выводы:

1. С увеличением потерь энергии от утечек и от охлаждения воздуха величина наивыгоднейшего давления в сети P_m стремится к уменьшению. Действительно, с увеличением коэффициента A, характеризующего потери энергии от утечек воздуха и величины nk, входящей составной частью в выражении для потерь от охлаждения воздуха, коэффициенты M и N в уравнении (46) возрастают, а значит P_m уменьшается.

2. С увеличением потерь энергии от трения воздуха в трубах величина P_m тоже стремится к увеличению. Действительно, в выражения для коэффициентов M и N коэффициент B, характеризующий величину потерь энергии от трения воздуха в трубах, входит в знаменатель, с увеличением B коэффициенты M и N уменьшаются, а значит P_m стремится к возрастанию.

3. Сварка труб уменьшает величину A, характеризующую величину потерь энергии от утечек и тем самым способствует возрастанию P_m и уменшению разрыва между фиктивным наивыгоднейшим и реальным значением P_m.

4. Величина диаметров воздухопроводов, а также способ соединения воздухопроводных труб не оказывают существенного влияния на величину потерь энергии от охлаждения воздуха. При существующих условиях работы рудничных воздушно-силовых установок эта категория потерь энергии менее всего поддается нашему воздействию.

5. Для уменьшения разрыва между наивыгоднейшим фиктивным и реальным средним давлением в сети полезно и необходимо изменять время от

времени диаметры воздухопроводов на отдельных участках. Предварительные подсчеты показывают, что для целого ряда уже работающих установок подобное изменение должно быть сделано в сторону уменьшения существующих диаметров труб. Этот вывод противоречит установившемуся взгляду, согласно которого необходимо стремиться к возможно меньшей потере давления от трения (не свыше 0,1 ата), что может быть достигнуто лишь путем увеличения диаметров труб. Подобное расхождение во взглядах по столь важному вопросу получилось потому, что мы рассматривали экономику рудничной воздушно-силовой установки в целом, тогда как сторонники увеличения диаметров труб исходят из условия, чтобы давление воздуха у приемников не упало ниже допустимой для них величины. Выше мы уже видели, что увеличение диаметров воздухопроводов увеличивает потери, на утечки пропорционально $\frac{D_1}{D_0}$, тогда как потери энергии от трения уменьшаются в $\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^5$ раз. Казалось бы, что увеличение диаметров труб всегда выгодно, так как одна из составляющих суммарной величины потерь растет сравнительно медленно, а другая падает очень быстро. Однако это верно лишь в том случае, когда первоначальные потери энергии от трения велики, а потери энергии от утечек выражаются сравнительно скромной цифрой. Если же, как это чаще всего бывает в сетях большой протяженности, потери от утечек значительно больше, нежели потери энергии от трения, то увеличение диаметров труб не только не уменьшит суммарные потери, но даже увеличит их. Поясним это примером: пусть потери энергии от утечек 2.10^6 *кгм* в час, а от потери давления 400000 *кгм* в час; суммарные потери выразятся цифрой 2400000 *кгм* в час. При увеличении диаметров на 10% потери соответственно будут 2200000 и $\frac{400000}{1{,}1^5} = 250000$, а суммарные потери 2450000 *км*, т. е. на 50000 *кгм* больше, нежели в первом случае. Этот простой пример показывает, что с точки зрения уменьшения суммарных потерь энергии иногда выгодно не увеличение диаметров труб, а наоборот, уменьшение их. Понятно, что рекомендуя уменьшение диаметров труб на отдельных участках сети, мы одновременно оставляем в полной силе условие, что давление у приемников не падает ниже допустимой для них величины.

§ 9. О влиянии фасонных частей и арматуры на величину наивыгоднейшего давления в сети и у компрессора.

Наблюдающийся обычно разрыв между теоретическими наивыгоднейшими давлениями в сети и компрессора и действительными значениями этих величин уменьшается иногда весьма значительно, если учесть влияние фасонных частей и арматуры. В самом деле, наличие в воздухопроводной сети фасонных частей и арматуры равносильно увеличению длины сети на 10—15%. На величине теоретического наивыгоднейшего P_m увеличение длины сети, благодаря прибавлению фиктивных длин, компенсирующих наличие арматуры и фасонных частей, почти не отразится или отразится очень мало. Действительно, величина P_m в этом случае обусловлена главным образом соотношением коэффициентов A и B при прочих равных условиях. Поэтому в тех случаях, где потери от охлаждения воздуха можно считать постоянными, введение в расчет фиктивных длин сети вместо реальных почти не изменит величины P_m, так как и A и B увеличатся почти в одинаковом отношении, т. е. $\frac{A}{B}$ остается почти неизмененным.

Другое дело с падением давления от трения. С увеличением длины сети оно, естественно, увеличивается на столько же процентов, если все остальные величины (диаметры воздухопроводов, расход воздуха) остаются неизменными. Так как в большинстве случаев теоретическое наивыгоднейшее давление P_m, зависящее между прочим и от падения давления от трения, получаются меньше для данных конкретных условий, то введение в расчет вместо реальных длин сети ее фиктивных длин не только является принципиально более правильным, но и дает более близкую к действительности картину и одновременно уменьшает разрыв между теоретическими и действительными величинами P_m.

Несколько сложнее будет обстоять дело в том случае, когда потери энергии от охлаждения нельзя считать постоянными. В этом случае учет влияния фасонных частей и арматуры на величину P_m скажется меньше, хотя все же скажется в сторону, благоприятствующую уменьшению вышеупомянутого разрыва. Однако, поскольку мы сами склонны рассматривать решение вопроса о наивыгоднейшем давлении в сети и у компрессора для этого случая, как решение весьма приближенное, не претендующее на точность, считаем излишним рассматривать здесь более подробно влияние фасонных частей и арматуры в случае изменяющихся потерь от охлаждения воздуха.

§ 10. Графо-аналитический метод определения наивыгоднейшего среднего давления в сети.

Сложность конечных выражений для наивыгоднейшего среднего давления в воздухопроводной сети и неизбежное обычно расхождение между величиной фиктивного наивыгоднейшего давления и реальным давлением в сети при данных условиях, создают большие трудности при определении P_m в каждом конкретном случае. Однако эти трудности могут быть значительно облегчены применением графического метода как для нахождения величин, знание которых необходимо для определения P_m, так и для решения аналитически сложных уравнений.

В первую очередь графическим путем могут найдены эквивалентные длины для отдельных групп приемников. Действительно. преобразовав выражение $l_э = l\left(\frac{D}{d_x}\right)^5\left(\frac{V_x}{V}\right)^2\frac{\beta_x}{\beta}$ в равноценное ему $l_э = l\left(\frac{D}{d_x}\right)^5\left(\frac{V_x}{V}\right)^{1,852}$, т. е., избавившись от двух переменных, мы можем определять $l_э$ для каждого конкретного случая, пользуясь номограммой, представленной на фиг. 3. При этом для l правильнее брать фиктивные длины, т. е. реальные длины участков, умноженные на коэффициент 1,1 — 1,2, а в среднем 1,15.

С помощью номограмм же могут быть найдены:

а) Скорости воздуха на отдельных участках, необходимые для определения средней скорости воздуха в сети, по которой из кривых Флейшера, фиг. 2-й определяется коэффициент динамического режима.

Номограммы для определения скоростей в отдельных трубопроводах представлены на фиг. 4 и 5.

Номограммы построены исходя из формулы $C = \frac{4V}{60\pi d^2 P_m}$ . . (50),

где V — количество протекающего через сечение воздухопровода свободного воздуха в *куб. м* в минуту (включая и потери), d — диаметр воздухопровода в *м*, а P_m — среднее давление воздуха на данном участке. Без большой погрешности P_m можно принять 6,75 *ата*; при этом допущении скорости воздуха на некоторых участках получаются преуменьшенными (у ответвлений), а на других — преувеличенными, так что возможные ошибки частично скомпенсируются. Формула для скорости примет более простой вид, если d в мм:

$$C = \frac{4V\,1000^2}{60\pi . 6{,}75 . d^2} \text{ или } C = \frac{3200V}{d^2} \text{ м в сек.} \quad . \; . \; . \; (51)$$

в) Коэффициент A. Номограмма для его определения представлена на фиг. 6-й.

Номограмма построена на основе уравнения: $A = 0{,}266\,K_c D_{cp} \Sigma l$, причем для Σl наиболее правильным будет брать сумму фиктивных длин, т. е. сумму реальных длин, увеличенных на $10 \div 15\%$.

Способ пользования номограммой очень прост. Из точки оси абсцисс, соответствующей величине данного среднего диаметра, восстанавливается перпендикуляр до пересечения с лучем Σl. Из точки пересечения проводится прямая, параллельная оси абсцисс. Эта прямая пересечет шкалу Σl в некоторой точке. Проведя луч из этой точки, восстанавливают перпендикуляр из точки оси абсцисс, соответствующей значению K_c до пересечения с этим лучем. Из точки пересечения проводят прямую, параллельную оси абсцисс, которая и отсечет на оси A искомое его значение. На номограмме показан случай определения A для следующих данных:

$$D_{cp} = 110{,}0 \text{ мм}, \; \Sigma l = 16000 \text{ м и } K_c = 0{,}7.$$

с) Коэффициент B. Из выражений:

$$B = \frac{7{,}62 . 10^{10} . \beta_u (nk)^3 \Sigma l_э}{T_0 D^5 \; n_y} \quad \text{и} \quad \beta_u = \frac{2{,}86}{G^{0{,}148}}$$

после освобождения от β_u получим:

$$B = \frac{4{,}05 . 10^9 . (nk)^{2{,}852} . l_{э.\,ср.}}{D^5} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (52)$$

Номограмма для определения B (в виде логарифмических шкал) представлена на фиг. 7. Способ пользования ясен из номограммы.

Коэффициент C^1, необходимый для определения реального падения давления в сети, может быть легко найден из выражения

$$C' = \frac{B}{1{,}3 . 10^5 (nk)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (53)$$

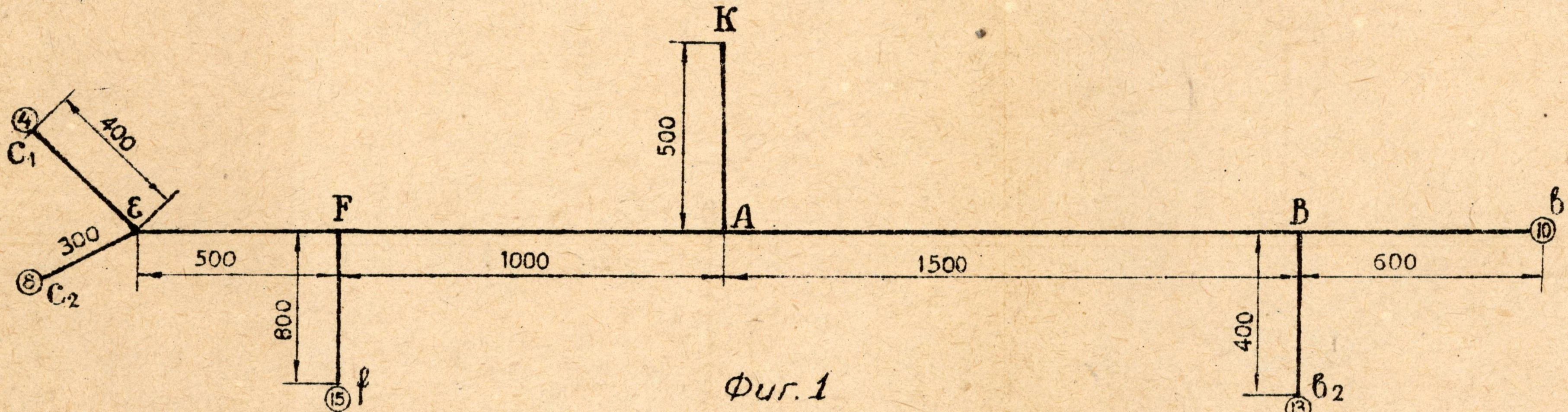
d) Наконец, в тех случаях, когда потери в сети от охлаждения воздуха можно считать неизменными и членом $P_m{}^3$ можно пренебречь, уравнение $2A(2\alpha + 1)^2(\alpha + 1)P^4_m - 3\alpha BF^2 P_m - BF^3 = 0$ можно решить графически.

По нашей просьбе, доцентом Сибирского горного института при кафедре математики А. Е. Миловидовым разработан простой и изящный метод графического решения этого уравнения. Номограмма уравнения представлена на фиг. 8-й. Она состоит из четырех шкал: трех неподвижных— шкала E, шкала D и шкала X (или P_m) и одной подвижной шкалы X (или P_m). Для решения уравнения необходимо определить сначала величины E и D для данного конкретного случая. Выражения, из которых они определяются, указаны на номограмме. Затем подвижная шкала ставится так, чтобы ее нуль совпал с полученным значением E. Далее берется линейка и вокруг точки, соответствующей значению D для данного случая, как вокруг центра, поворачивается до тех пор, пока не совпадут значения X на подвижной и неподвижной шкале. Так, например, для случая $E = 1600$ и

$D = 0{,}91$ (D вообще близко к I и чаще всего будет лежать в пределах $0{,}9 - 0{,}95$), $X = P_m = 7{,}1$ ata.

Заключение.

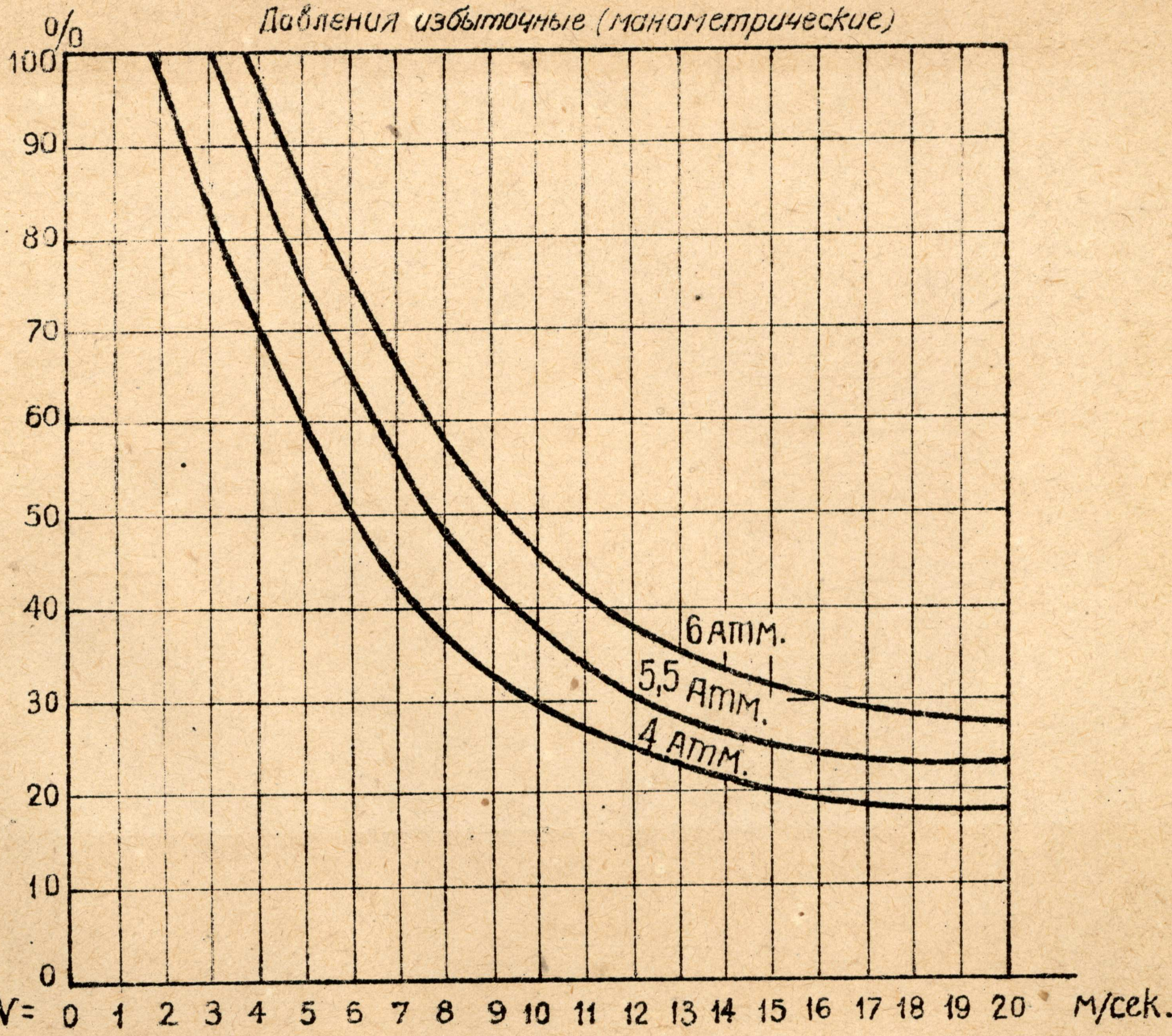
Настоящая работа, конечно, не претендует на исчерпывающее решение вопроса. Сложность взаимозависимостей различных величин, обусловливающих величину P_m, невольно толкала на путь замены этих зависимостей другими, математически более простыми, дающими тождественные результаты, но не выражающими истинной сущности происходящих процессов. Некоторые допущения, особенно для случая изменяющихся потерь от охлаждения воздуха, заставляют смотреть на решение вопроса для этого случая лишь как на первое приближение к действительности. Однако, поскольку затронутые нами вопросы почти не освещены в нашей и иностранной литературе, мы считаем решение их даже в таком виде известным шагом вперед.



4
C1
400
300
ε
8
C2
500
F
800
15
f
K
500
A
1000
1500
B
400
13
в2
600
10
в1

Фиг. 1

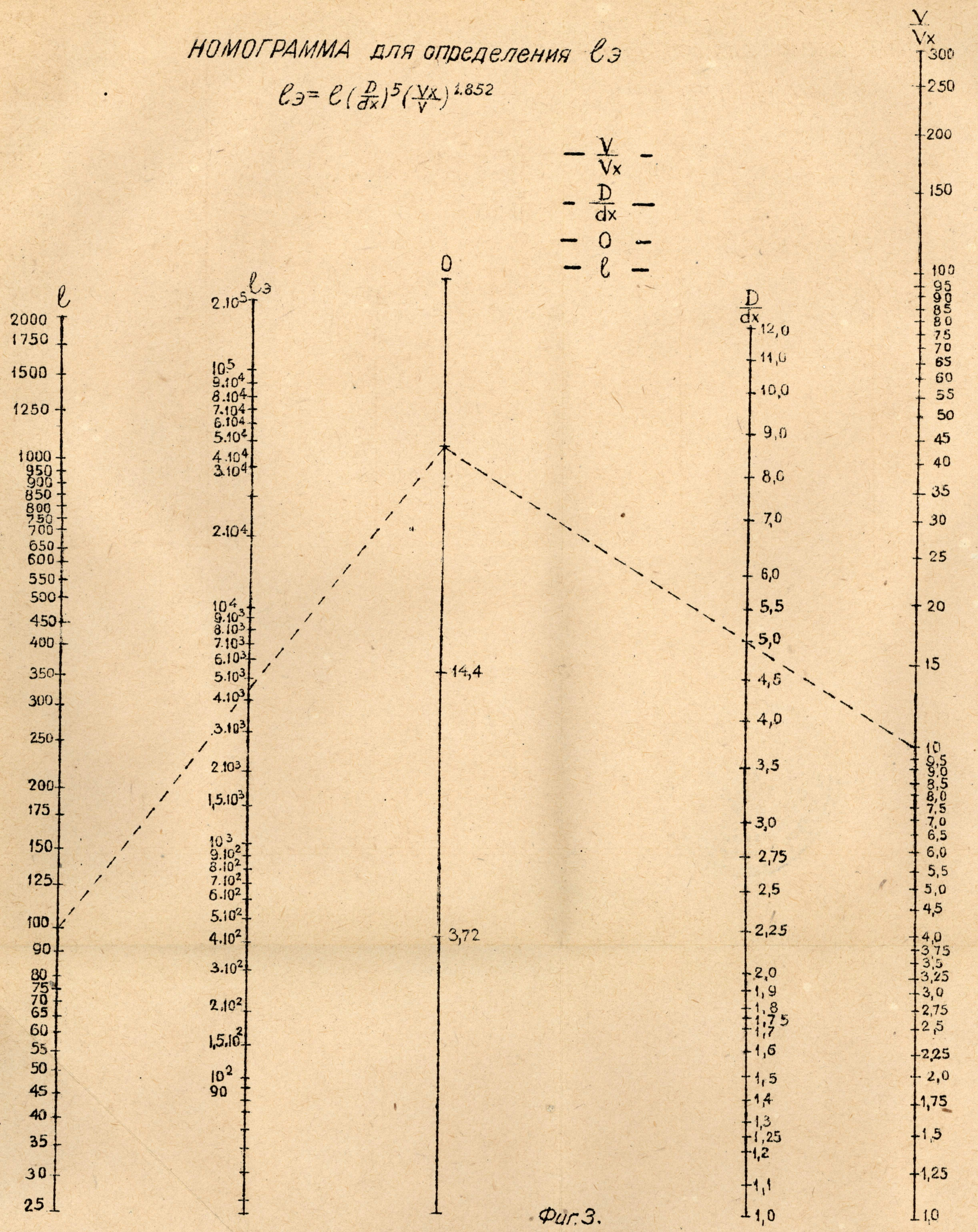
Зависимость потерь через неплотности от скорости воздуха в воздухопроводе.



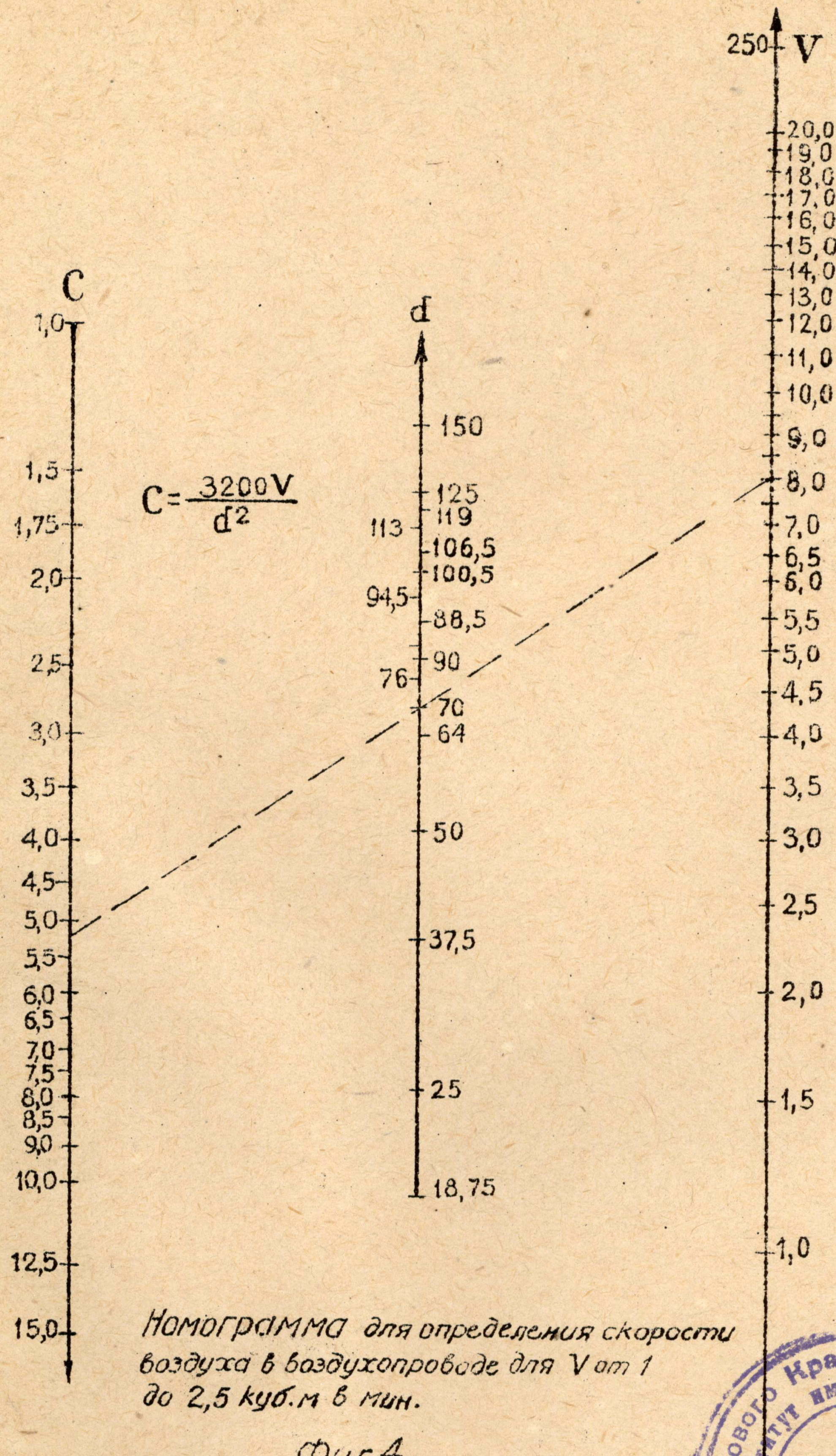
фиг. 2

НОМОГРАММА для определения $\ell_э$

$$\ell_э = \ell \left(\frac{D}{dx}\right)^5 \left(\frac{Vx}{V}\right)^{1.852}$$

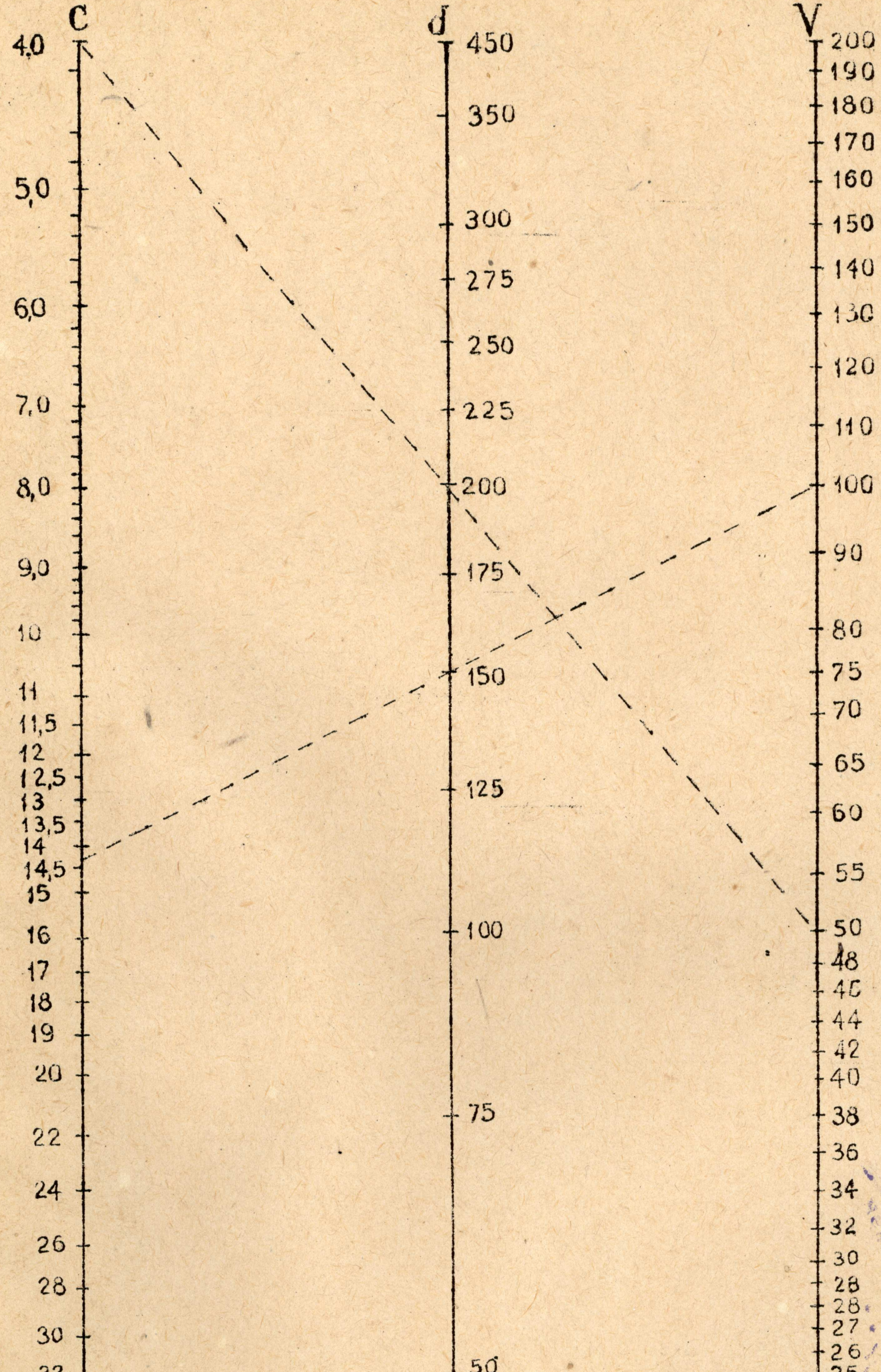


Фиг.3.



Номограмма для определения скорости воздуха в воздухопроводе для V от 1 до 2,5 куб.м в мин.

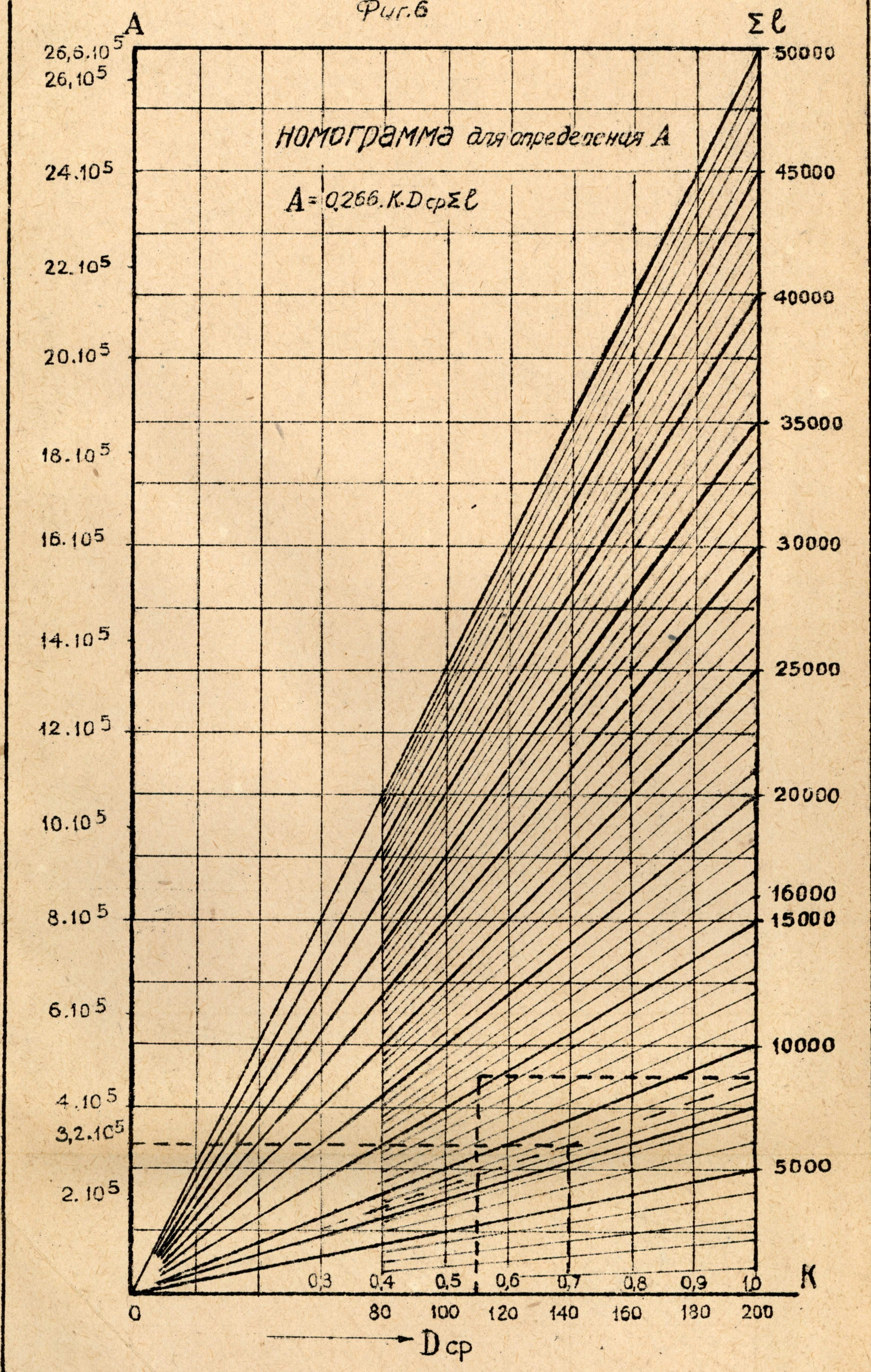
Фиг.4



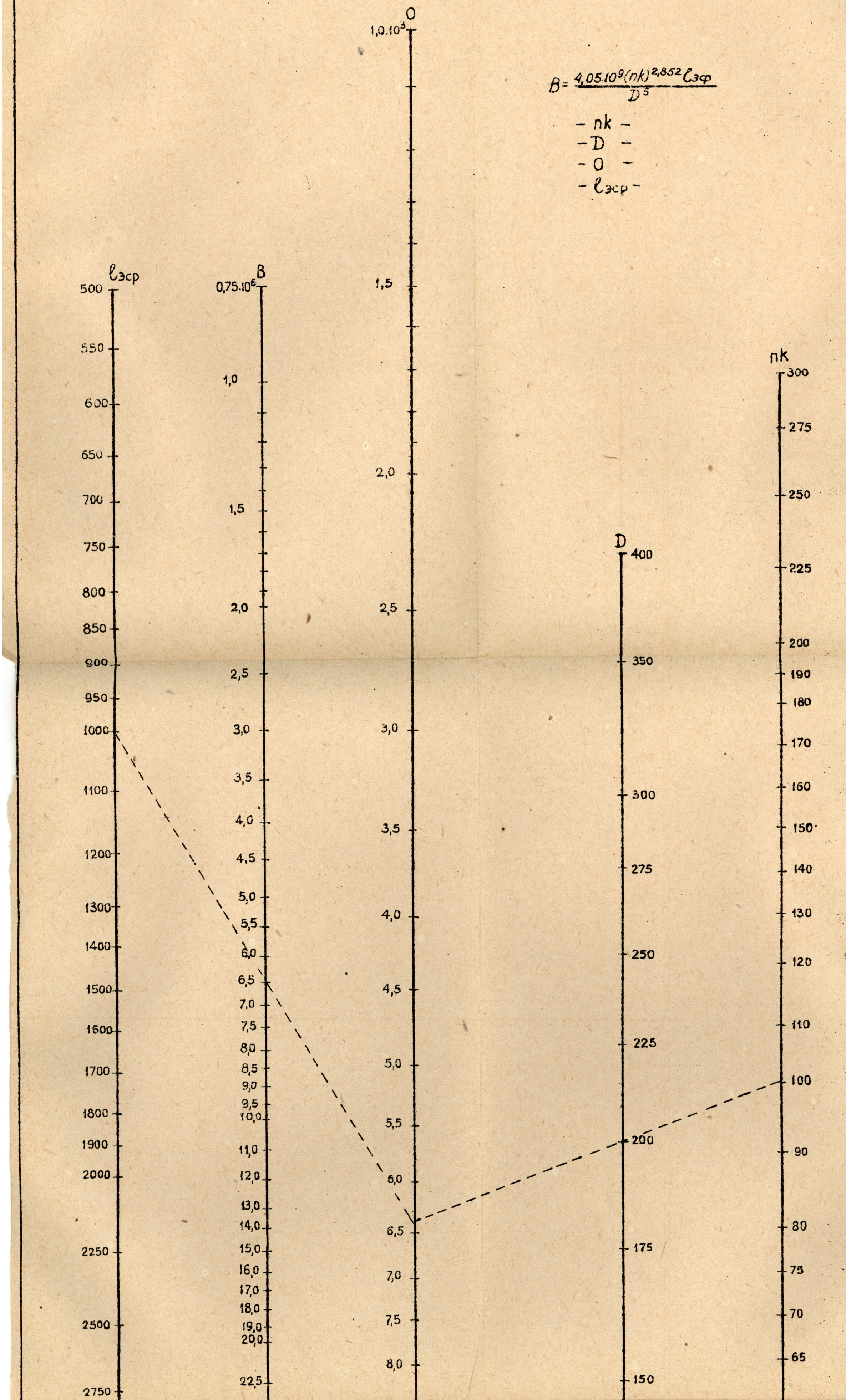
Номограмма для определения скорости воздуха в воздухопроводе для V от 25 до 200 куб. м в мин.

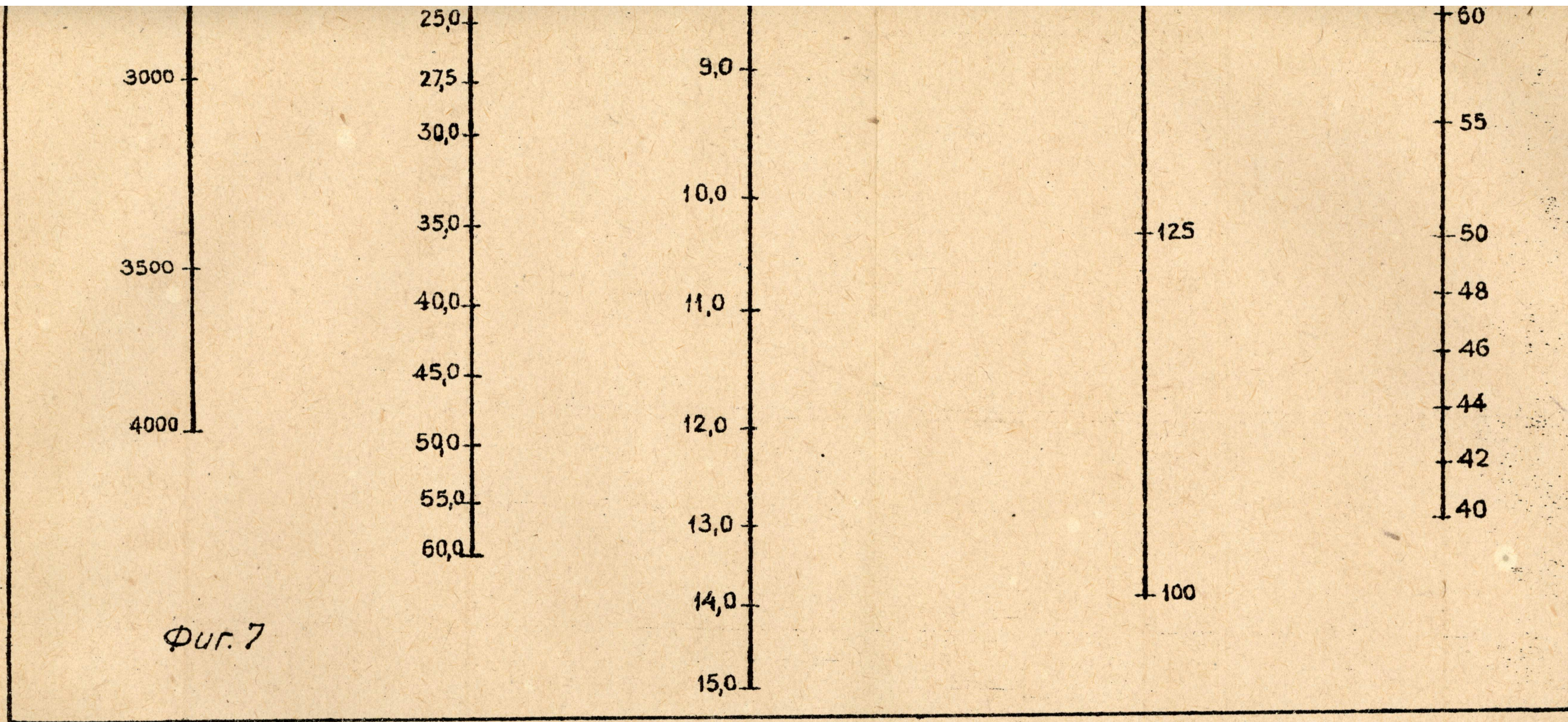
Фиг. 5

Фиг. 6


Номограмма для определения A
A = 0,266. K. Dср Σl
A
Σl
26,6.10⁵
26,10⁵
24.10⁵
22.10⁵
20.10⁵
18.10⁵
16.10⁵
14.10⁵
12.10⁵
10.10⁵
8.10⁵
6.10⁵
4.10⁵
3,2.10⁵
2.10⁵
50000
45000
40000
35000
30000
25000
20000
16000
15000
10000
5000
0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 K
0 80 100 120 140 160 180 200
Dср

НОМОГРАММА для определения B



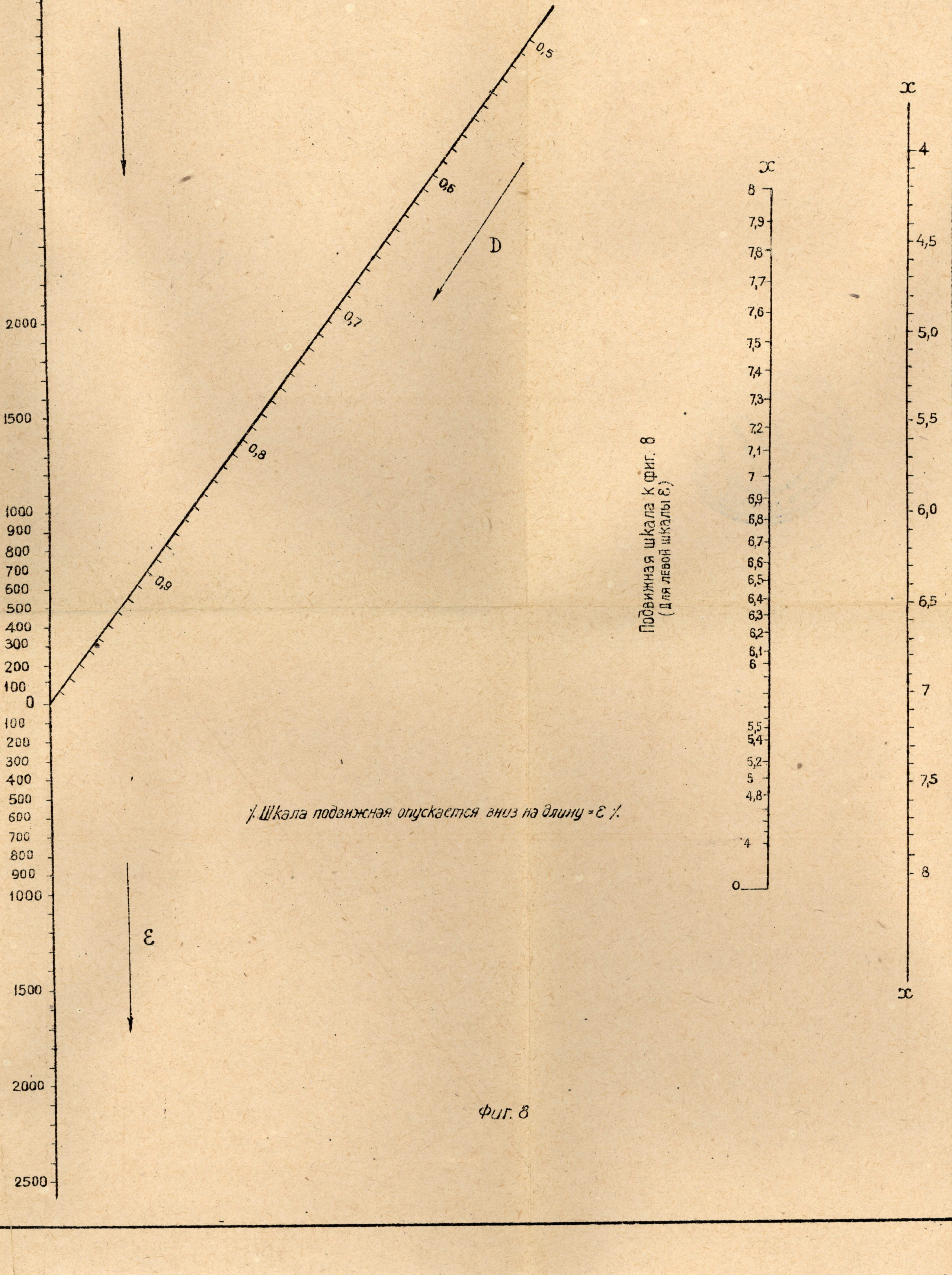

3000
3500
4000
25,0
27,5
30,0
35,0
40,0
45,0
50,0
55,0
60,0
9,0
10,0
11,0
12,0
13,0
14,0
15,0
125
100
60
55
50
48
46
44
42
40

Фиг. 7

Номограмма уравнения

$$2A(2\alpha+1)^2(\alpha+1)x^4-3\alpha B\mathcal{F}^2 x-B\mathcal{F}^3=0 \qquad 4<x=P_m<8$$

$$\varepsilon=\frac{B\mathcal{F}^2}{2A(2\alpha+1)^2(\alpha+1)} \qquad \frac{1}{D}=1+\frac{3B\alpha\mathcal{F}^2}{2000A(2\alpha+1)^2(\alpha+1)}$$



Фиг. 8