

И. Л. ПЕЙСАХОВ

АТЛАС ДИАГРАММ И НОМОГРАММ ПО ГАЗОПЫЛЕВОЙ ТЕХНИКЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО
• МЕТАЛЛУРГИЯ •

1965

И. Л. ПЕЙСАХОВ

АТЛАС

ДИАГРАММ И НОМОГРАММ
ПО ГАЗОПЫЛЕВОЙ ТЕХНИКЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО · МЕТАЛЛУРГИЯ · 1965



АННОТАЦИЯ

Атлас является пособием при технических расчетах процессов, в которых участвуют газовые среды при давлениях, близких к атмосферному. Эти диаграммы и номограммы значительно облегчают расчеты и часто заменяют справочные таблицы.

Особенно рационально применять помещенные в атлас диаграммы и номограммы при расчетах по теплотехнике, промышленной аэродинамике, вентиляционной технике, при расчетах по химическим и металлургическим процессам, связанным с применением газов и их движением, при расчетах и выборе аппаратов по пылеулавливанию и газоочистке, а также при измерениях и замерах газовых и запыленных потоков.

Атлас предназначен для проектировщиков и конструкторов, расчетчиков, производственников, научных работников и студентов, работающих и специализирующихся по вопросам охраны труда, санитарии, газоочистки и пылеулавливания, сантехники в металлургии, теплотехники, химии, цементной промышленности и др.

Большинство номограмм опубликовывается впервые. Диаграммы и номограммы построены по данным отечественной литературы.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Во многих отраслях народного хозяйства образуются или применяются газы, которые могут являться рабочими телами, основными или побочными продуктами или же отходами производства.

Для рационального использования этих газов в металлургии, химии, теплоэнергетике, строительном деле, сантехнике и в других отраслях промышленности и техники необходимо пользоваться расчетами, основанными на знании свойств поведения и законов движения воздуха, дымовых, аспирационных и других газов, в том числе загрязненных и нагретых.

Использование указанных выше газов играет существенную роль в развитии отечественной промышленности, поэтому изыскание способов, позволяющих упростить трудоемкие расчеты, связанные с разнообразными случаями применения газов, приобретает особое значение.

При расчетах по газопылевой технике обычно пользуются основными законами физики, гидравлики, химии, теплотехники и справочными таблицами.

Формулы и справочные величины для таких расчетов приходится брать из многочисленных литературных источников, что очень осложняет работу.

Использование помещаемых в атласе диаграмм и номограмм исключает необходимость обращаться к справочникам и пользоваться логарифмической линейкой, особенно в тех случаях, когда можно удовлетвориться точностью в расчете $\pm 1-2\%$.

Диаграммы и номограммы в основном построены автором по исходным данным соответствующих литературных источников и являются оригинальными, некоторые из них частично заимствованы.

К каждой из приведенных номограмм даны краткие пояснения, на основе каких закономерностей и формул они построены, и приведены примеры пользования ими.

При этом в ряде случаев не исчерпаны все возможные варианты постановки задач, решаемых при помощи той или иной диаграммы или номограммы, а охвачены наиболее типичные.

Обилие номограмм и диаграмм, помещенных в атласе и построенных с использованием прежде применявшихся систем единиц измерения, не позволили автору применить международную систему единиц измерения СИ, так как это было бы связано с огромной по трудоемкости работой по пересчету и перестройке помещенного в атласе графического материала.

Для того чтобы иметь возможность получить ответы в системе единиц СИ, в атласе приведена таблица с пересчетными коэффициентами (см. приложение).

I. Основные свойства газов

Кинематическая вязкость газов

На диаграмме 1 приведены значения кинематической вязкости газов [1, 2] при различных температурах по данным, приводимым в справочных таблицах.

Пример 1. Чему равна кинематическая вязкость при 800°C топочных газов, полученных при сжигании каменного угля? По диаграмме 1 находим, что для этих условий $\nu = 127 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$.

Кинематическая вязкость смеси газов обычно рассчитывается по формуле [3]:

$$\frac{1}{\nu_{\text{см}}} = \frac{m_1}{\nu_1} + \frac{m_2}{\nu_2} + \frac{m_3}{\nu_3} + \dots, \quad (1)$$

где

$\nu_1, \nu_2, \nu_3 \dots \nu_{\text{см}}$ — кинематическая вязкость компонентов и смеси;

$m_1, m_2, m_3 \dots$ — объемные доли компонентов в смеси.

Значение $\nu_{\text{см}}$ удобно находить по номограмме 2, где на левой шкале нанесены значения кинематической вязкости компонентов и смеси, на средней шкале — объемные доли компонентов и на правой шкале — значения величин $\frac{m}{\nu}$. Порядок пользования этой номограммой легко понять из цифрового примера.

Пример 2. Чему равна кинематическая вязкость смеси двух газов, если концентрация одного компонента 20% и кинематическая вязкость при рассматриваемых условиях равна $160 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$, а кинематическая вязкость другого компонента $110 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$? Проводим прямую линию через точки, соответствующие $\nu_1 = 160 \times 10^{-6}$ и $m = 20\%$, и на правой шкале делаем отсчет $1,25 \cdot 10^5$.

Проводим прямую линию через точки, соответствующие $\nu_2 = 110 \cdot 10^{-6}$ и $m = 80\%$, и делаем на правой шкале отсчет $7,2 \cdot 10^5$. Складываем полученные величины, получаем $8,45 \cdot 10^5$, эту величину находим на правой шкале и проводим прямую через эту точку и точку, соответствующую $m = 100\%$, на левой шкале находим значение кинематической вязкости смеси $\nu_{\text{см}} = 118 \cdot 10^{-6}$.

Динамическая вязкость газов

Значения динамической вязкости газов [2] в сантипуазах для различных газов даны на номограмме 3.

Для определения динамической вязкости газа при заданной температуре нужно провести прямую линию через точки, соответствующие

данному газу и заданной температуре. На пересечении этой прямой со шкалой вязкости лежит искомое значение.

Пример 3. Вязкость хлора при 250°C равна $0,0225 \text{ снз}$. Для пересчета в единицы системы СИ следует пользоваться следующими зависимостями:

$$1 \text{ снз} = 0,1 \text{ н} \cdot \text{сек} / \text{м}^2;$$

а в другие системы:

$$1 \text{ снз} = 1 \text{ г} / (\text{см} \cdot \text{сек}) = 0,0102 (\text{кг} \cdot \text{сек}) / \text{м}^2.$$

Плотность газа

Плотность газа ρ_t при рабочих условиях, температуре t и давлении $(B \pm p)$ мм рт. ст. выражается следующей формулой:

$$\rho_t = \frac{\rho_0 273 (B \pm p)}{(273 + t) 760} \text{ кг} / \text{м}^3, \quad (2)$$

где ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях ($t = 0$; $B = 760$ мм рт. ст.), $\text{кг} / \text{м}^3$;

B — барометрическое давление, мм рт. ст.;

P — давление или разряжение в аппарате (газоходе) мм рт. ст.

На основании формулы (2) построена номограмма 4, по которой легко найти значение ρ_t , зная ρ_0 , t и $(B \pm p)$, или любую из этих величин, если известны три другие.

Пример 4. Какова плотность газа при $t = 175^{\circ}\text{C}$ и $(B \pm p) = 730$ мм рт. ст., если при нормальных условиях $\rho_0 = 1,27 \text{ кг} / \text{м}^3$? По номограмме, проводя стрелки от $\rho_0 = 1,27 \text{ кг} / \text{м}^3$ до линии, соответствующей $t = 175^{\circ}\text{C}$, и далее до линии соответствующей $B \pm p = 730$ мм рт. ст., находим значение $\rho_t = 0,745 \text{ кг} / \text{м}^3$.

Пример 5. Плотность газа при нормальных условиях $\rho_0 = 1,4 \text{ кг} / \text{м}^3$. При какой температуре плотность газа будет равна $0,9 \text{ кг} / \text{м}^3$ при давлении 750 мм рт. ст.?

Проведем стрелки от значения $\rho_t = 0,9$ до линии давления 750 мм рт. ст. и далее горизонталь до пересечения с вертикалью, восстановленной в точке, соответствующей $\rho_0 = 1,4$. Точка пересечения лежит на линии, соответствующей $t \approx 147^{\circ}\text{C}$.

Пример 6. Плотность газа при 500°C и давлении $B \pm p = 760$ мм рт. ст. равна $0,475 \text{ кг} / \text{м}^3$. Какова плотность этого газа при температуре 250°C и давлении $(B \pm p) = 730$ мм рт. ст.?

На номограмме проводим стрелки от $\rho_t = 0,475$ до линии, соответствующей $B \pm p = 730$ мм рт. ст., и далее до линии 500°C ; от найденной точки пересечения проводим вертикаль до линии 250°C и от новой точки пересечения проводим стрелки в обратном направлении до линии $(B \pm p) = 730$ мм рт. ст. до встречи со шкалой, на которой находим значение $\rho_t = 0,675 \text{ кг} / \text{м}^3$.

Плотность газа, состоящего из нескольких компонентов, при нормальных условиях

Номограмма 5 служит для определения плотности газа, состоящего из нескольких компонентов. Для определения ее на оси y находят массы компонентов в 1 м^3 газовой смеси, соответствующие содержанию каждого компонента, и складывают их.

Шкалы даны в двух масштабах, что повышает точность отсчета.

Пример 7. Какую плотность при нормальных условиях имеет газ, состоящий из 70% хлора и 30% воздуха? По номограмме 5 находим $\rho_0 = 2,25 + 0,39 = 2,64 \text{ кг} / \text{м}^3$.

Пример 8. Какую плотность при нормальных условиях имеют дымовые газы, содержащие 82% N_2 , 10% CO_2 , 6% O_2 и 2% H_2O ?

По номограмме находим $\rho_0 = 1,02 + 0,198 + 0,086 + 0,016 \approx 1,32 \text{ кг/м}^3$.

В тех случаях, когда на номограмме нет нужного компонента, его легко нанести, соединив прямой линией начало координат со значением молекулярной массы данного компонента, отмеченным на правой вертикальной шкале.

Плотность влажного газа, приведенная к нормальным условиям

В расчетах, связанных с влажными газами, часто требуется знать плотность влажного газа, приведенного к 0°C и давлению 760 мм рт. ст.

Приведем рассуждения для 1 кг сухого газа, плотность которого при нормальных условиях равна $\rho_{\text{сух}}$. Обозначим влагосодержание газа через x кг/кг сухого газа.

Общая масса влажного газа равна $(1 + x)$ кг, а объем его при нормальных условиях $\frac{1}{\rho_{\text{сух}}} + \frac{x}{0,804}$. Следовательно, плотность влажного газа при нормальных условиях будет равна

$$\rho_0 = \frac{1 + x}{\frac{1}{\rho_{\text{сух}}} + \frac{x}{0,804}}. \quad (1)$$

Влагосодержание x можно рассчитать по формуле

$$x = \frac{18}{M} \frac{\varphi p}{(B - \varphi p)}, \quad (2)$$

где M — молекулярная масса газа, равная $22,4 \nu_0$ сух;

φ — относительная влажность газа, %;

B — барометрическое давление, мм рт. ст.;

p — упругость насыщенных паров воды при данной температуре t , $^\circ\text{C}$, мм рт. ст.

Подставляя это значение x в формулу (1), после преобразований получим

$$\rho_0 = \rho_{\text{сух}} - \frac{\varphi p}{B} (\rho_{\text{сух}} - 0,804) \text{ кг/м}^3.$$

На основании этой формулы построена номограмма 6.

Пример 9. Дымовые газы имеют температуру 55°C и относительную влажность 80%.

Какую плотность, приведенную к 0°C и 760 мм рт. ст., имеют эти газы, если в сухом состоянии и давлении 760 мм рт. ст. их плотность равна $1,35 \text{ кг/м}^3$?

По номограмме 6 находим (двигаясь по стрелкам), что для этого случая $\rho_0 = 1,284 \text{ кг/м}^3$.

Этой же номограммой можно пользоваться для нахождения плотности влажных газов, приведенных к 0°C и давлению 760 мм рт. ст., когда неизвестна температура газов, а содержание влаги дано как парциальное давление водяных паров в этом газе. В этом случае на оси ординат находят заданное значение парциального давления и от него двигаются по стрелкам так, как это показано пунктиром на номограмме 6.

Пример 10. Чему равна плотность влажных газов при нормальных условиях, если парциальное давление водяных паров 200 мм рт. ст., плотность сухих газов при нормальных условиях $1,2 \text{ кг/м}^3$, а барометрическое давление 700 мм рт. ст.? По номограмме находим $\rho_0 = 1,086 \text{ кг/м}^3$.

Плотность влажного воздуха

Номограмма 7 построена по данным Левинсона [4]. Способ определения плотности влажного воздуха с помощью номограммы понятен из приводимого примера.

Пример 11. Требуется найти плотность воздуха при рабочих условиях: температуре 90°C , давлении 640 мм рт. ст., относительной влажности 80%. Двигаясь по стрелкам, находим $\rho_1 = 0,618 \text{ кг/м}^3$.

Пользуясь номограммами 6 и 7, можно решать и некоторые другие задачи для влажного воздуха.

Пример 12. Чему равна плотность воздуха при давлении в газоходке 600 мм рт. ст., температуре, равной 70°C , и парциальном давлении водяных паров 150 мм рт. ст.?

По правой части номограммы 6 находим, что при $p_{\text{H}_2\text{O}} = 150 \text{ мм рт. ст.}$ и 70°C относительная влажность воздуха $\varphi = 64,5\%$.

По номограмме 7 находим, что для заданных условий $\rho = 0,74 \text{ кг/м}^3$.

Пример 13. По характеристике вентилятора при выбранном числе оборотов суммарное давление $H = 250 \text{ мм вод. ст.}$ на воздухе с плотностью $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Требуется определить, какое давление H будет создавать этот вентилятор, если в нем будет воздух при $t = 55^\circ \text{C}$, насыщенный на 80%. Барометрическое давление в обоих случаях 760 мм рт. ст.?

По номограмме 7 находим, что для заданных условий $\rho_1 = 1,025 \text{ кг/м}^3$, следовательно, $H = \frac{250 \cdot 1,025}{1,20} \approx 213 \text{ мм вод. ст.}$

Состав дымовых газов и коэффициент избытка воздуха при полном сжигании топлива

На номограмме 8 приведены зависимости между концентрацией RO_2 в дымовых газах (по химическому газоанализатору типа Орса), коэффициентом избытка воздуха α и концентрацией O_2 для различных видов топлива [5].

Пример 14. При сжигании природного газа найдено в дымовых газах содержание $\text{RO}_2 = 9,5\%$ (химическим газоанализатором), требуется найти значение коэффициента избытка воздуха и содержание O_2 в дымовых газах при условии полного горения.

По правой части номограммы находим, что при $\text{RO}_2 = 9,5\%$ значение $\alpha \approx 1,2$.

По левой части номограммы находим, что при $\alpha = 1,2$ концентрация $\text{O}_2 \approx 3,2\%$ (объемн.).

Пример 15. Какой будет состав газа при полном сжигании влажного бурого угля, если $\alpha \approx 1,4$?

По номограмме для бурого угля при $\alpha = 1,4$ находим значения $\text{RO}_2 = 13,2\%$ (объемн.) (по правой части номограммы) и концентрацию O_2 равную примерно 6% (объемн.).

Расход воздуха и объем дымовых газов при сжигании топлива [5]

Эти величины представляют большой интерес при процессах сжигания топлива в топках и металлургических процессах в печах различных типов — трубчатых, шахтных и др. Обычно концентрация RO_2

(сумма CO_2 и SiO_2) в газе замеряется при помощи газоанализаторов типа Орса (газ с влажностью, отвечающей равновесию над водой при комнатной температуре).

На диаграмме 9, а приведены данные о расходе воздуха для полного горения топлива на каждые 1000 ккал выделенного тепла, а на диаграмме 9, б — о расходе воздуха для полного горения 1 кг топлива или 1 м³ газового топлива.

На диаграмме 10 даны объемы дымовых газов, получаемых при сжигании 1 кг топлива (или 1 м³ газового топлива), приведенные к 0° С и 760 мм рт. ст.

На диаграмме 11 даны плотности получаемых дымовых газов при 0° С и 760 мм рт. ст.

В металлургических процессах, в которых кислород воздуха расходуется в основном на взаимодействие с твердой фазой (с шихтой), этими диаграммами пользоваться не следует, для некоторых таких случаев существуют специальные диаграммы.

Для металлургических процессов, где, кроме кислорода воздуха, в реакциях горения топлива участвует так называемый твердый кислород шихты, например кислород окислов металлов, данные диаграммы можно использовать только как ориентировочные, так как поправка может составлять несколько процентов.

Пример 16. Дымовые газы, получаемые при сжигании мазута во вращающейся печи, содержат на выходе из топки $\text{RO}_2 = 10,2\%$ (объемн.), а после хвостового вентилятора 6,1% (объемн.). В час сжигается 80 кг мазута. Требуется определить: 1) расход воздуха в топке; 2) величину подсоса воздуха; 3) объем дымовых газов, проходящих через печь (поступающих из топки в печь) и вентилятор; 4) плотность газов, проходящих через вентилятор, приведенную к 0° С и 760 мм рт. ст.

По диаграмме 8 находим, что на выходе из топки $\alpha = 1,5$, а после вентилятора $\alpha = 2,5$.

По диаграмме 9, б находим, что расход воздуха на горение 1 кг мазута в топке при $\alpha = 1,5$ составляет 16,5 м³, а при $\alpha = 2,5$ — 27,5 м³, т. е. подсос воздуха составляет (27,5—16,5) 80 = 880 м³/ч.

По диаграмме 10 находим, что объем дымовых газов, поступающих из топки в печь, составляет 17,1 м³ на 1 кг мазута, или в час $17,1 \cdot 80 \approx 1370$ м³, а в вентиляторе 28,1 м³ на 1 кг мазута, или в час $28,1 \cdot 80 = 2250$ м³.

По диаграмме 11 находим, что плотность дымовых газов, проходящих через вентилятор (приведенная к 0° С и 760 мм рт. ст.), при $\alpha = 2,5$ составляет 1,297 кг/м³.

Состав дымовых газов при неполном сжигании топлива

Состав дымовых газов представляет интерес для многих металлургических процессов. Наиболее часто необходимо знать соотношение между содержанием CO_2 , O_2 и CO . Анализы на эти компоненты проводятся при помощи различных газоанализаторов. При этом иногда довольствуются определением только CO_2 и одного из двух других компонентов. Желательно поэтому иметь простой способ для определения содержания третьего компонента.

В тех случаях, когда делается анализ на все три компонента, желательно иметь метод проверки их.

Эти вопросы можно решить с помощью номограммы 12, которой можно пользоваться в случае, если: а) в продуктах горения отсутствуют H_2 и CH_4 ; б) в шихте отсутствуют карбонаты; в) можно пренебречь участием в горении так называемого твердого кислорода, т. е. кислорода, находящегося в окисных соединениях шихты.

Предлагаемая номограмма 12 построена на основании следующей формулы [6]:

$$R O_2 (1 + \beta) + O_2 + CO (0,6 + \beta) = 21,$$

где RO_2 — сумма концентраций $CO_2 + SO_2$, %;
 O_2 — концентрация O_2 , %;
 CO — концентрация CO , %;
 β — характеристика топлива [7].

$$\beta = 2,37 \cdot \frac{H^D - 0,426 (O^D - 0,302 N^D)}{C^D - C_{м. н} + 0,368 S_D^D} + 0,005,$$

где $C_{м. н}$ — процент механического недожога углерода;
 H^D ; C^D ; O^D — концентрации водорода, углерода и кислорода в рабочем топливе, %;

S_D^D — концентрация летучей серы в рабочем топливе, %.

Порядок определения по номограмме следующий (показан на номограмме стрелками). На левой вертикальной оси находят точку, соответствующую заданному значению RO_2 , от нее проводят горизонталь до пересечения с линией, отвечающей значению β для данного топлива. От точки пересечения проводят вертикаль до пересечения со стрелкой, идущей от заданного значения CO и точки пересечения с линией β в верхней части номограммы. Значение искомой концентрации O_2 определяется по положению точки пересечения двух стрелок.

Пример 17. Требуется найти концентрацию кислорода в дымовом газе, полученном при сжигании жирного длиннопламенного угля ($\beta = 0,125$), если известно, что концентрация $RO_2 = 12\%$ и $CO = 2,5\%$. Находим по номограмме 12 концентрацию $O_2 \approx 5,7\%$ (экстраполяцией).

Пример 18. Требуется найти концентрацию CO в дымовых газах, получаемых при сжигании мазута ($\beta = 0,35$), если определено $RO_2 = 9\%$ и $O_2 = 5\%$.

На шкале от точки $RO_2 = 9\%$ проводим горизонталь до пересечения с линией, соответствующей значению $\beta = 0,35$; от точки пересечения проводим вертикаль до пересечения с наклонной линией, соответствующей значению $O_2 = 5\%$. От точки пересечения проводим горизонталь до линии, соответствующей $\beta = 0,35$. Абсцисса этой точки дает значение искомой концентрации $CO = 4\%$.

Аналогично производят проверку результатов газового анализа. В тех случаях, когда на номограмме 12 нет линий, соответствующих значению β для какого-либо топлива, следует нанести дополнительные линии, пользуясь следующими формулами:

для нижней части номограммы

$$x = R O_2 (1 + \beta),$$

для верхней части номограммы

$$y = CO (0,6 + \beta).$$

Покажем это на примере. Предположим, требуется провести линии, соответствующие значению $\beta = 0,35$. Находим при $RO_2 = 0$ $x = 0$, и при $RO_2 = 10\%$ $x_{10} = 10 (1 + 0,35) = 13,5\%$.

Через соответствующие точки с координатами $(0; 0)$ и $(10; 13,5)$ проводим прямую линию в нижней части номограммы.

Для верхней части номограммы находим при $CO = 0$ $y_0 = 0$ и при $CO = 10\%$ $y_{10} = 10 (0,6 + 0,35) = 9,5\%$.

Через точки с координатами (0; 0) и (10; 9,5) проводим прямую линию, отвечающую $\beta = 0,35$.

Для удобства приводим значения величины β для некоторых видов топлива [7].

Пример 19. Какая концентрация O_2 в дымовых газах, полученных при сжигании ангреского бурого угля, если содержание $RO_2 = 15\%$, а $CO = 1,5\%$?

По таблице находим, что для ангреского бурого угля $\beta \approx 0,05$. Затем по номограмме 12 для заданных условий находим $O_2 \approx 4,3\%$.

| Вид топлива, марка | Значение β | Вид топлива, марка | Значение β |
|----------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| Донецкий уголь: | | Кизеловский паровичный жир- | |
| длиннопламенный Д | 0,121 | ный уголь ПЖ | 0,143 |
| газовый Г | 0,127 | Богословский бурый уголь | 0,052 |
| паровичный жирный ПЖ | 0,123 | Челябинский бурый уголь | 0,092 |
| коксовый К | 0,117 | Егоршинский антрацит | 0,08 |
| тощий Т | 0,104 | Чаремковский длиннопламен- | |
| антрацит АС | 0,041 | ный уголь | 0,124 |
| антрацит, плита АП. АК | 0,051 | Ангреский бурый уголь | 0,051 |
| антрацит АШ | 0,043 | Подмосковный уголь | 0,084 |
| Кузнецкий уголь: | | Коксовая мелочь 15—25 | 0,009 |
| паровичный спекающийся | | Коксовая мелочь 0—15 | 0,043 |
| ПС | 0,107 | Торф кусковой | 0,077 |
| длиннопламенный Д | 0,12 | Дрова | 0,035 |
| газовый Г | 0,14 | Сланец кашпирский | 0,21 |
| паровичный жирный ПЖ | 0,115 | Мазут | 0,28—0,35 |
| Карагадинский уголь: | | Природный газ | 0,01 |
| каменный ПЖ, ПС | 0,125 | | |
| бурый рядовой БР | 0,083 | | |

Объем и состав газов, получаемых при сжигании сульфидных руд

Диаграмма 13 дает зависимость объема газа, получаемого при сжигании 1 кг сульфидного материала, от концентрации $SO_2 + SO_3$ в газе и количества сгорающей серы (в %), а диаграмма 14 дает зависимость между концентрацией в газах $SO_2 + SO_3$ и O_2 .

Пример 20. Какой объем газа получается при сгорании пиритного концентрата, если концентрация $SO_2 + SO_3$ в газе 5,5%, а количество сгорающей серы равно 43% от веса исходного сырья? Какая концентрация O_2 в получаемом газе?

По диаграмме 13 находим, что для заданных условий объем газов $V_0 \approx 5,5 \text{ м}^3$, а по диаграмме 14 определяем, что в полученном газе будет содержаться O_2 13,9% (объемн.).

Концентрация газовой примеси и процент ее в газе

Концентрация газового компонента обычно выражается в объемных процентах, $г/м^3$ ($мг/л$), или парциальным давлением ($мм \text{ рт. ст.}$). Пересчеты от одного значения к другому производят по формуле

$$C = \frac{1000 \cdot nM}{100 \cdot 22,4} = 0,446 nM \text{ г/м}^3 (\text{мг/л}), \quad (1)$$

где M — молекулярная масса газовой примеси;

n — концентрация в % (объемн.).

Кроме того, 1% (объемн.) = 7,6 мм рт. ст. (при барометрическом давлении 760 мм рт. ст.). Следовательно,

$$C = 0,05868 pM \text{ г/м}^3 (\text{мл/л}), \quad (2)$$

где p — парциальное давление газовой примеси, мм рт. ст.

Диаграмма 15 дает зависимость между концентрацией, выраженной в г/м^3 (мг/г), % (объемн.), парциальным давлением p и молекулярной массой M . Следует заметить, что, изменяя концентрацию в % (объемн.) или парциальные давления p в 10^n раз, соответственно изменяют и значения C . Сплошными линиями даны значения концентраций в % (объемн.), пунктирными — парциальные давления в мм рт. ст.

Пример 21. Чему равна концентрация хлора в газе, выраженная в г/м^3 , если его концентрация в объемных процентах 0,02?

По диаграмме 15 находим, что при $M = 71$ и концентрации 0,2% (объемн.) $C = 6,3 \text{ г/м}^3$, следовательно, искомая концентрация при 0,02% (объемн.) равна $0,63 \text{ г/м}^3$.

Пример 22. Парциальное давление углекислого газа 70 мм рт. ст., чему равна концентрация этого газа, выраженная в г/м^3 ? Для углекислого газа $M = 44$, по диаграмме находим $C = 10 \cdot 18 = 180 \text{ г/м}^3$.

II. ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Энтальпия газов

При различных тепловых расчетах, связанных с газами, часто требуется знать энтальпию (теплосодержание) газов. Обычно эти величины даются в справочных таблицах [5, 6]. Рассчитать энтальпию газов можно по формуле

$$I = mct \text{ ккал}, \quad (1)$$

где m — масса газа;

c — средняя его теплоемкость в интервалах температур от 0 до t .

Когда имеют дело с газами, то удобнее все расчеты вести не на массу газа, а на его объем, приведенный к нормальным условиям:

$$I = V_0 c' t \text{ ккал}, \quad (2)$$

где V_0 — объем газа, приведенный к 0° С и 760 мм рт. ст., м³;

c' — средняя теплоемкость 1 м³ газа;

t — температура газа.

Заметим, что

$$m = V_0 \rho_0 \approx \frac{V_0 M}{22,4}, \quad (3)$$

где ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях, кг/м³;

M — молекулярная масса газа.

При расчете энтальпии по формулам (1) или (2) по справочным таблицам нужно найти среднее значение теплоемкости. Более просто значение энтальпии 1 м³ газа можно найти по диаграмме 16. На этой диаграмме даны на оси ординат значения величины $c' \cdot t$ для различных газов [5]. Порядок пользования этой диаграммой показан на примерах.

Пример 23. Определить энтальпию 8000 нм³ газа при 1200° С, если состав его следующий: 10% CO₂; 5% H₂O и остальное, по составу близкое к воздуху (алот, кислород).

По диаграмме 16а находим энтальпии 1 нм³ газов при 1200° С: CO₂ 653; H₂O 501 и воздуха 441 ккал/(м³ · град): $I = 8000 (0,1 \cdot 653 + 0,05 \cdot 501 + 0,85 \cdot 441) = - 3520\ 000$ ккал.

Пример 24. В теплообменнике (рекуператоре) 800 м³/ч природного газа нагревают за счет тепла, отнимаемого от дымовых газов, которые при этом охлаждаются с 500 до 300° С. Объем дымовых газов 1050 м³/ч. До какой температуры будет нагрет природный газ, если начальная его температура 20° С и тепловые потери в окружающую среду составляют 5% от начальной энтальпии дымовых газов?

По диаграмме 16б находим энтальпию 1 м³ дымовых газов при 500 и 300° С; при 500° С она равна 165 ккал/м³, а при 300° С 100 ккал/м³.

С учетом 5% потери количество тепла, которое будет передано природному газу за 1 ч, будет равно $1050 (0,95 \cdot 165 - 100) = 60\,000$ ккал/ч.

По диаграмме находим, что энтальпия 1 м³ природного газа при 20 С составляет около 7 ккал/м³.

Энтальпия 1 м³ коксового газа после нагрева будет равна: $7 + \frac{60000}{800} \approx 7 + 75 = 82$ ккал/м³. По диаграмме находим, что такая энтальпия будет соответствовать температуре ≈ 220 С.

Обозначив через i_B энтальпию 1 м³ нормального воздуха, а через $i_{\alpha=1}$ энтальпию 1 м³ нормального дымового газа, получаемого при $\alpha = 1$, энтальпия 1 м³ дымовых газов, получаемых при $\alpha \neq 1$, будет равна:

$$i = \frac{1}{\alpha} i_{\alpha=1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) i_B + \frac{(i_{\alpha=1} - i_B)}{\alpha}.$$

Пример 25. Найти энтальпию дымовых газов при 600° С, полученных при сжигании каменного угля с $\alpha = 2,5$.

По диаграммам 16 б находим при 600° С $i_{\alpha=1} = 207$; по диаграмме 16 а $i_B = 195$, поэтому

$$i_{\alpha=2,5} \approx 195 + \frac{207 - 195}{2,5} = 195 + 5 = 200 \text{ ккал/м}^3.$$

Точка росы газов, содержащих пары H₂O и SO₃

Диаграмма для определения точки росы газов, содержащих пары H₂O и SO₃, построена по данным А. И. Барановой [8]. Используя эти данные, можно составить формулу зависимости этих величин

$$t_p = 186 + 20 \lg H_2O + 26 \lg SO_3,$$

где H_2O и SO_3 — содержание H₂O и SO₃ в % (объемн.) в газе, подвергнутом охлаждению.

По этой формуле построена номограмма 17. Порядок пользования ею очень прост, покажем его на цифровом примере.

Пример 26. Парциальное давление водяных паров в газе 38 мм рт. ст. Концентрация SO₃ в газе составляет 1,1 г/м³ газа. Требуется найти точку росы; при этом известно, что давление в аппарате близко к 760 мм рт. ст.

Находим, что парциальному давлению $p_{H_2O} = 38$ мм рт. ст. соответствует концентрация водяных паров $\frac{38 \cdot 100}{760} = 5\%$ (объемн.).

Концентрация 1,1 г/м³ соответствует $\frac{1,1 \cdot 22,4 \cdot 100}{80 \cdot 1000} \approx 0,031\%$ (объемн.), на оси абсцисс номограммы 17 находим точку, отвечающую $p_{SO_3} = 0,031\%$ (объемн.), через эту точку проводим вертикаль до пересечения со сплошной линией, отвечающей значению $p_{H_2O} = 5\%$ (объемн.) в точке а; на оси у находим значение ординаты точки а, это и будет значение точки росы — 160,5° С. Для определения концентрации кислоты от точки а проводим горизонталь до пересечения с пунктирной линией, отвечающей значению концентрации паров воды 5% (объемн.) в точке б. От точки б проводим вертикаль вверх, где дана шкала концентрации конденсата, для данного случая она приблизительно равна 90,1%.

Пример 27. В дымовых газах содержится 0,01% (объемн.) SO₃ и 5% (объемн.) водяных паров. Как изменится точка росы, если влажность газов возрастет до 10% (объемн.)?

По номограмме 17 находим, что при влажности 5% (объемн.) точка росы составляет около 148° С, а при влажности 10% — около 154° С.

Точка росы газов, содержащих пары воды, HCl и HF

Диаграммы для HCl и HF построены по таблицам, приведенным в литературе [3]. Порядок пользования диаграммами 18 и 19 показан стрелками на примерах.

Пример 28. Требуется найти температуру конденсации и концентрацию конденсата, если в газе парциальное давление водяных паров $p_{\text{H}_2\text{O}} = 40$ мм рт. ст., а $p_{\text{HCl}} = 20$ мм рт. ст. На оси ординат от точки $p_{\text{H}_2\text{O}} = 40$ проводим горизонталь до пересечения в точке *a* с кривой, соответствующей $p_{\text{HCl}} = 20$; абсцисса этой точки дает значение температуры конденсации $\approx 50^\circ \text{C}$. Продолжим вертикаль от точки *a* до точки *b* пересечения с кривой, соответствующей $p_{\text{HCl}} = 20$ мм рт. ст. в верхней части диаграммы.

Значение ординаты точки *b* дает значение концентрации конденсата 26,3%.

Пример 29. В газе парциальное давление $p_{\text{H}_2\text{O}} = 60$ мм рт. ст. и $p_{\text{HF}} = 5$ мм рт. ст. Требуется определить точку росы. По номограмме 19 находим, что при этих условиях точка росы $\sim 49^\circ \text{C}$ и начальная концентрация конденсата $\sim 24\%$.

Влажность воздуха в различных единицах

На номограмме 20 нанесены кривые, выражающие зависимость значений влажности воздуха, выраженной в различных единицах. На нижней оси абсцисс нанесены значения температуры, а на оси ординат — значения давления водяного пара при различной относительной влажности φ . Шкала давлений построена в логарифмическом масштабе. Кривые построены по справочным таблицам упругости водяного пара с учетом φ

$$\varphi = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{нас}}} \quad (1)$$

Найдя для заданных значений температуры и относительной влажности φ соответствующее значение $p_{\text{H}_2\text{O}}$, легко найти влагосодержание в граммах на нормальный кубический метр влажного воздуха f' , так как

$$f' = \frac{804}{760} p_{\text{H}_2\text{O}} = 1,06 p_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2)$$

На верхней оси абсцисс нанесены значения влагосодержания, выраженного в г сухого воздуха при общем давлении 700, 760 и 800 мм рт. ст. Для нахождения значения x по данному значению $p_{\text{H}_2\text{O}}$ служат кривые $x = \varphi(p)$, построенные на основании известной зависимости

$$x = 622 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{общ}} - p_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (3)$$

Кроме того, на номограмме 20 нанесены линии постоянного значения влажности, выраженной в граммах на 1 м³ влажного воздуха при данной температуре. Линии f'' построены на основании следующих предположений.

1 кг сухого воздуха и x г водяного пара при нормальных условиях занимают объем, равный $\left(\frac{1}{1,293} + \frac{x}{804}\right)$ м³, а при температуре $t^\circ \text{C}$ и давлении P их объем будет равен $\left(\frac{1}{1,293} + \frac{x}{804}\right) \cdot \frac{(273+t)760}{273 \cdot P}$, следовательно,

$$f'' = \frac{x}{\left(\frac{1}{1,293} + \frac{x}{804}\right) \cdot \frac{(273+t)760}{273 \cdot P}} \text{ г. м}^3 \text{ вл.}$$

но

$$\frac{x}{\left(\frac{1}{1,293} + \frac{x}{804}\right)} = f'_H \text{ г/м}^3 \text{ вл.}$$

Таким образом,

$$f'' = \frac{273 P}{(273 + t) 760} \cdot f'_H.$$

Однако $f'_H = 1,06 P_{H_2O}$, подставим это значение и учитывая, что $P = 760$, получим

$$f'' = \frac{273 \cdot 1,06 \cdot P_{H_2O}}{273 + t} \approx 290 \frac{P_{H_2O}}{273 + t}. \quad (4)$$

По этой формуле и построены кривые для f'' по шкалам t и p .

Таким образом, на номограмме 20 нанесены следующие зависимости:

- 1) $p = \psi(t, \varphi)$, по которой можно определить любой из этих трех параметров, зная две другие;
- 2) $x = f(p, B)$, по которым, зная x и B , можно найти p , или наоборот, зная p и B , найти x ;
- 3) $f'' = f(p, t)$.

Кроме того, комбинируя эти зависимости, можно графически связать между собой величины t , φ , p , x , f' , f'' . Покажем это на цифровых примерах.

Пример 30. Атмосферный воздух при температуре 20°C имеет парциальное давление водяных паров 14 мм рт. ст. . Требуется определить, чему равна относительная влажность и влагосодержание, выраженное в г/кг сухого воздуха при барометрическом давлении 760 мм рт. ст. ? По номограмме 20 находим, что для данных условий $\varphi = 80\%$, а $x \approx 11,7 \text{ г/кг}$.

Пример 31. Чему равно влагосодержание воздуха при температуре 30°C , если $\varphi = 60\%$ и $B = 760 \text{ мм рт. ст.}$?

По номограмме 20 находим, что $x = 16 \text{ г/кг}$ сухого воздуха, а парциальное давление водяных паров $p = 19,2 \text{ мм рт. ст.}$

Пример 32. При общем давлении 760 мм рт. ст. , температуре 30°C влагосодержание, отнесенное к 1 м^3 газа, составляет $f'' = 15 \text{ г/м}^3$ влажного воздуха.

Какое парциальное давление водяных паров, влагосодержание, выраженное в г/кг сухого воздуха, и какая относительная влажность у этого воздуха?

По номограмме 20 находим, что при заданных условиях $\varphi = 49\%$, $P_{H_2O} = 15,6 \text{ мм рт. ст.}$, $x \approx 13 \text{ г/кг}$ сухого воздуха.

Влагосодержание и энтальпия воздуха, $i-x$ -диаграмма

$i-x$ -диаграмма для воздуха (диаграмма 21) нашла большое применение в технике сушки.

Для некоторых процессов сушки, охлаждения воздуха и выпарки растворов воздухом более удобны номограммы 22 и 23, построенные на основании следующих формул:

$$i = 0,24 t + x(525 + 0,46 t), \quad (1)$$

$$x = 0,622 \frac{\varphi P_{\text{нас}}}{B - \varphi P_{\text{нас}}}, \quad (2)$$

где i — энтальпия (теплосодержание) влажного воздуха, ккал кг сухого воздуха;

x — влагосодержание, г/кг сухого воздуха;

t — температура воздуха, °С;
 $p_{\text{нас}}$ — парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре t °С, мм рт. ст.;
 B — барометрическое давление, мм рт. ст.;
 φ — относительная влажность воздуха, %.

На номограммах 22 и 23 на оси абсцисс отложены значения φ , на оси ординат — энтальпия (теплосодержание) i . Линии постоянных значений x и t даны кривыми, построенными следующим образом.

Барометрическое давление принято 760 мм рт. ст. Для каждой температуры и значения φ по формуле (2) рассчитаны значения x ($p_{\text{нас}}$ взято по справочным таблицам) и по формуле (1) — значения i .

Номограмма 22 дана для интервала температур 0—50° С, а номограмма 23 — для интервала температур 0—90° С. При помощи этих номограмм можно решать многие задачи. Покажем на примерах порядок пользования этими номограммами.

Пример 33. Атмосферный воздух при температуре 25° С имеет $\varphi = 50\%$. Требуется определить точку росы для этого случая.

На номограмме 22 находим точку, соответствующую заданным параметрам, т. е. точку пересечения наклонной линии, соответствующей $t = 25$ С и ординате, проведенной из точки $\varphi = 50\%$. Эта точка соответствует $x = 10$ г/кг сухого воздуха, двигаясь по линии постоянной энтальпии до пересечения с ординатой $\varphi = 100\%$, находим, что точка росы для данного случая равна $\approx 17,8$ ° С.

Пример 34. Требуется найти, при какой температуре воздух будет иметь относительную влажность $\approx 90\%$, если его влагосодержание 300 г/кг сухого воздуха.

По номограмме 23 находим точку пересечения линий, соответствующих $x = 300$ г/кг сухого воздуха и $\varphi = 90\%$. Эта точка лежит на линии, соответствующей $t \approx 73,5$ ° С (найдем интерполяцией).

Пример 35. Определить конечную температуру, полученную при смешении 1000 кг сухого воздуха с $x_1 = 20$ и $t = 30$ ° С и 2000 кг воздуха, имеющего $t = 55$ ° С и $x_2 = 80$.

По номограмме 22 находим, что при этих условиях $i_1 = 19,4$ и $i_2 = 62,8$ ккал/кг сухого воздуха.

Влагосодержание $x_{\text{см}} = \frac{1000 \cdot 20 + 2000 \cdot 80}{3000} = 60$ г/кг сухого воздуха, а энтальпия $i_{\text{см}} = \frac{1000 \cdot 19,4 + 2000 \cdot 62,8}{3000} = 48,4$ ккал/кг сухого воздуха. 1 ккал/кг = 4186,8 Дж/кг.

По номограмме 22 находим, что этим условиям соответствует $t \sim 48$ ° С, при этом значение $\varphi \approx 80\%$.

Пример 36. Требуется определить расход воздуха в градирне, в которой 50 м³/ч воды охлаждается с 50 до 30° С, если температура атмосферного воздуха $t_1 = 25$ ° С и относительная влажность $\varphi_1 = 35\%$, а температура воздуха, выходящего из градирни, $t_2 = 30$ ° С и $\varphi_2 = 90\%$.

Расход воздуха определяется по формуле

$$G = \frac{L_{\text{воды}} (t'_в - t''_в)}{(i_2 - i_1) - (x_2 - x_1) t_2} \text{ кг}^2/\text{ч}.$$

По номограмме 22 находим значения:

при $t = 30$ ° С и $\varphi = 90\%$ $i_2 = 22$ ккал/кг, $x_2 = 24$ г/кг;
 при $t = 25$ ° С и $\varphi = 35\%$ $i_1 = 10$ ккал/кг, $x_1 = 7$ г/кг.

$$G = \frac{50000 (50 - 30)}{(22 - 10) - \frac{(24 - 7) 30}{1000}} = 86300 \text{ кг}^2/\text{ч} \text{ сухого воздуха.}$$

Пример 37. Сушилка должна давать 500 кг готового продукта с влажностью 4% (от общего веса). Начальная влажность материала 45% (от общего веса). Для сушки применяется воздух, который имел относительную влажность 60% при температуре 20° С и был нагрет перед подачей в сушилку до 95° С.

Воздух выходит из сушилки при влажности $\varphi = 90\%$. Определить требуемый расход воздуха и тепла, принимая, что сушилка работает адиабатно, и пренебрегая расходом тепла на нагрев материала.

В готовом продукте содержится $500 \cdot 0,04 = 20$ кг влаги и 480 кг сухого вещества. Массу исходного материала определим из соотношения:

$$\frac{a}{480 + a} = 0,45,$$

где a — масса влаги в исходном материале, отсюда $a = 393$ кг.

Следовательно, в сушилке испаряется $393 - 20 = 373$ кг воды за час.

По номограмме 21 находим, что свежий воздух при $t = 20^\circ \text{C}$ и $\varphi = 60\%$ (точка A), содержание влаги — $\sim 8,7$ г/кг сухого воздуха и имел энтальпию ≈ 10 ккал/кг, после нагрева до 95° (идя по линии $x = \text{const}$ до точки B) его энтальпия возросла до $i = 28$ ккал/кг сухого воздуха. Двигаясь из начальной точки, соответствующей $t = 95^\circ \text{C}$ и $i_2 = 28$ по линии $i = \text{const}$ до $\varphi = 90\%$ (точка C), находим, что конечное влагосодержание (в выходящем газе) будет $x_2 = 32,8$ г/кг сухого воздуха. Следовательно, каждый килограмм сухого воздуха будет уносить влаги $32,8 - 8,7 = 24,1$ г.

Расход воздуха (сухого) составляет $\frac{373000}{24,1} \approx 15500$ кг. Расход тепла (без учета тепловых потерь и нагрева материала) $\approx 15500 (28 - 10) = 280000$ ккал/ч. Расход тепла на 1 кг испаряемой влаги $\frac{280000}{373} \approx 750$ ккал.

Пример 38. В каком соотношении нужно смешать воздух, имеющий $t = 65^\circ \text{C}$ и $\varphi = 30\%$ с воздухом $t_2 = 10^\circ \text{C}$ и $\varphi = 80\%$, чтобы получить смесь с температурой 50°C ? Какая будет у смеси относительная влажность?

На номограмме 22 находим точки, соответствующие начальным условиям, и соединим их прямой и замечаем место пересечения этой прямой с линией, соответствующей $t = 50^\circ \text{C}$. Эта точка пересечения дает значение искомого $\varphi = 45\%$. Измерим расстояние этой точки до точки, соответствующей $t = 65^\circ \text{C}$, $\varphi = 30\%$ и $t_2 = 10^\circ \text{C}$, $\varphi_2 = 80\%$. Эти расстояния относятся между собой как $\frac{1}{2,3}$. Следовательно, на 1 кг сухого холодного воздуха нужно прибавить 2,3 кг сухого теплого воздуха.

Проверим, найдем значения $i_{\text{см}}$ и $x_{\text{см}}$.

По номограмме 22 для $t = 65^\circ \text{C}$ и $\varphi = 30\%$ $i_1 = 47$ и $x_1 = 50$; для $t = 10^\circ \text{C}$ и $\varphi = 80\%$ $i_2 = 6,0$ и $x_2 = 6,1$.

$$i_{\text{см}} = \frac{2,3 \cdot 47 + 6,0}{3,3} \approx 34,5,$$

$$x_{\text{см}} = \frac{2,3 \cdot 50 + 6,1}{3,3} \approx 36,7$$

что приблизительно соответствует $t_{\text{см}} = 50^\circ \text{C}$ и $\varphi_{\text{см}} \approx 45\%$.

Максимальная температура жидкости и минимальная температура газа при непосредственном соприкосновении их. Температура мокрого термометра

При соприкосновении горячих газов с жидкостью последняя нагревается и частично испаряется. При отсутствии потерь в окружающую среду (адиабатные условия) жидкость может нагреться, а газ охладиться только до так называемой температуры мокрого термометра t_m .

Значение этой температуры определяется уравнением теплового баланса

$$ct_m + x_m i_m = ct_1 + x_1 i_1 + (x_m - x_1) t_m, \quad (4)$$

где c — теплоемкость газа, ккал/(кг · град);

x_m — влагосодержание газа, кг кг сухого при t_m ;

x_1 — то же, при t_1 ;

t_1 — начальная температура газа;

i_1 — энтальпия (теплосодержание) водяного пара при t , ккал/кг;

i_m — то же, при t_m , ккал/кг.

Непосредственно из этого уравнения значение t_m определить трудно, так как x_m и i_m являются функциями от t_m . Поэтому для нахождения значения t_m можно пользоваться $i-x$ -диаграммой или номограммой 24, правая часть которой дана для случая соприкосновения горячего газа с водой при условии, что общее давление равно 760 мм рт. ст.

В тех случаях, когда газ соприкасается не с водой, а с водным раствором, приходится вводить поправку на уменьшение давления водяных паров над растворами. По закону Рауля

$$\frac{p_0 - p}{p_0} = \frac{ni}{N + ni}, \quad (1)$$

откуда

$$\varphi_{\text{н}} = 1 - \frac{ni}{N + ni} = \frac{N}{N + ni}, \quad (2)$$

где p_0 — упругость пара чистого растворителя;

p — упругость пара растворителя над раствором;

n — число молекул растворенного вещества в литре раствора;

N — число молекул растворителя (воды) в литре раствора;

ni — число отдельных частиц, образовавшихся вследствие диссоциации;

$$i = \frac{ni}{n}.$$

Введем обозначения:

ρ — плотность раствора, г/л;

c — концентрация раствора, ‰;

m — молекулярная масса растворенного вещества.

В одном литре раствора, плотность которого ρ , содержится растворенного вещества $\frac{\rho c}{100}$ и воды $\left(\rho - \frac{\rho c}{100}\right)$ г, т. е. $ni = \frac{\rho c i}{100 \cdot m}$ и $N = \frac{\rho - \frac{\rho c}{100}}{18}$.

Таким образом,

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{1}{1 - \frac{18ci}{m(100-c)}} = 1 - \frac{1}{1 - \frac{m(100-c)}{18ci}}. \quad (3)$$

По этой формуле построена номограмма 25.

Зная $\varphi_{\text{н}}$, находим по диаграмме $i-x$ искомого значения температуры мокрого термометра, двигаясь в случае применения водных растворов от начальной точки по линии $t_m = \text{const}$ до линии φ , соответствующей $\varphi_{\text{н}}$.

Более просто значение t_m для водных растворов можно получить по номограмме 24.

Покажем на цифровых примерах порядок пользования этими номограммами.

Пример 39. Газ, имеющий температуру 700° С и влажность 100 г на нормальный кубический метр сухого, промывался в скруббере водой, которая без охлаждения циркулирует в замкнутом цикле. Требуется определить минимальную температуру, до которой в этой системе может охладиться газ, если процесс протекает адиабатически. По диаграмме 24 находим, что искомая температура равна 76° С.

Пример 40. Какую максимальную температуру может иметь 15‰-ный раствор КСl при непосредственном нагреве газом, имеющим температуру 500° С и влагосодержание 50 г/м³? Заметим, что молекулярная масса КСl — 74,5 и $i \approx 2$.

По номограмме 25 находим $\varphi_{\text{н}} \approx 92,2$, а по номограмме 24 находим искомую температуру, равную ≈ 69 С.

Заметим, что для чистой воды эта температура была бы 67,5° С.

При пользовании номограммой 25 следует помнить, что для концентрированных растворов закон Рауля точно не соблюдается и значение величины i становится менее

определенным, поэтому величина φ_n будет весьма приближенной, соответственно приближенным будет и значение искомой температуры.

Пример 41. 25%-ный раствор $MgCl_2$ нагревается за счет соприкосновения с горячими газами. Требуется определить, какой температуры должен быть газ, если известно его влагосодержание 50 г/м^3 сухого, а раствор требуется нагреть не менее чем до 75°C ?

Для заданного раствора $m = 95$; $i \approx 3$. По номограмме 25 находим $\varphi_y \approx 84$.

По номограмме 24 по заданным величинам находим, что температура газа должна быть не ниже $\approx 650^\circ \text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием

Коэффициент теплоотдачи во внешнее неограниченное пространство выражается формулой

$$\alpha_{\text{изл}} = 4,96 \varepsilon \frac{\left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2},$$

где ε — степень черноты,

T — температура, $^\circ\text{K}$.

Для большинства заводских печей и конструкций можно принять $\varepsilon \approx 0,85 - 0,9$, т. е. в среднем

$$\alpha_{\text{изл}} = 4,3 \frac{\left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}.$$

Значение $\alpha_{\text{изл}}$, подсчитанное по этой формуле для температуры наружной среды 0 и 20°C , приведено на диаграмме 26.

Коэффициент теплоотдачи от твердого тела окружающему воздуху при свободном его движении

Упрощенные формулы для этого коэффициента имеют следующий вид [3]:

а. Для горизонтальной поверхности, обращенной теплопередающей стороной вверх (крышка аппарата),

$$\alpha = 2,15 \sqrt[4]{\Delta t} \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}).$$

б. Для горизонтальной поверхности, обращенной теплоотдающей поверхностью вниз (днище аппарата),

$$\alpha = 1,13 \sqrt[4]{\Delta t} \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}).$$

в. Для вертикальной поверхности (стенки аппарата)

$$\alpha = 1,7 \sqrt[4]{\Delta t} \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}).$$

г. Для горизонтальной и вертикальной труб

$$\alpha = 0,925 \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{d}} \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}),$$

где Δt — разность температур стенки и окружающего воздуха, $^\circ\text{C}$;

d — диаметр трубы, м .

Номограмма, построенная по этим формулам, дана на рис. 27.

Пример 42. Требуется найти общий коэффициент теплоотдачи от горизонтальной крышки аппарата, имеющего температуру 420°C , в окружающую среду с температурой 20°C .

По диаграмме 26 находим, что коэффициент теплоотдачи лученспусканием в данном случае равен $24 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$.

По диаграмме 27 находим, что коэффициент теплоотдачи при свободном движении воздуха для данного случая равен $9,6 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$.

Общий коэффициент теплоотдачи от крышки в окружающую среду равен $24 + 9,6 = 33,6 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$.

Коэффициент теплоотдачи от движущегося газа к стенке газохода

Этот коэффициент для значения $Re > 10000$ определяется из соотношения [9]:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (1)$$

где Nu — критерий Нуссельта, $Nu = \frac{ad}{\lambda}$;

Re — критерий Рейнольдса, $Re = \frac{w d \rho}{\mu} = \frac{w d}{\nu}$;

Pr — критерий Прандтля, $Pr = \frac{c \mu g}{\lambda}$;

a — коэффициент теплоотдачи, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$;

d — диаметр трубы, м ;

λ — удельная теплопроводность газа, $(\text{ккал} \cdot \text{м})/(\text{м}^2 \text{сек} \cdot \text{град})$;

w — скорость газа, м сек ;

ρ — плотность газа, кг м^3 ;

μ — вязкость (динамическая) газа, $(\text{кг} \cdot \text{сек})/\text{м}^2$ или $\frac{\text{снз}}{100 \cdot 98,1}$;

ν — кинематическая вязкость газа, $\text{м}^2/\text{сек}$;

g — ускорение силы тяжести, принимаемое равным $9,81 \text{ м/сек}^2$;

c — удельная теплоемкость газа, $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.

Величины μ , ν , λ , c , ρ должны быть взяты для среднелогарифмической температуры.

Для воздуха и газов, по составу близких к нему, критерий $Pr \approx 0,72$ и мало меняется с изменением температуры, поэтому, подставив это значение, получим

$$\alpha = 0,02 \frac{\lambda}{d} Re^{0,8} = 0,02 \frac{\lambda w^{0,8}}{d^{0,8} \nu^{0,8}}. \quad (2)$$

Заметим, что λ и ν изменяются с температурой. По этой формуле построена номограмма 28.

Пример 43. Газ движется по трубе диаметром $0,5 \text{ м}$ со средней скоростью 16 м/сек . Средняя логарифмическая температура газа 500°C . По составу газ близок к воздуху. По номограмме 28 находим значение $\alpha = 18,8 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$.

Средняя логарифмическая

При расчетах тепло- и массопередачи требуется рассчитывать значения среднелогарифмических величин по формуле

$$x_{\text{ср. лог}} = \frac{a-b}{\ln \frac{a}{b}} = \frac{a-b}{2,3 \lg \frac{a}{b}}.$$

Для быстрого нахождения значения средней логарифмической величины очень удобна номограмма 29.

На левой и правой ветвях кривой откладывают значения исходных величин a и b и проводят через них прямую линию. Точка пересечения этой линии с осью y дает значение среднелогарифмической величины.

Заметим, что если обе исходные величины отличаются на один или несколько порядков от тех, которые нанесены на шкалы, то и ответ следует изменить на столько же порядков.

Пример 44. Требуется найти среднюю разность температур при охлаждении жидкости от 150 до 50°C , если, применяя противоток, другая жидкость нагревается от 30 до 75°C . Изобразим рассматриваемый процесс так:

$$\begin{array}{r} 150 \rightarrow 50 \\ 75 \leftarrow 30 \\ \hline 75 \quad 20 \end{array},$$

т. е. разность температур на одном конце аппарата равна 75°C , а на другом 20°C . По диаграмме находим, что средняя логарифмическая разность температур в этом случае равна $41,5^\circ\text{C}$.

Пример 45. Найти среднюю логарифмическую между величинами $0,045$ и $0,002$.

Таких величин на диаграмме 29 нет, поэтому увеличим обе величины в 1000 раз и соответственно результат (ответ) уменьшим во столько же раз. Проводя прямую линию между величинами 45 и 2 , взятыми на двух ветвях кривой, находим, что точка пересечения с осью y соответствует 14 . Следовательно, искомое среднее логарифмическое равно $0,014$.

III. ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ. ГАЗООЧИСТКА

Скорость витания пылевых частиц

Эта скорость имеет большое значение в вопросах осаждения пыли под влиянием силы тяжести в пневмотранспорте и процессах, связанных с псевдооживлением (кипящим слоем). В области размеров пылинки, для которой применим закон Стокса, скорость витания сферической частицы может быть определена по формуле [10, 11]

$$v = \frac{\delta^2 \rho}{18\eta} \text{ м/сек}, \quad (1)$$

где δ — диаметр частиц, м;

ρ — плотность частицы, г/см³, кг м⁻³;

η — вязкость газа, (кг · сек)/м².

Для воздуха

$$\eta = 1,75 \cdot 10^{-6} \left(\frac{273 + t}{273} \right)^{0,683}, \quad (2)$$

и, следовательно,

$$v = 1,45 \cdot 10^6 \frac{\delta^2 \rho}{T^{0,683}} \text{ м/сек}. \quad (3)$$

По этой формуле построена номограмма 30.

Пример 46. Определить скорость витания сферической пылинки диаметром 10 мк и плотностью 5 г/см³ при температуре воздуха 227° С.

Проводим прямую линию между точками, соответствующими $\sigma = 10$ мк и $\rho = 5,0$ г/см³. Заметим на вспомогательной шкале точку пересечения этой прямой. Через эту точку на вспомогательной шкале и точку, соответствующую $T = 273 + 227 = 500^\circ \text{ К}$, проводим прямую и на шкале скоростей находим значение скорости витания $v = 1,1$ см/сек.

Пример 47. Какого диаметра капли воды будут уноситься воздухом, имеющим температуру 27° С и скорость 0,1 м/сек? Принимаем капли сферическими и плотностью 1000 кг м⁻³.

Проводим прямую линию между точками, соответствующими $T = 27^\circ \text{ С} = 273^\circ \text{ С} = 300^\circ \text{ К}$ и $v = 10$ см/сек, и продолжим ее до пересечения со вспомогательной шкалой. Через найденную точку на вспомогательной шкале и точку, соответствующую значению $\rho = 1$, проводим прямую линию до пересечения со шкалой диаметров, где находим искомое значение $\delta = 58$ мк.

Скорость витания для более широкого диапазона сферических частиц можно рассчитать по способу В. П. Лященко [11]. Эту скорость определяют из соотношения

$$Re^2 \psi = \frac{G_{\text{ТВ}} \rho_{\text{ГР}}}{\eta_{\text{ГР}}^2 g}, \quad (4)$$

где Re — критерий Рейнольдса для пылинки;

$$Re = \frac{v \delta \rho_{\text{ср}}}{\eta_{\text{ср}} g}; \quad (5)$$

ψ — безразмерный коэффициент сопротивления, который зависит от Re ;

$G_{\text{ТВ}}$ — масса пылинки в (газовой) среде, кг ;

$\eta_{\text{ср}}$ — вязкость среды, $(\text{кг} \cdot \text{сек})/\text{м}^2$;

$\rho_{\text{ср}}$ — плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$, $\text{г}/\text{см}^3$;

g — ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{сек}^2$.

Для шарообразной частицы в газовой среде

$$G_{\text{ТВ}} \approx \frac{\pi \delta^3 \rho}{6}. \quad (6)$$

Порядок расчета следующий:

1) определяют $G_{\text{в}}$ по формуле (6);

2) по формуле (4) определяют значение $Re^2 \psi$;

3) по таблице или диаграмме, зная $Re^2 \psi$, находят Re ;

4) по Re находят искомое значение v по формуле (5).

Взамен этих расчетов даем две номограммы 31 и 32, по которым без всяких расчетов можно найти значение скорости витания сферической частицы, если даны ее размер, плотность и температура газа. Эти номограммы верны для тех случаев, когда газовая среда по своим свойствам (по вязкости) близка к воздуху, в том числе для дымовых газов, получаемых при сжигании топлива.

Эти номограммы построены на основе формул (4), (5) и (6) и таблиц Ляценко для зависимостей Re от $Re^2 \psi$.

Порядок пользования номограммами показан на цифровом примере.

Пример 48. Требуется найти скорость витания сферической частицы, диаметр которой 200 $\mu\text{м}$ и плотность 5 $\text{г}/\text{см}^3$ (5000 $\text{кг}/\text{м}^3$), если вязкость газа близка к вязкости воздуха и температура его 800° С.

На номограмме 31 на вертикальной шкале находим точку, соответствующую значению $\delta = 200 \mu\text{м}$. От этой точки проводим горизонталь до пересечения с наклонной линией, соответствующей $\rho = 5$; от точки пересечения опускаем вертикаль до пересечения с линией, соответствующей $t = 800^\circ \text{С}$, и от этой точки пересечения проводим горизонталь до пересечения с кривой линией; абсцисса этой точки пересечения соответствует значению величины критерия Рейнольдса, для данного случая он равен 2,7.

Заметим, что эта кривая даст зависимость между величинами $Re^2 \psi$ и Re и поэтому соответственно на вертикальной оси нанесены значения величины $Re^2 \psi$.

Найдя значение $Re = 2,7$, переходим на номограмму 32, на которой проводим прямую линию между точками, соответствующими значениям $Re = 2,7$ и $t = 800^\circ \text{С}$, и на вспомогательной линии отмечаем точку пересечения. Через найденную точку пересечения на вспомогательной линии и точку, соответствующую $\delta = 200 \mu\text{м}$, проводим прямую до пересечения со шкалой скорости витания, на которой находим, что $v = 1,85 \text{ м}/\text{сек}$.

Пылевые камеры

При ламинарном движении запыленного газа под влиянием силы тяжести пылинки оседают на дно со скоростью, определяемой скоростью витания $w_{\text{п}}$ [22].

Введем следующие обозначения:

$V_{\text{г}}$ — часовой объем газа, проходящий через камеру, $\text{м}^3/\text{ч}$;

h — высота камеры, высота падения пылинки, м ;

L — длина камеры, м ;

b — ширина камеры, м .

$$w_{\text{г}} = \frac{V_{\text{г}}}{hb \cdot 3600} \text{ м}/\text{сек}.$$

Пылинка, находящаяся на самом верху камеры в момент входа, успеет осесть, если

$$\frac{h}{w_{\Pi}} - \frac{L}{v_{\Gamma}} \quad (1)$$

или

$$\frac{h}{w_{\Pi}} = \frac{Lhb \ 3600}{V_{\Gamma}},$$

т. е.

$$Lb = \frac{V_{\Gamma}}{w_{\Pi} \ 3600}. \quad (2)$$

Но

$$w_{\Pi} = \frac{\delta^2 g}{18\eta}, \quad (3)$$

где δ — размер (диаметр) сферической пылинки, *м*;

ρ — плотность пылинки, *кг м³*;

η — вязкость газа, (*кг · сек*)/*м²*.

Подставив значение w_{Π} из уравнения (3) в формулу (2) и преобразовав ее, получим

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{18\eta V_{\Gamma}}{3600\rho Lb}}.$$

Обозначив через Lb горизонтальную проекцию площади, на которую осаждается пыль, через S — площадь осаждения, получим

$$\delta = 0,0707 \sqrt[3]{\frac{\eta V_{\Gamma}}{\rho S}} \text{ м} = 7,07 \cdot 10^4 \sqrt[3]{\frac{\eta V_{\Gamma}}{\rho S}} \text{ мк}. \quad (4)$$

По этой формуле, зная часовой объем газа, поступающего в пылевую камеру, и площадь осаждения, можно рассчитать, какой крупности частицы полностью осядут в камере, и, наоборот, задаваясь размером пылинок, можно узнать требуемую поверхность осаждения при ламинарном движении запыленного газа.

По формуле (4) построена номограмма 33 в предположении, что вязкость газа равна вязкости воздуха. Если вязкость газа существенно отличается от вязкости воздуха, то полученный по номограмме результат для значения δ следует умножить на величину $\sqrt[3]{\frac{\eta_{\Gamma}}{\eta_{\text{в}}}}$, где η_{Γ} — вязкость газа при данной температуре и $\eta_{\text{в}}$ — вязкость воздуха при той же температуре.

Пример 49. Запыленный газ в количестве 20 000 м³/ч при температуре 400° С нужно очистить от пылинок крупнее 50 мк.

Определить, какая требуется для этого площадь осаждения, если плотность пыли 4000 кг/м³?

По номограмме 33 находим, что для заданных условий требуется на каждые 610 м³ газа 1 м² осадительной горизонтальной поверхности и, следовательно, на 20 000 м³ требуется площадь осаждения $\frac{20000}{610} = 33 \text{ м}^2$.

Циклоны и батарейные циклоны

Циклоны каждого типа испытывают при каких-либо определенных условиях: при постоянных диаметре циклона, температуре газа, определенной плотности пыли и постоянном значении величины $\frac{\Delta H}{\rho_l}$, где ΔH — гидравлическое сопротивление циклона в *мм вод. ст.*; ρ_l —

плотность газа при рабочих условиях в $кг/м^3$. В этих условиях определяют величину степени улавливания для пылинок различной крупности [10, 13, 14].

Эффективность циклонов одной и той же серии, но при различных рабочих условиях определяют по формуле

$$d_{\text{мин}} = C \sqrt{\frac{D \mu}{\rho_{\text{п}} \frac{\Delta H}{\rho_{\text{г}}}}}, \quad (1)$$

где $d_{\text{мин}}$ — минимальный диаметр улавливаемых частиц циклона;

D — диаметр циклона;

$\rho_{\text{п}}$ — плотность улавливаемых пылинок;

$\rho_{\text{г}}$ — плотность газа;

ΔH — потеря давления в циклоне;

C — коэффициент;

μ — вязкость газа ¹.

На диаграмме 34 приведены значения фракционного коэффициента улавливания пыли для условно эталонных условий:

а) для циклона типа ЦН-15 при диаметре его 600 мм, значении $\frac{\Delta H}{\rho_{\text{т}}} = 75 \text{ мм вод. ст.}$, $t = 210^\circ \text{C}$ и улавливании летучей золы плотностью $1,93 \text{ г/см}^3$ (кривая 1);

б) для батарейного циклона с элементом диаметром 250 мм и направляющим аппаратом «Винт» под углом 25° ; $\frac{\Delta H}{\rho_{\text{т}}} = 80 \text{ мм вод. ст.}$, $t = 180 \text{ C}$ и улавливания летучей золы плотностью $2,2 \text{ г/см}^3$ (кривая 2).

Для определения в таких же условиях среднего коэффициента очистки газов от полидисперсной пыли нужно для каждой фракции пыли найти по диаграмме 33 значение фракционного коэффициента улавливания η и помножить его на долю данной фракции a_i . Сумма всех этих произведений даст средний коэффициент улавливания пыли.

Пример 50. Требуется найти средний коэффициент улавливания пыли в циклоне Ц-Н15 диаметром 600 мм при $\frac{\Delta H}{\rho_{\text{т}}} = 75 \text{ м}$, $\rho_{\text{п}} = 1,93 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{г}} = 210^\circ \text{C}$, если пыль имеет следующий фракционный состав:

| Фракция, мк | Состав, % |
|-------------|-----------|
| 0—5 | 10 |
| 5—10 | 20 |
| 10—20 | 40 |
| 20—30 | 20 |
| 30—40 | 10 |

По диаграмме 34 находим для средних размеров частиц пыли фракционные значения η :

| Фракция, мк | Средний размер пыли, мк | Фракционный коэффициент улавливания η , % |
|-------------|-------------------------|--|
| 0—5 | 2,5 | 25 |
| 5—10 | 7,5 | 79 |
| 10—20 | 15 | 93,5 |
| 20—30 | 25 | 97,8 |
| 30—40 | 35 | 98,8 |

Средняя степень улавливания пыли будет равна:

$$\eta_{\text{ср}} = 25 \cdot 0,1 + 79 \cdot 0,2 + 93,5 \cdot 0,4 + 97,8 \cdot 0,2 + 98,8 \cdot 0,1 \approx 85\%.$$

¹ Здесь и ниже, если не приведена размерность величин, то она может быть любой, но соответственной.

Для определения степени улавливания пылей не в эталонных, а в других условиях построены, используя формулу (4) и данные НИИОГЗа, номограммы 35 и 36.

Номограмма 35 служит для определения степени улавливания пыли в рабочих условиях, отличающихся от условно эталонных. Для определения степени улавливания пыли в каком-либо циклоне серии ЦН вначале определяют по фракционному составу фракционные коэффициенты улавливания пыли в условно эталонных параметрах, предполагая, что улавливание производится в циклоне диаметром 600 мм при плотности пыли $1,93 \text{ г/см}^3$; $t = 910^\circ \text{C}$; $\frac{\Delta H}{Q_t} = 75 \text{ м}$ (номограмма 37).

После этого по номограмме 35 определяют степень улавливания данной пыли в заданных условиях.

На оси x в середине номограммы находят точку, соответствующую среднему коэффициенту улавливания данной пыли при условно эталонных параметрах, далее, идя по стрелкам до пересечения с линиями, соответствующими заданным условиям, находят искомое значение степени улавливания на нижней шкале оси x .

Пример 51. Требуется найти степень улавливания пыли фракционного состава, указанного в предыдущем примере, плотностью $3,5 \text{ г/см}^3$ в циклоне ЦН-15у диаметром 1000 мм при $\frac{\Delta H}{Q_t} = 50$.

На средней шкале оси x находим точку, соответствующую степени улавливания 85% , и по стрелкам идём вначале до линии, соответствующей значению $Q_{\text{н}} = 3,5$, потом до линии, соответствующей значению $\frac{\Delta H}{Q_t} = 50$, затем до линии, соответствующей $D = 1000 \text{ мм}$ и, наконец, до линии ЦН-15у. Абсцисса последней точки пересечения на нижней шкале даёт искомое значение степени улавливания 77% .

Следует заметить, что найденное значение соответствует расчётной величине и может несколько отличаться от практически получаемого, так как при построении номограммы 35, так же как и при обычных расчётах, не учитывалось влияние температуры на вязкость газов, коагуляции и соосаждения пылинки наиболее мелких фракций и больших скоростей на «обратный унос» пыли.

Номограммой 35 можно пользоваться и для расчётов циклонов других типов (не ЦН), если известен средний коэффициент улавливания для данной пыли и этого циклона при условно эталонных параметрах: $Q_{\text{н}} = 1,93 \text{ г/см}^3$; $\frac{\Delta H}{Q_t} = 75 \text{ м}$; $D = 600 \text{ мм}$.

В этом случае поступают так, как описано выше, но искомый результат находят на левой шкале по оси y для ординаты точки пересечения стрелки, идущей сверху, с линией, соответствующей заданному диаметру.

Пример 52. Циклон диаметром 600 мм пыль плотностью $1,93 \text{ г/см}^3$ при $\frac{\Delta H}{Q_t} = 75 \text{ м}$ улавливает на 80% . Какая степень улавливания будет в циклоне такой же конструкции, но при плотности пыли 3 г/см^3 , $\frac{\Delta H}{Q_t} = 60 \text{ м}$ и диаметре циклона 80 мм ? Двигаясь по стрелкам, показанным на номограмме 35 сплошными линиями, находим, что $\eta = 77\%$.

Если же известен только средний коэффициент улавливания для некоторых параметров, отличных от условно эталонных, то его следует вначале привести к этим условиям, а потом по найденному значению найти искомое значение степени улавливания. Покажем это на примере.

Пример 53. Требуется найти расчётное значение среднего коэффициента улавливания пыли в циклоне типа ЛЮТ, диаметром 800 мм для пыли плотностью

4 г/см³ при $\frac{\Delta H}{Q_t} = 60$ м, если при испытании на этой же пыли в циклоне диаметром 400 мм при $\frac{\Delta H}{Q_t} = 50$ м средний коэффициент улавливания был 70%.

Вначале будем искать значение средней степени улавливания пыли при условно эталонных параметрах. Для этого на левой вертикальной шкале от точки, соответствующей 70%, проводим горизонталь до линии, соответствующей 0,4 м, от точки пересечения проводим вертикаль до пересечения с линией, соответствующей $\frac{\Delta H}{Q_t} = 50$ м, и от точки пересечения горизонталь с линией, соответствующей $Q_{II} = 4$ г/см³. Абсцисса последней точки пересечения 56,7% соответствует коэффициенту улавливания при условно эталонных параметрах.

Для нахождения искомого значения степени улавливания пыли проводим стрелки (вертикали и горизонталы) в обратном порядке от найденной величины 56,7% до $Q_{II} = 4$ г/см³, далее до $\frac{\Delta H}{Q_t} = 60$ м, потом до линии, соответствующей $D = 0,8$ м. Ордината последней точки $\approx 61,5\%$ соответствует искомой величине степени очистки газов от пыли в заданных условиях.

Номограмма 36 построена аналогично номограмме 35, но в качестве исходного параметра принята не величина $\frac{\Delta H}{Q_t}$, а отдельно ΔH и температура газа t в предположении, что $Q_0 = 1,3$ г/см³, $B \approx 760$ мм рт. ст. и с учетом изменения вязкости от температуры

$$\eta = 100 - (100 - \eta_0) \sqrt{\left(\frac{D \mu_t Q_t}{\Delta H Q_{II}}\right) \left(\frac{\Delta H_0 Q_{II 0}}{D_0 \mu_0 Q_{r 0}}\right)}, \quad (2)$$

Индексом «0» даны эталонные условия.

Верхняя горизонтальная шкала является исходной и соответствует степени улавливания данной пыли в условно эталонных параметрах (циклон ЦН-15; $D = 600$ мм; $\frac{\Delta H}{Q_t} = 75$ м; $Q_{II} = 1,93$ г/см³).

Нижняя вертикальная шкала дает значения степени улавливания при заданных условиях в циклонах типа ЦН, если известна степень улавливания в условно эталонных параметрах.

Нижняя горизонтальная шкала служит для определения степени улавливания пыли в циклонах любого типа, если известен процент очистки в том же циклоне по при других параметрах.

Покажем на примерах порядок пользования этой номограммой.

Пример 54. Пыль плотностью $Q_{II} = 1,93$ г/см³ в циклоне ЦН-15 диаметром 600 мм при 210° С и $\frac{\Delta H}{Q_t} = 75$ м улавливается на 75%. Требуется найти, насколько эта же пыль будет улавливаться в циклоне ЦН-15у диаметром 1200 мм, если температура газа 300° С и в циклоне можно иметь $\Delta H = 50$ мм вод. ст.?

По номограмме 36 находим искомую степень улавливания $\approx 52,5\%$ (линии крупным пунктиром).

Пример 55. Пыль плотностью 3,5 г/см³ улавливается в циклоне ЦН-15 диаметром 600 мм при $\frac{\Delta H}{Q_0} = 75$ м на 80%. Требуется узнать, насколько эта же пыль будет улавливаться в циклоне ЦН-24 диаметром 800 мм при $\Delta H = 80$ мм вод. ст. при температуре 100° С?

На верхней оси у номограммы 36 находим значение степени улавливания — 80%. Заметим, что при $Q_{II} = 1,93$, а не 3,5 г/см³ степень улавливания этой пыли в эталонных условиях была бы не 80, а 73,3% (абсцисса точки пересечения ординаты, соответствующей 80%, и линии, соответствующей $Q_{II} = 3,5$ г/см³). От ординаты, соответствующей точке 80%, проводим стрелки так, как это показано пунктирной линией, и находим, что степень улавливания составит 65%.

Пример 56. В циклоне типа СИОТ диаметром 500 мм газ очищается от пыли, имеющей плотность 2,5 г/см³ на 85% при $t = 20^\circ$ С и $\Delta H = 50$ мм вод. ст.

Насколько будет очищаться газ от пыли такого же дисперсионного состава плотностью 5 г/см³ из газа, имеющего 400° С, если диаметр циклона будет 1400 мм и $\Delta H = 30$ мм вод. ст.?

На номограмме 36 на нижней шкале абсцисс находим величину 85% и идем по стрелкам a до пересечения с линиями, соответствующими $t = 20^\circ \text{C}$; $\Delta H = 50 \text{ мм вод. ст.}$; $D = 500 \text{ мм}$; $\rho_{\text{г}}$ 2,5 г/см³.

От точки пересечения с линией $\rho_{\text{г}}$ переходим по стрелке b на линию, соответствующую $\rho_{\text{п}}$ 5, дальше движемся в обратном направлении по стрелкам c и находим на нижней горизонтальной шкале, что искомая степень улавливания будет равна 79%.

Объем газов, проходящих через циклон, и гидравлическое сопротивление циклона

Сопротивление любого аппарата, в том числе и циклона, определяется общей формулой

$$\Delta H = \zeta \frac{w^2 \gamma}{2g} \text{ мм вод. ст.} \quad (1)$$

где ζ — коэффициент сопротивления;

w — скорость газа, м/сек;

γ — удельный вес газа при рабочих условиях, кг/м³;

g — ускорение силы тяжести, 9,81 м/сек².

Скорость газа в аппарате, считая на поперечное сечение циклона, равна

$$w = \frac{V}{3600 \frac{\pi D^2}{4}} \quad (2)$$

где V — часовой расход газа, м³/ч;

D — диаметр циклона, м.

Для газов, по составу близких к воздуху и дымовым газам, и давлению, примерно равном атмосферному, можно принять

$$\gamma_0 = 1,3 \text{ и } \gamma = \frac{1,3 \cdot 273}{273 + t} \text{ кг/м}^3. \quad (3)$$

Подставляя эти значения γ и V в формулу (1), получим

$$\Delta H \approx 2,25 \cdot 10^{-6} \zeta \frac{V^2}{D^4 T}. \quad (4)$$

По этой формуле построена номограмма 37, на которой дана зависимость между сопротивлением циклона и его производительностью по газу при различных размерах циклона и различных температурах газа при условии, что плотность газа $\sim 1,3 \text{ кг/м}^3$ и давление близко к 760 мм рт. ст.

Пример 57. Сколько газа, имеющего температуру 300°C , можно пропустить через циклон ЦН-15у диаметром 700 мм при сопротивлении 600 мм вод. ст., если газ по составу близок к воздуху? По номограмме 37 находим, двигаясь по стрелкам, что $V \approx 5750 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Пример 58. Каково будет гидравлическое сопротивление циклона ЦН-24 диаметром 500 мм, когда через него пропускается 3000 м³ воздуха в час при $t = 400^\circ \text{C}$?

Находим на шкале объемов значение 3000 м³/ч и, двигаясь по горизонталям и вертикалям в направлении, обратном стрелкам первого примера, находим $\Delta H = 52 \text{ мм вод. ст.}$ (на номограмме 37 этот пример стрелками не показан).

Пример 59. Какого диаметра требуется установить циклон типа ЦН-15, если через него требуется пропустить 14000 м³/ч газа при 200°C и гидравлическом сопротивлении не более 100 мм вод. ст.? Плотность газа при нормальных условиях 1,3 кг/м³. Давление его близко к 760 мм рт. ст. Двигаясь с двух сторон от шкалы ΔH и шкалы V по стрелкам e , находим, что искомый диаметр равен около 1000 мм.

Пример 60. Газ объемом 30000 м^3 при $t = 200^\circ \text{С}$ проходит через четыре циклона типа ЦН-24 диаметром 800 мм. Требуется определить среднюю степень улавливания пыли, если известен фракционный состав ее.

| Фракция, мг | Состав, % | Фракция, мк | Состав, % |
|-------------|-----------|-------------|-----------|
| 0-10 | 15 | 20-30 | 35 |
| 10-15 | 10 | 30-40 | 15 |
| 15-20 | 20 | Более 40 | 5 |

Плотность пыли 3 кг/м^3 ; плотность газа при нормальных условиях $1,3 \text{ кг/м}^3$.

По номограмме 34 находим степени улавливания для каждой из фракций в случае эталонных параметров, т. е. для циклона ЦН-15 диаметром $D = 600 \text{ мм}$; $Q_{\text{ц}} = 1,93 \text{ кг/м}^3$; $\frac{\Delta H}{Q} = 75 \text{ м}$.

| Фракция, мк | Средний размер, мк | Степень улавливания, % |
|-------------|--------------------|------------------------|
| 0-10 | 5 | 51 |
| 10-15 | 12,5 | 91 |
| 15-20 | 12,5 | 95,7 |
| 20-30 | 25 | 97,8 |
| 30-40 | 35 | 98,8 |
| Более 40 | 50 | 99 |

Средняя степень улавливания для всех фракций в эталонных условиях будет $0,15 \cdot 51 + 0,1 \cdot 91 + 0,2 \cdot 95,7 + 0,35 \cdot 97,8 + 0,15 \cdot 98,8 + 0,05 \cdot 99 = 89,9\%$.

По номограмме 37 находим, что при пропускании через каждый циклон ЦН-24 диаметром 800 мм по $\frac{30000}{4} = 7500 \text{ м}^3/\text{ч}$ газа сопротивление его ΔH будет равно $\approx 40 \text{ мм вод. ст.}$ (при $t = 200^\circ \text{С}$).

По номограмме 36 находим степень улавливания при заданных условиях (ЦН-24; $D = 800 \text{ мм}$; $Q_{\text{ц}} = 3 \text{ кг/м}^3$; $\Delta H = 40 \text{ мм вод. ст.}$; $t = 200^\circ \text{С}$) около 83% .

Пример 61. Для условий предыдущего примера найти, при каком гидравлическом сопротивлении циклона ЦН-11 степень улавливания будет 85% ?

Вспользуемся найденными в предыдущем примере данными о том, что в эталонных условиях для пыли данной дисперсности степень улавливания составляет $89,9\%$.

По номограмме 36, проводя стрелки навстречу друг другу:

а) от $89,9\%$ на шкале эталонных условий через точки пересечения с линиями $Q_{\text{ц}} = 3 \text{ кг/м}^3$; $D = 800 \text{ мм}$ и далее к линиям ΔH ;

б) от заданного значения 85% на вертикальной нижней шкале до точек пересечения с линиями, соответствующими ЦН-14, $t = 200^\circ \text{С}$ и далее к линиям ΔH .

Находим точку встречи на линии, соответствующей $\Delta H = 60 \text{ мм вод. ст.}$

Аналогично можно решать задачи по подбору диаметра циклона по заданному сопротивлению и степени улавливания.

Номограмму 36 можно использовать для решения некоторых вопросов и для циклонов любой конструкции; так например, как изменится сопротивление любого циклона, если объем и температура газа, проходящего через циклон, изменяется. Покажем на примере порядок решения такой задачи.

Пример 62. Через циклон диаметром в 1 м проходит за час 10000 м^3 при $t = 200^\circ \text{С}$, при этом сопротивление циклона равно 70 мм вод. ст. Какое будет сопротивление у этого циклона, если через него будет проходить $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ газа при температуре 100°С ?

От точки, соответствующей $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$, проводим последовательно линии до пересечения с линией, соответствующей $D = 1000 \text{ мм}$; $t = 200^\circ \text{С}$ и далее до встречи с линией, вертикально проведенной из точки, соответствующей $\Delta H = 70$. Через найденную точку их пересечения A и начало координат проводим прямую линию, соответствующую конструкции данного цикла (пунктирная линия). Теперь проводим линии от точки, соответствующей $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$, до линии $D = 1000 \text{ мм}$, далее до линии, соответствующей $t = 100^\circ \text{С}$, до построенной пунктирной линии и, наконец, до оси абсцисс, на которой находим, что искомое сопротивление будет 57 мм вод. ст.

Батарейные циклоны

Номограммы 38 и 39 даны для расчета батарейных циклонов [14]. Они построены аналогично номограммам 36 и 37. Поэтому приведем только несколько цифровых примеров пользования ими.

Пример 63. Фракционный состав пыли, которая содержится в газе поступающем на очистку в батарейный циклон, следующий:

| Фракция, <i>мк</i> | Состав, % | Фракция, <i>мк</i> | Состав, % |
|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| 0—5 | 30 | > 20—30 | 10 |
| > 5—10 | 16 | > 30—40 | 10 |
| > 10—15 | 6 | > 40—80 | 20 |
| > 15—20 | 8 | | |

Плотность пыли $3,5 \text{ г/см}^3$; газ по составу близок к воздуху, температура газа 300 С .

Требуется найти среднюю степень улавливания пыли в батарейном циклоне диаметром 250 мм с розеткой углом 25° , если величина падения давления $\Delta H = 50 \text{ мм вод. ст.}$, и определить, какое количество таких элементов требуется установить для очистки $50000 \text{ м}^3/\text{ч}$ газа.

По диаграмме 34 находим значение степеней улавливания отдельных фракций в батарейном циклоне для эталонных условий, т. е. для пыли $\rho_{\text{п}} = 2,2 \text{ кг/см}^3$; $\frac{\Delta H}{qt} = 80$ и элемента типа В250 — 25° .

| Фракция, <i>мк</i> | Средний размер, <i>мк</i> | Степень улавливания, % |
|--------------------|---------------------------|------------------------|
| 0—5 | 2,5 | 33 |
| 5—10 | 7,5 | 74 |
| 10—15 | 12,5 | 84 |
| 15—20 | 17,5 | 88 |
| 20—30 | 25 | 94 |
| 30—40 | 35 | 96,5 |
| 40—80 | 60 | 97,8 |

По этим данным и фракционному составу пыли находим среднюю степень улавливания пыли в эталонных условиях:

$$30 \cdot 0,33 + 16 \cdot 0,74 + 6 \cdot 0,83 + 8 \cdot 0,88 + 10 \cdot 0,94 + 10 \cdot 0,965 + 20 \cdot 0,978 \approx 72,3\%$$

По номограмме 38 находим, что для заданных условий степень очистки будет не $72,3$, а примерно $82,2\%$.

По номограмме 39 находим, что через один элемент диаметром 250 мм с розеткой углом 25° при сопротивлении 50 мм вод. ст. и $t_{\text{г}} = 300^\circ \text{ С}$ можно пропустить газа около $740 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Следовательно, для заданного объема газа следует установить аппарат с $\frac{50000}{6740} \approx 7,4$ элементами.

Пример 64. Газ, по составу близкий к воздуху, при температуре 100° С поступает в батарейный циклон с розетки углом $\alpha = 30^\circ$. Сколько может пропустить газа один элемент диаметром 150 мм , если желательно иметь сопротивление в батарейном циклоне не более 80 мм вод. ст. в сек.?

По номограмме 39 находим, что $V \approx 320 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Пример 65. Какого диаметра следует выбрать элементы батарейного циклона с розеткой с углом $\alpha = 25^\circ$, если через каждый элемент пропускать газ в количестве $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $t = 300^\circ \text{ С}$ и желательно иметь сопротивление 90 мм вод. ст. ?

По номограмме 39 находим (точка пересечения пунктирных стрелок), что диаметр должен быть около 280 мм .

Электрофильтры.

Изменение степени очистки газов в электрофильтре в зависимости от скорости газа, длины и напряжения поля

Предполагая, что концентрация пыли благодаря турбулентному движению газового потока по сечению аппарата, перпендикулярному движению газа, постоянная, можно вывести следующую зависимость степени очистки от времени пребывания газа в зоне электрического поля [15]:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{v}{R} t^2}, \quad (1)$$

где η — степень очистки газов от пыли в долях;
 e — основание натуральных логарифмов, равное 2,718;
 v — средняя скорость, с которой движется пылинка под действием поля к осадительному электроду;
 R — расстояние между коронирующим и осадительным электродом;
 z — время пребывания запыленного газа в поле электрофильтра.

Время z изменяется: а) при переходе от одного типа аппарата к другому за счет изменения длины поля или конструктивного решения аппарата; б) для одного и того же аппарата за счет изменения скорости газа.

Последнее часто имеет место в процессе эксплуатации. Однако при этом следует помнить, что приведенная формула не учитывает возможности срыва осевшей пыли с электродов при повышенной скорости газа, а также изменения скорости осаждения пылинок v вследствие влияния пылевой концентрации на состояние электрического поля. Оба эти фактора могут значительно понизить степень очистки газа при возрастании скорости газа.

На диаграмме 40 дана зависимость степени улавливания пыли η от z — времени пребывания запыленного газа в электрическом поле.

Пример 66. На опытной установке при длине поля в 1,2 м и некоторых технологических и электрических условиях была получена степень улавливания пыли в 60%.

Какова степень очистки газа в аппарате с длиной поля 3 м, если все остальные условия остаются неизменными (состав, температура и скорость газа; фракционный химический состав, концентрация пыли, расстояние между электродами, их конструкция и разность потенциалов)?

По диаграмме 40 находим, что степени улавливания пыли 60% соответствует на вспомогательной шкале точка 45,5. При изменении длины поля с 1,2 до 3 м это значение следует увеличить во столько же раз, т. е. до $\frac{45,5 \cdot 3}{1,2} \approx 114$.

Находим по диаграмме, что такому значению абсциссы соответствует степень улавливания примерно в 90%.

Пример 67. В электрофильтре при скорости газа в 0,8 м/сек газы очищаются на 95%. Какую максимальную степень улавливания пыли можно ожидать, если скорость газа увеличится до 1 м/сек?

По диаграмме находим, что степени улавливания пыли 95% соответствует абсцисса 150. При увеличении скорости газа время пребывания его в поле уменьшается в $\frac{1}{0,8} = 1,25$ раза, т. е. значение абсциссы будет равно $\frac{150 \cdot 0,8}{1} = 120$.

Этому значению абсциссы соответствует степень очистки 91%. Фактически степень очистки может быть несколько меньше вследствие большего срыва пыли с осадительных электродов при увеличении скорости газа и понижении напряженности поля, которое может произойти из-за повышения пылевой нагрузки.

Пример 68. В трехпольном электрофильтре газы очищаются на 98%, при этом потери пыли с газами составляют 5 кг/ч.

Как изменится величина этих потерь, если будет выключено одно электрическое поле и скорость газа уменьшена на 10%?

Признаем, что в выключенном поле газ проходит без очистки, т. е. пренебрегаем осаждением пыли за счет гравитационных сил. Такое допущение вполне возможно для пылинок размером менее 10 мк.

По диаграмме 40 находим, что степени очистки в 98% соответствует значение абсциссы 200. При выключении одного поля при неизменной скорости газа значение абсциссы (величина, пропорциональная времени) уменьшится на $\frac{1}{3}$, т. е. будет равна $\frac{200 \cdot 2}{3} = 133$. При таком значении абсциссы (при прежней скорости газа) степень очистки будет составлять 93%, т. е. потери составят не 2%, а 7%, или $\frac{5 \cdot 7}{2} = 17,5$ кг.

При уменьшении скорости газа на 10% возрастает на 10% время пребывания газа в электрическом поле и соответственно увеличится значение абсциссы, т. е. она будет равна $133 \cdot 1,1 = 146$. Этому значению абсциссы соответствует очистка газов от пыли на 94,5%. При этом потери пыли будут 5,5%, т. е. $\frac{5 \cdot 5,5}{2} = 13,75$ кг.

Используя формулу (1), можно проследить влияние напряжения на степень очистки.

Скорость, с которой движутся пылинки к осадительному электроду, зависит от величины заряда пылинки и от напряженности поля E :

$$v = \frac{ne_0 E}{6 \pi \mu r} \text{ см/сек}, \quad (2)$$

где ne_0 — величина заряда пылинки.

По величине заряда ne_0 также зависит от величины напряженности поля и радиуса пылинки r :

$$ne_0 = E \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) r^2, \quad (3)$$

где ε — диэлектрическая постоянная материала пылинки.

Тогда

$$v = \frac{E \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) r^2 E}{6 \pi \mu r} = a E^2 r, \quad (4)$$

где

$$a = \frac{\left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right)}{6 \pi \mu}.$$

Подставив это значение для v в формулу (1), получим

$$\eta = 1 - e^{-\frac{2aE^2 r}{R} z}. \quad (5)$$

Заметим, что E пропорционально разности потенциалов на электродах, т. е. напряжению, подаваемому в электрофильтр V . Считая величины a , q , R и z постоянными, можно написать, что

$$\eta = 1 - e^{-Kv^2}.$$

Покажем на примере, как, пользуясь диаграммой 40, можно узнать влияние напряжения.

Пример 69. При напряжении на первичной обмотке трансформатора 260 в в электрофильтре производится очистка на 90%. Какая степень очистки будет при напряжении 240 в?

По диаграмме 40 находим, что степени очистки в 90% соответствует значение абсциссы 115. При изменении напряжения значение абсциссы изменится до $115 \left(\frac{240}{260} \right)^2 \approx 98$. Такому значению абсциссы соответствует степень очистки приблизительно в 86%.

Высота слоя пены в пенном аппарате

Высота слоя пены нужна для определения:

- расстояния, которое требуется делать между полками в пенном аппарате, или расстояния от решетки до брызгоотбойников;
- степени улавливания или, наоборот, по заданной степени улавливания требуемой высоте порога.

По данным Позина М. Е., Мухленова И. П. и Тарат Э. Я. [16], высота слоя пены для воды при комнатной температуре может быть определена по формулам:

- в аппаратах без переливных устройств

$$H = 0,806 h_0^{0,6} w_r^{0,5};$$

б) в аппаратах со свободным переливом пены

$$H = 0,806 h_c^{0,6} w_r^{0,5} + h_{п},$$

где H — высота слоя пены, м;

w_r — скорость газа (в общем сечении аппарата над решеткой), м/сек;

h_0 — высота исходного слоя жидкости, м;

h_c — высота перелива, равная примерно $\frac{3i}{1000}^{2/3}$, м;

$h_{п}$ — высота порога, м;

i — интенсивность потока жидкости, измеряемая объемом жидкости, протекающей за час через сливное отверстие шириной в 1 м, $м^3 \cdot м^2 \cdot ч.$

Значения H для этих двух случаев приведены на номограммах 41 и 42.

Пример 70. Определить высоту слоя пены воды в пенном аппарате без перелива, если скорость воздуха в нем 2,0 м/сек, а начальная высота воды 80 мм. По номограмме 41 находим $H \approx 250$ мм.

Пример 71. Какова высота слоя пены воды в пенном аппарате с переливом, если высота порога 30 мм, интенсивность потока жидкости 20 $м^3/м^2 \cdot ч$ и скорость воздуха в аппарате 1,5 м/сек?

На номограмме 42, двигаясь по стрелкам от значения $i \approx 20$ $м^3/м^2 \cdot ч$ до кривой, соответствующей $w_r = 1,5$ м/сек, находим вначале значение высоты слоя пены в случае отсутствия порога $H_{бп} \approx 100$ мм. Соединяем прямой линией эту точку с точкой $h_{п} = 30$ и точка пересечения этой прямой со шкалой H дает значение общей высоты слоя пены $H = 130$ мм.

Улавливание пыли в пенных аппаратах

По данным Позина М. Е. и сотрудников, степень улавливания пылинок зависит от размера, плотности пылинок, скорости газа и высоты слоя пены.

Зависимость между степенью улавливания, диаметром пылинок и их плотностью при эталонных условиях, т. е. при высоте пены 90 мм и скорости газа 2 м/сек, изображена графически в правой части номограммы 43. В левой верхней части номограммы дан поправочный коэффициент, приблизительно выраженный формулой

$$A = 0,7108 \sqrt{2 - \frac{0,2 - H}{w}},$$

где H — высота слоя пены, м;

w — скорость газа, считая на общее сечение аппарата при температуре входа, м/сек;

A — поправочный коэффициент;

$$\eta_{действ} = A \eta_{этал}.$$

Номограмма 43 применима для

гидрофильных пылей при $q_T d_T > 1$ и

гидрофобных пылей при $q_T d_T > 43,5$,

где q_T — плотность пылинок, г/см³;

d_T — диаметр пылинок, мк.

Гидрофильные пыли SiO₂, CaCO₃, Al₂O₃, Fe₂O₃, BaSO₄; гидрофобные пыли — уголь, сера, сульфиды.

$\eta_{действ}$ на номограмме дается как точка пересечения двух стрелок в левом нижнем квадранте.

Пример 72. Определить степень улавливания пылинок диаметром 5 мк и плотностью 3 г/см³. Запыленный газ очищается в пенном аппарате при скорости газа 1,5 м/сек и высоте пены ~ 60 мм.

На нижней горизонтальной шкале находим точку, отвечающую $d = 5$ мк, и проводим стрелки до линии, соответствующей $q_T = 3$ г/см³, и далее горизонталь до встречи

со стрелкой, идущей сверху, которая проведена от точки, соответствующей $H_{II} = 60$ мм, до линии, соответствующей $w = 1,5$ м/сек.

Точка пересечения обеих стрелок приблизительно лежит на линии, отвечающей $\eta = 88\%$.

Коэффициент массоотдачи для хорошо растворимых газов

Коэффициент массоотдачи для хорошо растворимых газов практически равен коэффициенту массопередачи и приближенно может быть рассчитан по формуле [17]:

$$K = \frac{0,0017 M w^{0,75} (0,0011 T - 0,18)^{0,25}}{(13,7 + V M) d_{ЭК}^{0,25}} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт. ст.}),$$

где M — молекулярная масса поглощаемого компонента;

w — скорость газа в свободном сечении насадки скруббера, см/сек;

T — абсолютная температура газа;

$d_{ЭК}$ — эквивалентный диаметр насадки, равный учетверенному значению живого сечения насадки, деленному на удельную поверхность ее, м.

Номограмма 43 построена на основании этой формулы.

Пример 73. Чему равен коэффициент массоотдачи при улавливании SO_2 из газов сернокислотного производства моногидратом, если известно, что средняя температура газов $80^\circ C$; в аппарате уложены кольца диаметром 50 мм, скорость газа в свободном сечении аппарата 1 м/сек?

Молекулярная масса SO_2 $M = 80$. Находим значение

$$d_{ЭК} = \frac{4 \cdot 0,67}{110} = 0,0245 \text{ м} = 2,45 \text{ см.}$$

По номограмме 43 для данных условий находим значение $K = 0,102 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт. ст.})$.

Пример 74. Определить объем речной насадки, необходимый для очистки 10 000 м³/ч газа от HF содовым раствором на 95%. Скорость газа в живом сечении скруббера 150 см/сек. Речная насадка состоит из речек толщиной 10 мм с расстоянием между рейками в 20 мм. Свободное сечение такой насадки 0,67 м², а удельная поверхность 66 м²/м³. Температура газа 40 C.

Обозначим парциальное давление HF в газе, поступающем на очистку, через p , мм рт. ст. Тогда парциальное давление HF в очищенном газе будет 0,05 p (при степени улавливания на 95%).

$$\Delta p = \frac{p_1 - 0,05 p_1}{2,31g \frac{p_1}{0,05 p_1}} = \frac{0,95 p_1}{2,31g 20} = 0,316 p_1 \text{ мм рт. ст.}$$

Эту величину можно было найти по номограмме 29.

Количество HF, которое улавливается в аппарате, равно

$$\frac{100000 (p_1 - 0,05 p_1) 20}{760 \cdot 22,4} \approx 11,1 p_1 \text{ кг, ч}$$

(20 — молекулярная масса HF).

Эквивалентный диаметр насадки для данного случая

$$d_{ЭК} = \frac{4 \cdot 0,67}{66} = 0,04 \text{ м} = 4 \text{ см.}$$

По номограмме 44 находим, что при $M = 20$; $d_{ЭК} = 4$ см, $w = 150$ см/сек и $t = 40$ C коэффициент массопередачи $K = 0,036 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт. ст.})$.

Следовательно, требуемая поверхность насадки для очистки газа на 95% равна

$$F = \frac{11,1 p_1}{0,316 p_1 \cdot 0,036} \approx 970 \text{ м}^2,$$

а объем этой насадки

$$V \approx \frac{970}{66} = 14,7 \text{ м}^3.$$

IV. ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ГАЗОВ. КРИТЕРИЙ РЕЙНОЛЬДСА

Плоские диафрагмы

Плоские диафрагмы [18—20] часто применяются для определения расхода газа, проходящего через газоход. Они выполняются в виде листа толщиной 5—8 мм с концентрическим отверстием, внутренняя кромка которого со стороны выхода сточена под углом 45°.

Расчет количества газа производится по формуле

$$\Gamma = \frac{\pi d^2}{4} \alpha \sqrt{\frac{2gh}{\gamma_t}} \text{ м}^3/\text{сек}$$

и.ш

$$\Gamma = \frac{3600 \pi d^2}{4} \alpha \sqrt{\frac{2gh}{\gamma_t}} \text{ м}^3/\text{ч} \quad 12520 d^2 \alpha \sqrt{\frac{h}{\gamma_t}} \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где d — диаметр отверстия в диафрагме, м;

α — коэффициент расхода;

h — перепад статических давлений в дроссельном приборе (разность статических давлений, замкнутых до и после диафрагмы на расстоянии 5—8 мм от нее), кг/м² (мм вод. ст.);

γ_t — удельный вес газа в рабочих условиях у диафрагмы, кг/м³;

g — ускорение силы тяжести, м/сек².

Значение коэффициента α зависит от величины отношения $\frac{d}{D}$ (где D — диаметр газохода) и обычно определяется по справочным таблицам [12, 20]. Эта зависимость показана на диаграмме 44.

При работе с диафрагмами могут возникнуть задачи двух типов:

1. По имеющимся данным о размерах диафрагмы (d и D) и плотности газа требуется определить расход газа при различных значениях Δh или наоборот, какие показания дифференциального манометра будут при различных расходах газа. Эти задачи можно решить, пользуясь формулой (1) и диаграммой 45 или справочной таблицей значений α .

2. Определить, какого размера (диаметра) следует сделать отверстие в диафрагме, через которое проходит газ плотностью ρ_t в количестве V , если известен диаметр газохода и желательно иметь значение h определенной величины (расчет диафрагмы и выбор дифманометра).

Для решения задач второго типа необходимо формулу (1) преобразовать, обозначив $\frac{d^2}{D^2} = m$ и заменив величину d^2 через mD^2 :

$$V = 12520 \alpha m D^2 \sqrt{\frac{h}{\gamma_t}}. \quad (2)$$

По заданным значениям V , D , h и γ_t по формуле (2) находят величины α и m и по справочной таблице (или по диаграмме 45) определяют соответствующее значение величины $\frac{d}{D}$; по ней рассчитывают значение d .

Более просто задачи обоих типов решить при помощи номограммы 46, которая построена по формуле (2).

При этом значения V на вертикальной правой шкале относятся к сплошным линиям, а левой шкалы — к пунктирным линиям. Покажем на примерах порядок пользования номограммами 45, 46 при решении задач обоих типов.

Пример 75. Какое количество газа проходит по газоходу диаметром 280 мм, если на дифманометре диафрагмы с диаметром 224 мм, $h = 425$ мм вод. ст., а газ, проходящий через диафрагму, имеет плотность 0,5 кг/м³? При данных условиях $\frac{d}{D} = \frac{224}{280} = 0,8$.

1. По диаграмме 45 находим, что при $\frac{d}{D} = 0,8$ $\alpha m = 0,49$. Подставляем эту величину в формулу (2):

$$V = 12520 \cdot 0,49 \cdot 0,28^2 \sqrt{\frac{425}{0,5}} = 14000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

2. Этот же ответ получаем по номограмме 46, следуя по пунктирной линии, начиная со значения $h = 425$ мм вод. ст. на верхней горизонтальной шкале.

Пример 76. Какого диаметра нужно поставить диафрагму в газоход, который имеет $D = 1,3$ м, если по газоходу проходит газ плотностью 1,2 кг/м³ и желательно иметь при расходе газа 103000 м³/ч показания на дифференциальном манометре не более 250 мм вод. ст.?

1. По формуле (2) находим величину αm :

$$103000 = 12520 \cdot \alpha m \cdot 1,3^2 \sqrt{\frac{250}{1,2}}, \text{ откуда } \alpha m = 0,34. \text{ По диаграмме 45 находим,}$$

что $\alpha m = 0,34$ соответствует $\frac{d}{D} = 0,7$, следовательно, $d = 0,7 \cdot 1,3 = 0,91$ м.

2. Для нахождения величины d или $\frac{d}{D}$ по номограмме 46 поступаем так. Из точки, соответствующей $h = 250$ мм вод. ст., проводим вертикальную стрелку a . Из точки $103 \cdot 10^3$ правой вертикальной шкалы проводим стрелку b до линии, соответствующих $D = 130$ см; $\rho = 1,2$ кг/м³. Точка пересечения стрелок a и b лежит на кривой, соответствующей искомой величине $\frac{d}{D} = 0,7$. Следовательно, $d = 0,7 \cdot 1,3 = 0,91$ м.

В некоторых случаях в заданиях дается значение плотности газа не в рабочих условиях, а при 0° С и 760 мм рт. ст. Тогда вначале следует найти значение ρ_t (по номограмме 4 или 7), а потом пользоваться номограммой 46. Но можно не определять значение ρ_t , а пользоваться номограммой 47.

Пример 77. Какое количество газа при температуре 300° С проходит по газоходу диаметром $D = 1$ м, если разрежение в газоходе 40 мм рт. ст.; барометрическое давление 740 мм рт. ст.; плотность газа при нормальных условиях $\rho_0 = 1,3$ кг/м³, а на диафрагме диаметром 0,8 м показания дифманометра 350 мм вод. ст.?

По номограмме 47, двигаясь по пунктирным стрелкам, находим, что $V \approx 150000$ м³/ч.

Заметим, что при пользовании этой номограммой обязательно нужно соблюдать порядок движения стрелок, указанный на номограмме:

$$h \rightarrow \frac{d}{D} \rightarrow \rho_0 \rightarrow t^\circ \rightarrow (B \pm p) \rightarrow D \rightarrow V.$$

Пример 78. Какого диаметра нужно поставить диафрагму в газоход диаметром 400 мм, если через него проходит 8000 м³/ч хлора при температуре 100° С и давлении 50 мм рт. ст.? Барометрическое давление 750 мм рт. ст. Показания дифманометра, соединенного с диафрагмой, желательно иметь около 200 мм вод. ст.

Заметим, что плотность хлора при нормальных условиях $\rho_0 = 3,2 \text{ кг/м}^3$.

По номограмме 47 проводим стрелки (сплошной линией), начиная с левой вертикальной шкалы от точки $V = 800$ далее до пунктирной линии $D = 0,4 \rightarrow (B \pm p) = 800 \text{ мм рт. ст.} \rightarrow t = 100^\circ \text{С} \rightarrow \rho_0 = 3,2$, от последней точки до точки пересечения стрелки с линией, проведенной из точки, соответствующей $h = 200 \text{ мм вод. ст.}$ Точка пересечения соответствует значению $\frac{d}{D} \approx 0,77$, т. е. $d = 0,77 \cdot 400 = 308 \text{ мм}$.

Пример 79. Какое будет максимальное показание дифманометра, установленного на острой диафрагме, если $D = 600 \text{ мм}$; $d = 300 \text{ мм}$; $B \pm p = 750 \text{ мм рт. ст.}$; $t = 200^\circ \text{С}$; $\rho_0 = 1,4 \text{ г/см}^3$ и по газоходу за 1 ч проходит 14000 м^3 газа?

Проводя стрелки по номограмме 47, находим $h \approx 310 \text{ мм вод. ст.}$

Сопротивление диафрагмы — потеря давления

Сопротивление диафрагмы (острой), т. е. невосстанавливаемый напор, определяется по формуле

$$\delta_p = \Delta h \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \text{ кг/м}^2 \quad \text{или} \quad \text{мм вод. ст.}, \quad (1)$$

где δ_p — сопротивление диафрагмы (потеря давления), *мм вод. ст.*;
 Δh — перепад давления на диафрагме, *кг/м}^2*;
 $\frac{d}{D}$ — отношение диаметра отверстия в диафрагме к внутреннему диаметру газохода.

По этой формуле построена номограмма 48.

Пример 80. В газоходе диаметром $1,20 \text{ м}$ установлена диафрагма с отверстием диаметром $0,6 \text{ м}$. Каково будет ее сопротивление при перепаде давления 80 мм вод. ст. ?

По номограмме 48 (двигаясь по стрелкам) находим, что $\delta_p = 60 \text{ мм вод. ст.}$

Пример 81. В газоходе диаметром $0,50 \text{ м}$ требуется установить плоскую диафрагму, чтобы при максимальном перепаде давления в 200 мм вод. ст. сопротивление ее было не больше 80 мм вод. ст.

По номограмме 48 находим, что для данного случая диаметр отверстия диафрагмы должен быть равен $0,39 \text{ м}$.

Измерение скорости газа пневмометрическими трубками

Скорость газа определяется при помощи измерения динамического напора $P_{\text{дин}}$ по формуле [48]:

$$w = \sqrt{\frac{2 P_{\text{дин}}}{\rho_t}} \quad \text{м/сек}, \quad (1)$$

где $P_{\text{дин}}$ — динамический напор, *мм вод. ст.*;

$$P_{\text{дин}} = \Delta h K,$$

Δh — показания дифманометра, соединенного с пневмометрической трубкой, *мм вод. ст.*;

K — коэффициент трубки; для трубок Пито — Прайдтля $K \approx 1$, трубок НИИОГАЗа $K \approx 0,48$, цилиндрических трубок Гинцветмета $K \approx 0,5$;

ρ_t — плотность газа при рабочих условиях, *кг. м}^3*.

$$\rho_t = \frac{\rho_0 273 (B \pm p)}{(273 + t) 760}, \quad (2)$$

где ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях, кг/м^3 ;
 B — барометрическое давление, мм рт. ст. ;
 p — давление или разрежение в газоходе, мм рт. ст. ;
 t — температура газа в газоходе.

По формуле (1) с учетом выражения (2) построена номограмма 49.

Пример 81. При измерении скорости газа цилиндрической пневмометрической трубкой с $K = 0,5$ показания дифманометра $\Delta h = 16 \text{ мм вод. ст.}$

Температура газа $200 \text{ }^\circ\text{C}$, барометрическое давление $B = 755 \text{ мм рт. ст.}$, разрежение в газоходе 68 мм вод. ст. , плотность газа при нормальных условиях $1,4 \text{ кг/м}^3$. Вначале находим

$$p_{\text{диф}} = 0,5 \cdot 16 = 8 \text{ мм вод. ст.},$$

$$(B \pm p) = 755 - \frac{68}{13,6} = 750 \text{ мм рт. ст.}$$

После этого по номограмме 49 находим, что $w = 14 \text{ м/сек.}$

Пример 82. Какое будет показание дифманометра, если скорость газа в газоходе 10 м/сек. , $B \pm p = 800 \text{ мм рт. ст.}$, температура 17°C и $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$, а коэффициент пневмометрической трубки $K = 0,48$?

По номограмме 49 находим, для для заданных условий

$$p_{\text{диф}} = 6,7 \text{ мм вод. ст.},$$

$$\Delta h = \frac{6,7}{0,48} \approx 14 \text{ мм вод. ст.}$$

Точки замеров при снятии поля скоростей

Сечение газохода делят на n колец, равновеликих по площади, и делают замеры в середине ширины каждого кольца. Места этих замеров определяют по формуле

$$l_x = R \sqrt{\frac{2x-1}{2n}}, \quad (1)$$

где l_x — расстояние точки замера от центра газохода, мм ;
 R — радиус газохода, мм ;
 n — число, на которое разделена площадь сечения газохода;
 x — порядковый номер кольца.

По формуле (1) построена номограмма 50. Порядок пользования этой номограммой следующий. На оси абсцисс находят точку, соответствующую радиусу газохода, и из нее проводят вертикаль до пересечения с линией, соответствующей заданному n ; из точки пересечения проводят горизонталь до линии, соответствующей $x = n$. Абсциссы точек пересечения горизонталей с линиями дают искомые значения.

Пример 83. Газоход диаметром 950 мм разделен на пять равновеликих колец. В каких точках следует устанавливать пневмометрическую трубку при снятии поля скоростей?

На номограмме 50 проводим вертикаль от точки, соответствующей $R = 425 \text{ мм}$, до пересечения с линией, соответствующей $n = 5$, и от точки пересечения проводим горизонталь до пересечения с линиями, соответствующими $x = 1$; $x = 2$; $x = 3$; $x = 4$ и $x = 5$. Абсциссы этих точек равны искомым расстояниям точек замера от центра газохода 134 ; 230 ; 300 ; 356 и 402 мм .

Измерение скорости газа с помощью малых (авиационных) трубок Вентури

При применении в качестве пневмометрической трубки малых трубок Вентури [19] скорость газа определяется по формуле

$$v = \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\gamma_t \cdot \left[\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^4 - 1 \right]}} \quad (1)$$

где v — скорость газа, *м/сек*;

Δp — разность статических давлений в газоходе и узком сечении трубки Вентури, *мм вод. ст.* (кг/м^2);

γ_t — удельный вес газа в рабочих условиях газохода, кг/м^3 ;

r_1 — радиус входного отверстия трубки Вентури, *мм*;

r_2 — радиус суженного места трубки, *мм*.

Заменив γ_t через γ_0 , получим

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0 273 (B \pm p)}{(273 + t) 760} \text{ кг/м}^3,$$

где γ_0 — удельный вес газа при нормальных условиях, кг/м^3 ;

t — температура газа в газоходе, $^{\circ}\text{C}$;

B — барометрическое давление, *мм рт. ст.*;

p — давление или разрежение в газоходе, *мм рт. ст.*;

$$v = \sqrt{\frac{2g\Delta p (273 + t) 760}{\gamma_0 273 (B \pm p) \left[\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^4 - 1 \right]}} = 7.37 \sqrt{\frac{\Delta p (273 + t)}{\gamma_0 (B \pm p) \left[\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^4 - 1 \right]}} \quad (2)$$

Помограмма 51 построена по этой формуле.

Пример 84. В газоходе при $t = 300^{\circ}\text{C}$ и $p = -5$ *мм рт. ст.* при помощи трубки Вентури с отношением $\frac{r_1}{r_2} = 1.80$ определяется скорость газа. При этом $\Delta p = 30.5$ *мм вод. ст.*, $\rho_0 = 1.3$ кг/м^3 , $B = 745$ *мм рт. ст.*

По помограмме 51 находим, что в этом случае $v = 10.2$ *м/сек.*

Пример 85. Какое будет показание дифманометра, соединенного с малой трубкой Вентури, помещенной в газовый поток с температурой 400°C ; $B \pm p = 750$ *мм рт. ст.*, плотность газа при нормальных условиях 1.4 кг/м^3 и скорость 20 *м/сек*, если $\frac{r_1}{r_2} = 1.5$?

По помограмме, двигаясь от точки, соответствующей $v = 20$ *м/сек*, по пунктирным стрелкам, находим, что $\Delta p \approx 46.5$ *мм вод. ст.*

Измерение количества газа при помощи коллектора

При поступлении газа из свободного пространства, в котором скорость газа равна нулю, в газоход через коллектор, имеющий угол 45° , его количество определяется по формуле

$$w_{cp} = \sqrt{\frac{2g p_{ст}}{1.15 \gamma}} \quad (1)$$

где w_{cp} — средняя скорость газа в газоходе, *м/сек*;

$p_{ст}$ — статическое давление (разрежение), замеренное на расстоянии D от начала газохода, *мм вод. ст.*;

D — диаметр газохода (трубы коллектора), *м*.

Объем газа, проходящего через трубу коллектора,

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 3600w - 41\,650D^2 \sqrt{\frac{p_{ст}}{\gamma}} \quad (2)$$

Номограмма 52 построена по формулам (1) и (2).

Заметим, что для диаметров, в 10 раз меньших указанных на номограмме, объем будет меньше в 100 раз.

Пример 86. Через коллектор диаметром 600 мм атмосферный воздух поступает в вентилятор. При $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ показания манометра коллектора 29 мм вод. ст. Какое количество воздуха поступает в вентилятор и какая средняя скорость воздуха в коллекторе?

По номограмме, двигаясь по стрелкам, находим: $w \approx 20 \text{ м/сек}$ и $V = 20500 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Пример 87. Какой объем газа проходит через коллектор диаметром 75 мм, если $\rho = 1,4 \text{ кг/м}^3$ и $p_{ст} = 45 \text{ мм вод. ст.}$?

По номограмме 52 находим при $D = 750 \text{ мм}$ для заданных условий $V = 37 \cdot 10^3$; следовательно, искомая величина будет в 100 раз меньше, т. е. $370 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Динамический напор газового потока

При расчетах гидравлических сопротивлений требуется знать величину динамического напора газового потока:

$$p = \frac{w^2 \gamma}{2g} \kappa \Gamma' \text{ м}^2, \quad (1)$$

где w — скорость газа, м/сек ;

γ — удельный вес газа в рабочем состоянии, $\kappa \Gamma' \text{ м}^3$;

g — ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$.

Обычно бывает известна плотность газа γ_0 при нормальных условиях, т. е. при температуре 0°С и давлении 760 мм рт. ст. Пересчет плотности γ_0 к конкретным условиям можно сделать по номограмме 4 или по формуле

$$\gamma = \frac{\gamma_0 273 B}{T 760}, \quad (2)$$

где T — абсолютная температура газа, $^\circ \text{К}$;

B — давление, при котором находится газ, мм рт. ст.

Для нахождения величины динамического напора можно воспользоваться номограммой 53, которая построена по формуле (1) с учетом выражения (2).

Пример 88. Найти величину динамического напора для газового потока, движущегося со скоростью 15 м/сек, если температура газа $t = 150^\circ \text{С}$; давление 800 мм рт. ст., удельный вес его при нормальных условиях $\gamma_0 = 1,4 \text{ кг/м}^3$.

На номограмме 53, двигаясь по стрелкам, находим значение динамического напора 11 мм вод. ст.; заметим, что 1 мм вод. ст. = 9,80665 н/м².

Критерий Рейнольдса

Величина критерия Рейнольдса часто встречается в инженерных расчетах, связанных с вопросами гидроаэродинамики, тепло- и массопередачи и ряда других. Величина этого критерия определяется по формуле

$$Re = \frac{wd \rho}{\mu} = \frac{wd}{\nu}, \quad (1)$$

где w — скорость газа, $м/сек$;

d — диаметр газохода (аппарата), по которому движется газ, $м$;

ρ — плотность газа, $кг/м^3$;

μ — динамическая вязкость газа, $кг/м \cdot сек$;

g — ускорение силы тяжести, $м/сек^2$;

ν — кинематическая вязкость, $м^2/сек$.

Критерий Re — величина безразмерная, поэтому все входящие в формулу (1) величины могут быть взяты в любой, но обязательно в одной и той же системе единиц.

Большинство газов, встречающихся в технике (дымовые, металлургические), по своему составу близко к воздуху (около 75—80% N_2), а остальные компоненты по значению кинематической вязкости как бы компенсируют друг друга, поэтому с точностью, обычно достаточной для технических расчетов, можно принимать для таких газов кинематическую вязкость равной кинематической вязкости воздуха.

Основываясь на этом допущении, построена номограмма 54, по которой легко найти значение критерия Рейнольдса, скорости при заданных значениях Re и d или значение диаметра по заданным Re и w .

Пример 89. Требуется найти значение критерия Re для воздуха, имеющего температуру $200^\circ C$, который движется по газоходу диаметром 700 мм со скоростью 24 м/сек.

На номограмме 54 на линии t находим точку, соответствующую температуре $200^\circ C$, и на линии w точку, соответствующую скорости 24 м/сек. Соединяем эти точки прямой линией и точку пересечения этой линии со вспомогательной линией соединяем прямой с точкой, соответствующей 700 мм на линии диаметров. Эта линия пересекает линию Re в точке, соответствующей $Re = 4,9 \cdot 10^5$.

Пример 90. Требуется найти, при какой скорости газ, имеющий температуру $1000^\circ C$ и движущийся по газоходу диаметром 200 мм, будет находиться в области турбулентного движения ($Re > 2300$)?

На номограмме 54 прикладываем линейку (мысленно проводим прямую линию) к точкам $D = 200$ мм и $Re = 2300$ и на вспомогательной линии делаем отсчет, затем прикладываем линейку к этой точке и точке, соответствующей $t = 1000^\circ C$, и на линии w делаем отсчет, $w \approx 2$ м/сек.

Пример 91. При каком диаметре газохода газ, имеющий температуру $20^\circ C$ и скорость 12 м/сек, будет иметь критерий $Re = 100\,000$?

На номограмме 54 проводим прямую между точками $t = 20^\circ C$ и $w = 12$ м/сек. Точку пересечения этой прямой со вспомогательной линией соединяем прямой линией с точкой $Re = 10^5$ и продолжаем прямую до пересечения с линией диаметров в точке $D = 125$ мм.

V. ПЫЛЕГАЗОВЫЕ ЗАМЕРЫ

Выбор диаметра наконечника заборной трубки Гинцветмета

Этот диаметр выбирается из соображений обеспечения изокINETИЧНОСТИ газа в наконечнике и газоходе и обеспечения скорости газа в канале трубки в интервале 10—15 м/сек при диаметре канала в 6 мм. Формула для расчета диаметра наконечника [48]:

$$d = \frac{24}{\sqrt{w_r}}. \quad (1)$$

Так как

$$w_r = \sqrt{\frac{2gr_{\text{дин}}}{\gamma t}} = \sqrt{\frac{2gr_{\text{дин}} 760 (273 + t_r)}{\gamma_0 (B \pm p) 273}},$$

то, подставив это значение w_r в формулу (1) и заметив, что в большинстве случаев $\gamma_0 \approx 1,3$, получим после подстановки и преобразования

$$d \approx 9,44 \sqrt[4]{\frac{B \pm p}{r_{\text{дин}} (273 + t_r)}} \text{ мм}, \quad (2)$$

где B — барометрическое давление, мм рт. ст.;

p — давление или разрежение в газоходе, мм рт. ст.;

$r_{\text{дин}}$ — динамический напор, мм вод. ст.;

t_r — температура газа в газоходе, °С.

По формуле (2) построена номограмма 55.

Пример 92. Показания микроанометра, соединенного с пневмометрической трубкой. 24 мм вод. ст. Коэффициент трубки 0,5. Какой диаметр наконечника следует взять для обеспечения изокINETИЧНОСТИ, если температура газа в газоходе 100° С, а $(B \pm p) = 800$ мм рт. ст.?

Находим

$$r_{\text{дин}} = 24 \cdot 0,5 = 12 \text{ мм вод. ст.}$$

По номограмме 55 для заданных условий находим диаметр отверстия в наконечнике заборной трубки $d = 6,15$ мм.

**Показания реометра
с миллиметровой шкалой
при отборе запыленного газа
на фильтрацию вне газохода
при соблюдении изокINETИЧНОСТИ**

Для обеспечения изокINETИЧНОСТИ при применении диафрагмы с коэффициентом ¹ с показания дифманометра рассчитываются по формуле [19]:

$$H = 0,046 \frac{d^4}{c^2} P_{\text{дин}} \frac{(273 + t_p)(B \pm p_r)}{(273 + t_r)(B \pm p_p)} \text{ мм вод. ст.}, \quad (1)$$

где d — диаметр наконечника заборной трубки, мм (см. номограмму 55);

$P_{\text{дин}}$ — динамический напор газа, мм вод. ст.;

t_p — температура газа у реометра (диафрагмы), °C;

t_r — температура газа в газоходе, °C;

B — барометрическое давление, мм рт. ст.;

p_r — давление (разрежение) в газоходе, мм рт. ст.;

p_p — разрежение у реометра (диафрагмы), мм рт. ст.;

H — показания дифманометра диафрагмы, мм вод. ст.

По формуле (1) построена номограмма 56.

Пример 93. В газоходе, из которого требуется отобрать запыленный газ для фильтрации вне газохода, температура 20° C и давление 50 мм рт. ст.

Какое показание следует держать на дифманометре, соединенном с реометром диафрагмой, коэффициент которой $c = 1,53$, если диаметр отверстия наконечника 6,9 мм, а барометрическое давление 750 мм рт. ст., температура реометра 30° C и разрежение у реометра во время отбора пробы $p_p = 250$ мм рт. ст. и $P_{\text{дин}} = 3$ мм вод. ст.?

На шкале коэффициентов диафрагмы c находим точку, соответствующую значению $c = 1,53$, а на шкале диаметров d — точку 6,9 мм.

Через эти две точки проводим прямую линию до пересечения со вспомогательной шкалой $\frac{d^4}{c^2}$ и далее проводим стрелки по горизонталям и вертикалям так, как это показано на номограмме, — через точки пересечения с линиями, соответствующими $t_r = 20^\circ \text{ C}$; $t_p = 30^\circ \text{ C}$, $(B \pm p_p) = 750 - 250 = 500$; $(B \pm p_r) = 750 + 50 = 800$ и $P_{\text{дин}} = 3$ мм вод. ст. Находим, что H должно быть равно ≈ 220 мм вод. ст.

Пример 94. По номограмме 55 было найдено, что диаметр поиска патрона равен 4,6 мм при $(B \pm p) = 750$ мм рт. ст., $t_r = 40^\circ \text{ C}$ и $P_{\text{дин}} = 5$ мм вод. ст. Какую диафрагму следует установить на реометре, если желательно иметь показания H около 300 мм вод. ст. при $(B \pm p_p) = 550$ мм рт. ст. и $t_p = 40^\circ \text{ C}$?

По номограмме 56, проводя стрелки в направлении, обратном тому, как это было сделано в предыдущем примере, найдем, что $c \approx 0,45$.

При работе с номограммой следует помнить очередность проведения линий во втором квадранте: при прямом ходе вначале необходимо вести прямые до пересечения с линией t_r , потом с линией t_p , при обратном движении — наоборот.

¹ Коэффициент c определяется формулой

$$V \text{ л/мин} = c \cdot \sqrt{\frac{H}{\rho t}}$$

**Объем газа
при нормальных условиях,
проходящий через реометр
с миллиметровой шкалой**

Этот объем определяется по формуле [18]:

$$V_0 = 0,58 c \sqrt{\frac{H(B-p_p)}{\rho_0(273+t_p)}} \text{ л/мин,} \quad (1)$$

где V_0 — объем газа, прошедшего через реометр за 1 мин, л/мин;
 H — показания дифманометра, соединенного с диафрагмой,
 мм вод. ст.;
 B — барометрическое давление, мм рт. ст.;
 p_p — разрежение у реометра, мм рт. ст.;
 t_p — температура газа в реометре, °С;
 c — коэффициент диафрагмы.

По формуле (1) построена номограмма 57.

Порядок нахождения значения V_0 следующий. Проводят прямую между точками, соответствующими заданным значениям H и C , и на вспомогательной вертикальной шкале отмечают точку пересечения. От этой точки проводят стрелки горизонтально и вертикально до пересечения с линиями, соответствующими заданным значениям $(B-p_p)$; t_p и V_0 .

Пример 95. Какое количество газа прошло через диафрагму, коэффициент которой $c = 1,5$, если при $t_p = 40^\circ\text{С}$, $(B - p_p) = 400$ мм рт. ст. и $\rho_0 = 1,2$ кг/м³, показание дифманометра было 260 мм вод. ст.?

По номограмме 57 находим: $V_0 \approx 14,6$ л/мин.

Пример 96. Какое показание требуется держать на дифманометре диафрагмы, коэффициент которой 0,9, если требуется через нее пропускать 10 л/мин воздуха (при нормальных условиях), рабочее состояние воздуха у диафрагмы $(B - p_p) = 700$ мм рт. ст.; $t = 60^\circ\text{С}$; $\rho_0 = 1,3$ кг/м³?

По номограмме 57, проводя линии в направлении, обратном тому, как это делалось в предыдущем примере, найдем: $H \approx 225$ мм вод. ст.

**Определение объема пробы
завыленного газа по реометру
со шкалой, калиброванной
на определенное значение
плотности газа,
при соблюдении изокинетичности**

Реометры, выпускаемые промышленностью, обычно имеют шкалу, которая градуирована для определенной плотности газа. При работе с таким реометром для соблюдения изокинетичности объем газа по шкале реометра следует определять по следующей формуле [18]:

$$V_{\text{ш}} = 0,208 d^2 \sqrt{\frac{P_{\text{дин}}(273+t_p)(760 \pm P_r)}{\gamma_{\text{к}}(273+t_r)(760 \pm P_p)}} \text{ л/мин,} \quad (1)$$

где $V_{\text{ш}}$ — объем газа по шкале реометра, л/мин;
 d — диаметр наконечника или отверстия патрона, мм;
 $P_{\text{дин}}$ — динамический напор, создаваемый газовым потоком в местах отбора пробы завыленного газа, кг/м² (мм вод. ст.);

t_p — температура газа в реометре, °С;
 t_r — температура газа в газоходе, °С;
 B — барометрическое давление, мм рт. ст.;
 p_p — разрежение (давление) газа в реометре, мм рт. ст.;
 p_r — разрежение газа в газоходе, мм рт. ст.;
 γ_k — удельный вес газа, для которого дана шкала реометра, кг/м³.
 По формуле (1) построена номограмма 58.

Пример 97. Требуется отобрать на внешнюю фильтрацию пробу запыленного газа, температура которого 200° С, а давление в газоходе +136 мм вод. ст. В точке отбора пробы газа динамический напор 15 мм вод. ст.

Заборная трубка имеет наконечник с диаметром в 5,5 мм. Температура реометра 20° С, барометрическое давление 740 мм рт. ст. Предварительным опытом установлено, что отбор пробы газа целесообразно проводить при разрежении у реометра $p_p = -140$ мм рт. ст. В распоряжении работающего имеется реометр, шкала которого градуирована по воздуху при 20° С и давлении 755 мм рт. ст.

Предварительно заметим, что при температуре 20° С и давлении 755 мм рт. ст. плотность воздуха $\rho_k = 1,2$ кг/м³. После этого по номограмме 58 находим значение $V_{ш}$ следующим способом. Проводим прямую линию между точками, соответствующими $p_{ши} = 15$ мм вод. ст. и $d = 5,5$ мм, и отмечаем точку пересечения этой прямой со вспомогательной шкалой. От найденной точки проводим стрелки горизонтально и вертикально до пересечения с соответствующими линиями $t_r = 200°$ С; $t_p = 20°$ С, $(B - p_p) = 740 - 140 = 600$ мм рт. ст., $(B \pm p_r) = 740 + \frac{136}{13,6} = 755$ мм рт. ст. и $\rho_k = 1,2$ кг/м³. Искомое значение $V_{ш} = 19,4$ л/мин.

Приведение показаний шкалы реометра к нормальному состоянию газа и использование реометров в других условиях (для другого газа)

Обычно заводские реометры снабжены шкалой расхода газа, которая отвечает вполне определенному значению плотности газа, например для воздуха с плотностью 1,2 кг/м³ (20° С и 755 мм рт. ст.). Практически же приходится работать при других плотностях, температурах и давлениях, а в некоторых случаях даже применять реометры, шкала которых предназначена для другого газа. Поэтому желательно иметь возможность, во-первых, пересчитывать значения шкалы реометра к объему, приведенному к нормальным условиям, и, во-вторых, делать пересчет объема газа при одном значении плотности к другому. Эти пересчеты можно делать, пользуясь следующей зависимостью¹:

$$V_{ш} = V_p \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_k}}, \quad (1)$$

$V_{ш}$ — объем газа, указанный на шкале реометра, л/мин;
 V_p — действительный объем газа, проходящий через реометр при рабочих условиях, л/мин;
 ρ_p — плотность газа, проходящего через реометр при рабочих условиях, кг/м³;
 ρ_k — плотность газа, для которого дана шкала реометра, кг/м³.

Для перевода показаний шкалы реометра к объему при нормальных условиях служит формула

$$V_0 = 0,6 V_{ш} \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_0} \cdot \frac{(B - p_p)}{(273 + t_p)}} \text{ л/мин}, \quad (2)$$

¹ Для некапиллярных реометров.

где ρ_0 — плотность газа, проходящего через реометр, при нормальных условиях, кг/м^3 ;

B — барометрическое давление, мм рт. ст. ;

p_p — разрежение в реометре, мм рт. ст. ;

t_p — температура газа в реометре, $^{\circ}\text{C}$;

V_0 — объем газа, проходящего через реометр, приведенный к нормальным условиям, л/мин .

По формуле (2) построена номограмма 59. При работе с этой номограммой следует учесть, что значения плотности на шкалах реометров приняты для комнатных условий $t = 20^{\circ}\text{C}$, $(B \pm p) \approx 750 \div 755 \text{ мм рт. ст.}$

Пример 98. При отборе пробы запыленного газа на фильтрацию использовали реометр, шкала которого соответствует $\rho_K = 1,2 \text{ кг/м}^3$; при этом по реометру (по его шкале) отбирали 14 л/мин газа. Сколько фактически отбирали газа, если температура газа в реометре была 40°C , барометрическое давление 765 мм рт. ст. , разрежение у реометра 215 мм рт. ст. , а плотность газа $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ (воздух)?

По номограмме 59 находим, что в данных условиях через реометр фактически проходило $V_0 = 10,7 \text{ л/мин}$ газа.

Пример 99. Имеется реометр, градуированный на хлор при комнатных условиях ($\rho_K = 3,0 \text{ кг/м}^3$). На каком делении этого реометра нужно держать показания, если желательно через него пропускать не хлор, а кислород в количестве $V_0 = 25 \text{ л/мин}$ и во время работы в реометре будет $(B - p) = 750 \text{ мм рт. ст.}$ и $t = 20^{\circ}\text{C}$?

По номограмме 59, проводя стрелки от $V_0 = 25$ до линий, соответствующих $t_p = 20^{\circ}\text{C}$, $(B - p_p) = 750 \text{ мм рт. ст.}$, $\rho_0 = 1,43 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_K = 3 \text{ кг/м}^3$, находим, что показание по шкале реометра должно быть $\approx 18,0 \text{ л/мин}$.

Выбор диаметра отверстия носика патрона при определении запыленности методом внутренней фильтрации

Этот диаметр выбирается из соображения, с одной стороны, обеспечения изокипетичности газа в отверстии носика и в газозохе, а с другой стороны — из условий пропускной способности фильтровального патрона [18]:

$$d \approx 7,7 \sqrt{\frac{V'_0 (273 + t_r)}{w_r (B \pm p_r)}}, \quad (1)$$

где d — диаметр отверстия в носике патрона, мм ;

V'_0 — пропускная способность фильтровального патрона при нормальных условиях, л/мин ;

t_r — температура газа в газозохе, $^{\circ}\text{C}$;

B — барометрическое давление, мм рт. ст. ;

p_r — давление или разрежение в газозохе, мм рт. ст. ;

w_r — скорость газа в газозохе, м/сек .

Заменяем значение

$$w_r = \sqrt{\frac{2g r_{\text{дин}}}{\gamma t}}, \quad (2)$$

где g — ускорение силы тяжести, м/сек^2 ;

$r_{\text{дин}}$ — динамический напор газа, кг/м^2 (мм вод. ст.);

γt — плотность газа, кг/м^3 .

Для большинства случаев можно с достаточной степенью точности принять, что плотность газа при нормальных условиях равна примерно $1,3 \text{ кг/м}^3$, тогда

$$\gamma t = \frac{1,3 \cdot 273 (B \pm p)}{(273 + t_r) 760} \quad (3)$$

Подставляя значение γt в формулу (2) и значение w_r в формулу (1), после преобразования получим

$$d \approx 3,02 \sqrt[4]{\frac{V_0'^2 (273 + t_r)}{p_{\text{дин}} (B \pm p_r)}} \text{ мм.} \quad (4)$$

По этой формуле построена номограмма 60.

Пример 100. В Газоходе при температуре газа 500°C , $p_{\text{дин}} = 15 \text{ мм вод. ст.}$. Определить, какой нужно выбрать диаметр носика в фильтровальном патроне, если $(B - p_r) = 630 \text{ мм рт. ст.}$ и известно, что $V_0' = 5 \text{ л/мин}$?

По номограмме 60, двигаясь по стрелкам, находим $d \approx 3,6 \text{ мм}$.

Пример 101. Имеется патрон для отбора пробы запыленного газа методом внутренней фильтрации с диаметром носика $6,5 \text{ мм}$. При каком значении динамического напора можно применить этот патрон, обеспечивая изокINETичность, если температура газа 300°C , $(B \pm p) = 750 \text{ мм рт. ст.}$ и $V_0' = 7 \text{ л/мин}$?

По номограмме 60 находим: $p_{\text{дин}}$ должно быть равно $\approx 1,8 \text{ мм вод. ст.}$

Пример 102. Какую пропускную способность должен иметь фильтр для виспней фильтрации, если требуется отобрать газ с соблюдением изокINETичности и если параметры газа в месте отбора пробы $t_r = 300^\circ \text{C}$, $(B \pm p) = 800 \text{ мм рт. ст.}$, $p_{\text{дин}} = 20 \text{ мм вод. ст.}$, а диаметр отверстия в применяемом наконечнике 4 мм ?

На номограмме 60 проводим стрелки от точки, соответствующей $d = 4 \text{ мм}$, до пересечения с линиями, соответствующими $(B \pm p) = 800 \text{ мм рт. ст.}$, $t_r = 300^\circ \text{C}$ и далее до встречи с перпендикуляром, проведенным из точки $p_{\text{дин}} = 20 \text{ мм вод. ст.}$. Точка встречи этих стрелок лежит примерно на линии, отвечающей $V_0 \approx 9,1 \text{ л/мин}$.

Психрометр на расстоянии

Для определения влажности газа наиболее часто применяют так называемый психрометр на расстоянии. В этом приборе газ, влажность которого требуется определить, протягивают через прибор, состоящий из сухого и влажного термометров, и отмечают их показания.

Давление в психрометре сильно отличается от атмосферного и от давления газа в том месте газохода, в котором производится замер, поэтому искомое значение парциального давления водяных паров следует вычислять по формуле [4]:

$$p = \frac{[p_{\text{вл}} - 0,000662 (t_{\text{сух}} - t_{\text{вл}}) (B \pm p_{\text{пс}})] (B \pm p_{\text{газ}})}{(B \pm p_{\text{пс}})} \text{ мм рт. ст.,}$$

где $p_{\text{вл}}$ — давление насыщенного водяного пара при температуре влажного термометра, мм рт. ст. ;

B — барометрическое давление, мм рт. ст. ;

$p_{\text{газ}}$ — давление или разрежение в газоходе, в котором требуется определить влажность, мм рт. ст. ;

$p_{\text{пс}}$ — давление или разрежение (по отношению к барометрическому) в психрометре, мм рт. ст. ;

$t_{\text{сух}}$ и $t_{\text{вл}}$ — температура сухого и влажного термометров.

Для определения точки росы следует в справочных таблицах по найденному значению p найти $t_{\text{росы}}$.

Для определения относительной влажности следует найденную величину p разделить на значение упругости водяных паров, соответствующее $t_{\text{сух}}$ (по справочным таблицам).

По формуле (1) построена номограмма 61, по которой можно определить значения p , $t_{\text{росы}}$, Φ , не производя вычислений и не имея справочных таблиц.

Порядок определения этих величин по номограмме 61 следующий (см. направление стрелок на номограмме).

На верхней горизонтальной шкале находят точку, соответствующую $t_{\text{вл}}$, и от нее проводят вертикаль до пересечения с линией заданного значения ($B \pm p_{\text{газ}}$). От точки пересечения проводят горизонталь до пересечения с линией заданного значения ($B \pm p_{\text{ис}}$), от этой точки пересечения опускают вертикальную линию до оси абсцисс и далее проводят наклонную линию параллельно нанесенной сетке до пересечения в точке a с другой горизонтальной стрелкой, проведенной следующим способом: на средней горизонтальной шкале находят заданное значение разности ($t_{\text{сух}} - t_{\text{вл}}$), от этой точки проводят вниз вертикально до пересечения с линией заданного значения ($B \pm p_{\text{газ}}$) и далее горизонталь до встречи с наклонной стрелкой в точке a . Абсцисса точки a на нижней шкале дает значения точки росы и искомого p .

Для определения Φ следует от найденной точки опустить вертикаль до пересечения в точке b с горизонталью, соответствующей температуре сухого термометра (нижняя левая шкала).

Пример 103. Психрометр на расстоянии дал показания $t_{\text{сух}} = 55^\circ \text{C}$; $t_{\text{вл}} = 41^\circ \text{C}$.

Барометрическое давление 745 мм рт. ст.; давление в газоходе 5 мм рт. ст. В психрометре при проведении замера было разрежение 145 мм рт. ст.

По номограмме 61 (смотри стрелки) находим, что при данных условиях парциальное давление водяных паров в газе, находящемся в газоходе, равно $p = 63,5$ мм рт. ст., что соответствует точке росы $\approx 43,2^\circ \text{C}$ и $\Phi = 55\%$ (экстраполяция).

ЛИТЕРАТУРА

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Госэнергоиздат, 1960.
2. Справочник химика, т. I. Госхимиздат, 1959.
3. Справочник химика, т. III, Госхимиздат, 1952.
4. Левинсон И. Н. *I — e — w*. Измерение и расчет влажного воздуха. Спабтехиздат, 1933.
5. Нагорский Д. В. Общая методика расчета печей. Изд. АН СССР, 1944.
6. Справочник металлурга по цветным металлам. Металлургиздат, 1953.
7. Справочник технологических предприятий черной металлургии, т. I. Металлургиздат, 1953.
8. Баранова И. А. Журнал прикладной химии, № 2, 1958.
9. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Госхимиздат, 1950.
10. Романков П. Г. Гидравлические процессы химической технологии. Госхимиздат, 1950.
11. Фукс Н. А. Механика аэрозолей, Изд. АН СССР, 1955.
12. Лященко П. В. Гравитационные методы обогащения. Гостоптехиздат, 1940.
13. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Госхимиздат, 1956 (Всесоюзный трест «Газочистка»).
14. Батарейные циклоны. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Госхимиздат, 1955.
15. Шпеерсон Б. А. Электрическая очистка газов. Металлургиздат, 1950.
16. Позин Н. Е., Мухленов И. Л., Тумаркина Е. С., Тарах Э. Л. Пенный способ обработки газов и жидкостей. Госхимиздат, 1955.
17. Пейсахов И. Л. Номограмма для определения коэффициента скорости абсорбции хорошо растворимых газов. Химическая промышленность № 7, 1951.
18. Гордон Г. М. и Пейсахов И. Л. Контроль пылеулавливающих установок. Металлургиздат, 1961.
19. Правила 27-54 по применению и проверке расходомеров с нормальными диафрагмами, соплами и трубками Венгури. Машгиз, 1955.
20. Макаров А. И. и Шерман М. Я. Расчет измерительных и регулирующих устройств. Металлургиздат, 1953.

Коэффициенты пересчета в единицы системы СИ

| Прежние и внесистемные единицы | Единицы системы СИ | Единицы системы СИ | Прежние и внесистемные единицы |
|-------------------------------------|--|------------------------------|---|
| Единицы длины | | | |
| 1 микрон (мк) | 1 микрометр (мкм) = $= 10^{-6} \text{ м}$ | 1 метр (м) | 10^6 мк |
| 1 ангстрем (Å) | 0,1 нм = 10^{-10} м | 1 метр (м) | 10^{10} Å |
| Единицы объема | | | |
| 1 литр (л) | $1,000028 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ | 1 м ³ | 999,97 л |
| Единицы массы | | | |
| 1 тонна (т) | 1000 кг | 1 кг | 0,001 т |
| 1 центнер (ц) | 100 кг | 1 кг | 0,01 ц |
| 1 карат | $2 \cdot 10^{-4} \text{ кг} = 0,2 \text{ г}$ | 1 кг | 5000 карат |
| Единицы плоского угла | | | |
| 1 градус (°) | $\frac{\pi}{180} \text{ рад} = 0,017453 \text{ рад}$ | 1 радиан (рад) | $\frac{180^\circ}{\pi}$ |
| 1 минута (') | $\frac{\pi}{180} \cdot 10^{-2} \text{ рад} = 2,90888 \times 10^{-4} \text{ рад}$ | 1 радиан | $\frac{180^\circ}{\pi} \cdot 10^2$ |
| 1 секунда (") | $\frac{\pi}{648} \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 4,84814 \times 10^{-6} \text{ рад}$ | 1 радиан | $\frac{648^\circ}{\pi} \cdot 10^3$ |
| Единицы угловой скорости | | | |
| 1 оборот в минуту (об/мин) | $\frac{\pi}{30} = 0,10472 \text{ рад/сек}$ | 1 радиан в секунду (рад/сек) | $\frac{30}{\pi} = 9,549 \text{ об/мин}$ |
| 1 оборот в секунду (об/сек) | $2\pi = 6,2822 \text{ рад/сек}$ | 1 радиан в секунду (рад/сек) | $\frac{1}{2\pi} = 0,1591 \text{ об/сек}$ |
| Единицы силы | | | |
| 1 тонна-сила (тс, Т) | 9806,65 н | 1 н | $0,101971 \cdot 10^{-3} \text{ Т}$ ($0,102 \cdot 10^{-3} \text{ Т}$) |
| 1 килограмм сила (кгс, кГ) | 9,80665 н (~9,81 н) | 1 н | 0,101971 кГ (~0,102 кГ) |
| 1 дина (дин) | 10^{-5} н | 1 н | 100 000 дин |
| Единицы работы и энергии | | | |
| 1 килограмм-сила-метр (кгс·м, кГ·м) | 9,80665 н·м (~9,81 н·м) | 1 н·м | 0,101971 кГ·м (~0,102 кГ·м) |
| 1 килограмм-сила-метр (кгс·м, кГ·м) | 9,80665 дж (~9,8 дж) | 1 дж | 0,101971 кГ·м (~0,102 кГ·м) |
| 1 лошадиная сила-час (л. с·ч) | $2,648 \cdot 10^6 \text{ дж}$ | 1 дж | $0,3776 \cdot 10^{-6} \text{ л. с·ч}$ |
| 1 киловатт-час (квт·ч) | $3,6 \cdot 10^6 \text{ дж}$ | 1 дж | $0,27777 \cdot 10^{-6} \text{ квт·ч}$ |
| 1 эрг (эрг) | 10^{-7} дж | 1 дж | 10^7 эрг |
| 1 килокалория (ккал) | $4186,8 \text{ дж} = 4,1868 \text{ кдж}$ (~4,2 кдж) | 1 дж | $23885 \cdot 10^{-8} \text{ ккал}$ |
| 1 электронвольт (эв) | $1,60207 \cdot 10^{-19} \text{ дж}$ | 1 кдж 1 дж | $23885 \cdot 10^{-5} \text{ ккал}$ $0,62419 \cdot 10^{19} \text{ эв}$ |
| 1 килоэлектронвольт (кэв) | $1,60207 \cdot 10^{-16} \text{ дж}$ | 1 дж | $0,62419 \cdot 10^{16} \text{ кэв}$ |
| 1 мегаэлектронвольт (Мэв) | $1,60207 \cdot 10^{-13} \text{ дж}$ | 1 дж | $0,62419 \cdot 10^{13} \text{ Мэв}$ |

| Прежние и внесистемные единицы | Единицы системы СИ | Единицы системы СИ | Прежние и внесистемные единицы |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|

Единицы мощности

| | | | |
|----------------------------|------------------------|----------------|------------------|
| 1 кгс·м/сек (кГ·м, сек) | 9,80665 вт (н·м/сек) | 1 вт (н·м/сек) | 0,10197 кГ·м/сек |
| 1 л. с. | 735,499 вт (н·м/сек) | 1 вт (н·м/сек) | 0,13596 л. с. |
| 1 эрг/сек | 10^{-7} вт (н·м/сек) | 1 вт (н·м/сек) | 10^7 эрг/сек |
| 1 ккал/ч | 1,163 вт | 1 вт | 0,85984 ккал/ч |
| 1 ккал/сек | 4,1868 вт | 1 вт | 0,23885 ккал/сек |

Единицы давления (напряжения)

| | | | |
|---|--|--|--|
| 1 бар | 10^5 н/м | 1 н/м ² | 10^{-5} бар |
| 1 миллибар (мбар) | 100 н/м ² | 1 н/м ² | 0,01 мбар |
| 1 микробар (мкбар) | 0,1 н/м ² | 1 н/м ² | 10 мкбар |
| 1 дин/см ² | 0,1 н/м ² | 1 н/м ² | 10 дин/см ² |
| 1 кгс/см ² (кГ/см ²) | 98066,5 н/м ² | 1 н/м ² | $1,01971 \cdot 10^{-5}$ кГ/см ² ($\sim 1,02 \cdot 10^{-5}$ кГ/см ²) |
| 1 кгс м ² (кГ/м ²) | 9,80665 н/м ² | 1 н/м ² | 0,101971 кГ/м ² ($\sim 0,102$ кГ/м ²) |
| 1 кГ/мм ² | $9,80665 \cdot 10^6$ н/м ² = = 9,80665 Мн/м ² | | |
| 1 мм вод. ст. | 9,80665 н/м ² | 1 н/м ² | 0,101971 мм вод. ст. ($\sim 0,102$ мм вод. ст.) |
| 1 мм рт. ст. | 133,322 н/м ² | 1 н/м ² | $73356 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. ($\sim 733 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) |
| 1 техническая атмосфера (ат) | 98066,5 н/м ² = = 0,980665 бар | | |
| 1 физическая атмосфера (атм) | 101325 н/м ² 1,01325 бар | 1 н/м ² 1 н/м ² | $101971 \cdot 10^{-9}$ ат $10132 \cdot 10^{-9}$ атм |

Единицы динамической вязкости

| | | | |
|-------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| 1 пуаз (пз) | 0,1 н·сек/м ² | 1 н·сек/м ² | 10 пз |
| сантипуаз (спз) | 0,001 н·сек/м ² | 1 н·сек/м ² | 100 спз |
| 1 кГ·сек/м ² | 9,80665 н·сек/м ² | 1 н·сек/м ² | 0,101971 кГ·сек/м ² |

Единицы удельной теплоемкости

а) массовой

| | | | |
|------------------|---|----------------|---|
| 1 ккал/(кг·град) | $4186,8$ дж/(кг·град) = = $4,1868$ кдж/(кг·град) | 1 дж/(кг·град) | $23885 \times$ $\times 10^{-8}$ ккал/(кг·град) |
|------------------|---|----------------|---|

б) объемной

| | | | |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| 1 ккал/(м ³ ·град) | $4186,8$ дж/(м ³ ·град) | 1 дж/(м ³ ·град) | $23885 \times$ $\times 10^{-8}$ ккал/(м ³ ·град) |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|

Единицы удельной теплоты, энтальпии

| | | | |
|-----------|----------------|---------|-------------------------------|
| 1 ккал/кг | $4186,8$ дж/кг | 1 дж/кг | $23885 \cdot 10^{-8}$ ккал/кг |
|-----------|----------------|---------|-------------------------------|

Единицы удельной энтропии

| | | | |
|-----------------|------------------------|-----------------|---|
| 1 ккал/(кг·°К) | $4186,8$ дж/(кг·°К) | 1 дж/(кг·°К) | $23885 \cdot 10^{-8}$ ккал/(кг·°К) |
| ккал/(кмоль·°К) | $4186,8$ дж/(кмоль·°К) | 1 дж/(кмоль·°К) | $23885 \times$ $< 10^{-8}$ ккал/(кмоль·°К) |

Единицы теплового потока

| | | | |
|----------|-----------|------|----------------|
| 1 ккал/ч | 1,1630 вт | 1 вт | 0,85984 ккал/ч |
|----------|-----------|------|----------------|

Единицы плотности теплового потока

| | | | |
|----------------------------|---------------------------------|--------------------------|--|
| 1 ккал/(м ² ·ч) | $4186,8$ дж/(м ² ·ч) | 1 дж/(м ² ·ч) | $23885 \cdot 10^{-8}$ ккал/(м ² ·ч) |
| | 1,1630 вт/м ² | 1 вт/м ² | 0,85984 ккал/(м ² ·ч) |

Единицы коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи

| | | | |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 ккал/(м ² ·ч·град) | 1,1630 вт/(м ² ·град) | 1 вт/(м ² ·град) | 0,85984 ккал/(м ² ·ч·град) |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|

Единицы коэффициента теплопроводности

| | | | |
|-------------------|--------------------|---------------|-------------------------|
| 1 ккал/(м·ч·град) | 1,1630 вт/(м·град) | 1 вт/(м·град) | 0,85984 ккал/(м·ч·град) |
|-------------------|--------------------|---------------|-------------------------|

СОДЕРЖАНИЕ

| | Стр. |
|--|------|
| Предисловие | 3 |
| I. Основные свойства газов | |
| Кинематическая вязкость газов | 5 |
| Динамическая вязкость газов | 5 |
| Плотность газа | 6 |
| Плотность газа, состоящего из нескольких компонентов, при нормальных условиях | 6 |
| Плотность влажного газа, приведенная к нормальным условиям | 7 |
| Плотность влажного воздуха | 8 |
| Состав дымовых газов и коэффициент избытка воздуха при полном сжигании топлива | 8 |
| Расход воздуха и объем дымовых газов при сжигании топлива | 8 |
| Состав дымовых газов при неполном сжигании топлива | 9 |
| Объем и состав газов, получаемых при сжигании сульфидных руд | 11 |
| Концентрация газовой примеси и процент ее в газе | 11 |
| II. Основы теплотехники | |
| Энтальпия газов | 13 |
| Точка росы газов, содержащих пары H_2O и SO_3 | 14 |
| Точка росы газов, содержащих пары воды, HCl и HF | 15 |
| Влажность воздуха в различных единицах | 15 |
| Влагосодержание и энтальпия воздуха, $i-x$ -диаграмма | 16 |
| Максимальная температура жидкости и минимальная температура газа при непосредственном соприкосновении их. Температура мокрого термометра | 18 |
| Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием | 20 |
| Коэффициент теплоотдачи от твердого тела окружающему воздуху при свободном его движении | 20 |
| Коэффициент теплоотдачи от движущегося газа к стенке газохода | 21 |
| Средняя логарифмическая | 21 |
| III. Пылеулавливание. Газоочистка | |
| Скорость витания пылевых частиц | 23 |
| Пылевые камеры | 24 |
| Циклоны и батарейные циклоны | 25 |
| Объем газов, проходящих через циклон, и гидравлическое сопротивление циклона | 29 |
| Батарейные циклоны | 30 |
| Электрофильтры. Изменение степени очистки газов в электрофильтре в зависимости от скорости газа, длины и напряжения поля | 31 |
| Высота слоя пены в пенном аппарате | 33 |
| Улавливание пыли в пенных аппаратах | 34 |
| Коэффициент массоотдачи для хорошо растворимых газов | 35 |

IV. Измерения количества газов. Критерий Рейнольдса

| | |
|--|----|
| Плоские диафрагмы | 36 |
| Сопротивление диафрагмы — потеря давления | 38 |
| Измерение скорости газа пневмометрическими трубками | 38 |
| Точки замеров при снятии поля скоростей | 39 |
| Измерение скорости газа с помощью малых (авиационных) трубок Вентури | 40 |
| Измерение количества газа при помощи коллектора | 40 |
| Динамический напор газового потока | 41 |
| Критерий Рейнольдса | 41 |

V. Пылегазовые замеры

| | |
|--|----|
| Выбор диаметра наконечника заборной трубки Гинцветмета | 43 |
| Показания реометра с миллиметровой шкалой при отборе запыленного газа на фильтрацию вне газохода при соблюдении изокINETИЧНОСТИ | 44 |
| Объем газа при нормальных условиях, проходящий через реометр с миллиметровой шкалой | 45 |
| Определение объема пробы запыленного газа по реометру со шкалой, калиброванной на определенное значение плотности газа, при соблюдении изокINETИЧНОСТИ | 45 |
| Приведение показаний шкалы реометра к нормальному состоянию газа и использование реометров в других условиях (для другого газа) | 46 |
| Выбор диаметра отверстия носика патрона при определении запыленности методом внутренней фильтрации | 47 |
| Психрометр на расстоянии | 48 |
| Литература | 50 |
| Приложение | 51 |

ЗАМЕТКИ ПО ПЕЧАТНИ

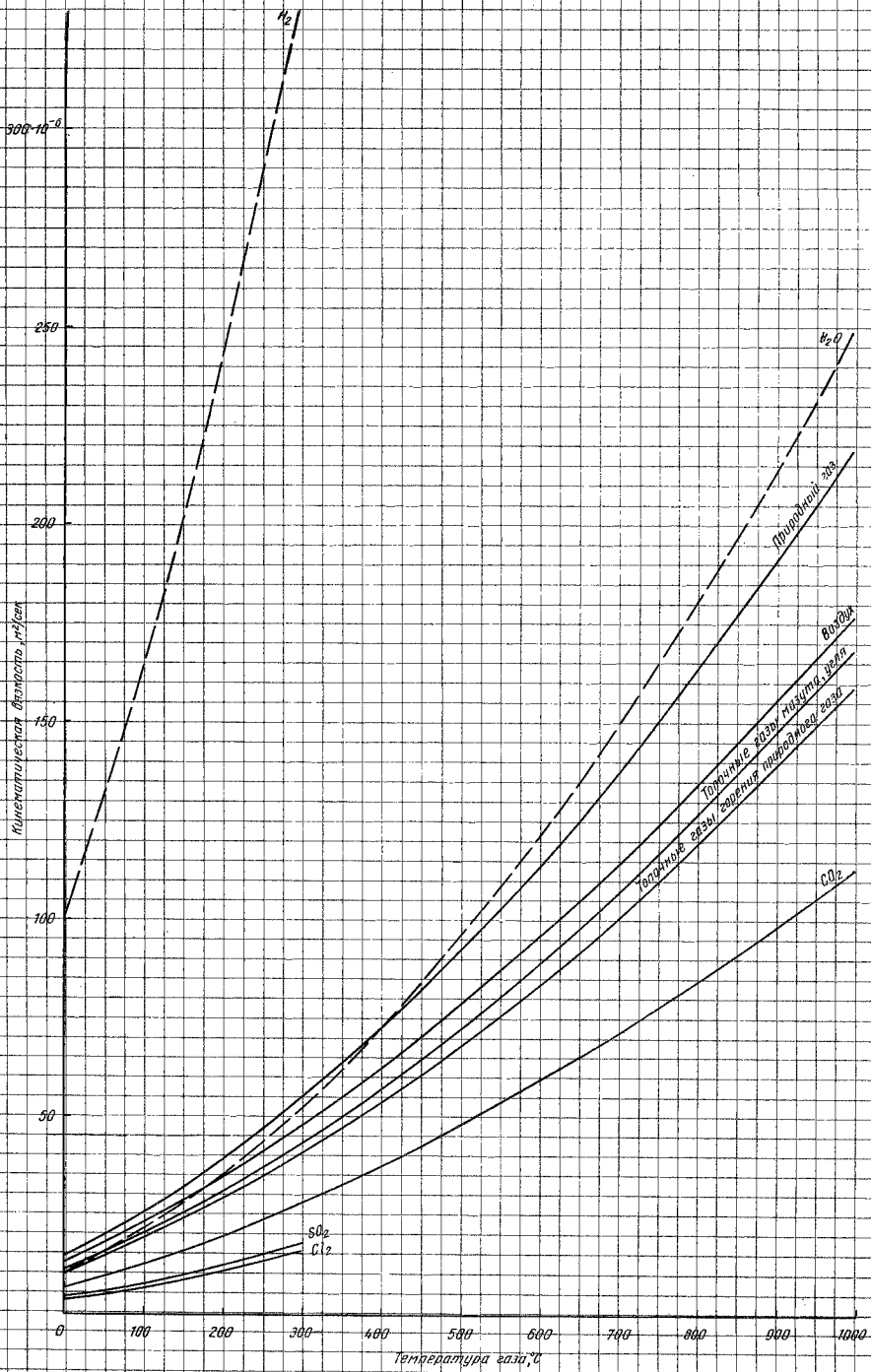
| Стр. | Строч. | Начало строки | Длина строки |
|---------------|----------------|---|---|
| 27 | 10 стр. | 910 л | 210 л |
| 27 | 10 стр. | 17 | 17 |
| 23 | 8 стр. | 80 мм | 80 мм |
| 21 | 21 стр. | 21 | 17 |
| 13 | 19 стр. | 9 | 7 |
| 11 | 20 стр. | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 |
| 10 | 10 стр. | 100000 | 10000 |
| 14 | 9 стр. | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 |
| 10 | 6 стр. | 100 | 800 |
| 18 | 16 стр. | внутри и | внутри и |
| Программа № 2 | Средняя строка | 1 | 1 |

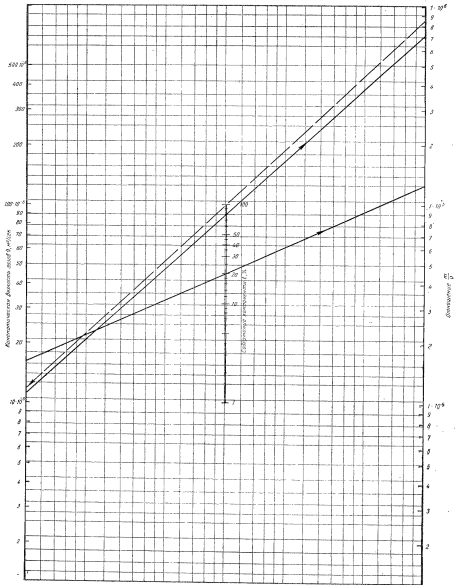
Автор **ПЕЙСАХОВ Исаак Лейбович**

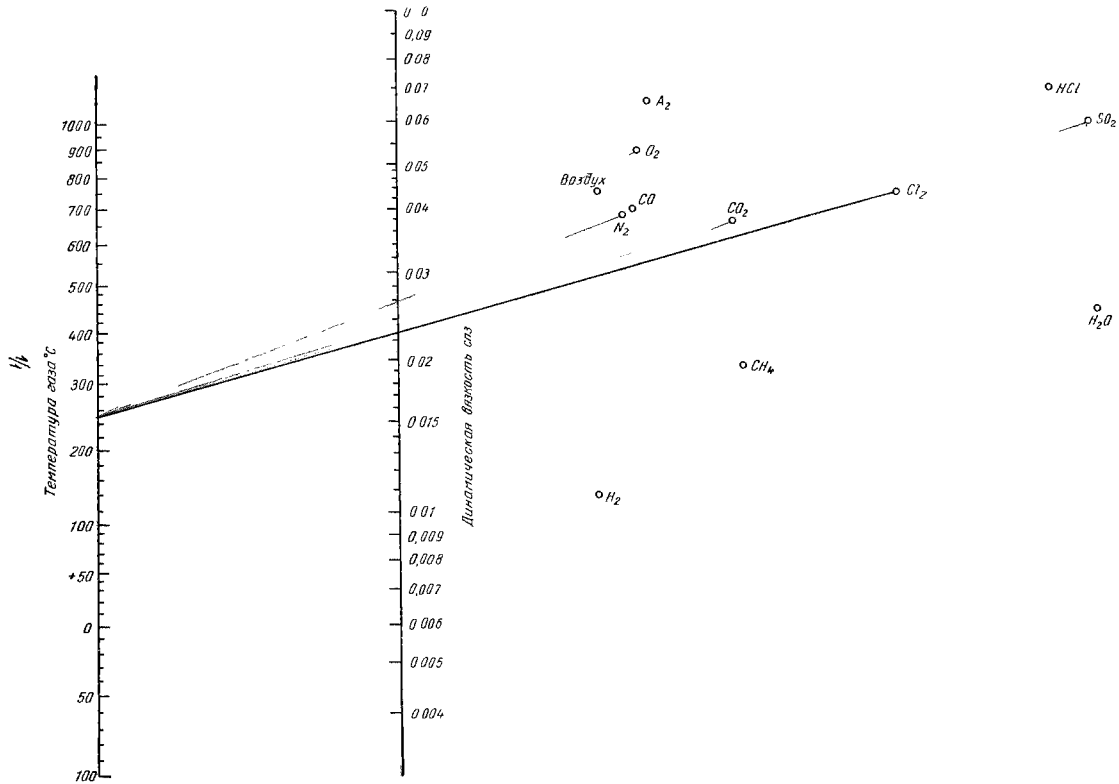
Редактор издательства **И. Ю. Шкловская**
Технический редактор **В. В. Михайлова**
Переплет художника **Г. А. Жегина**

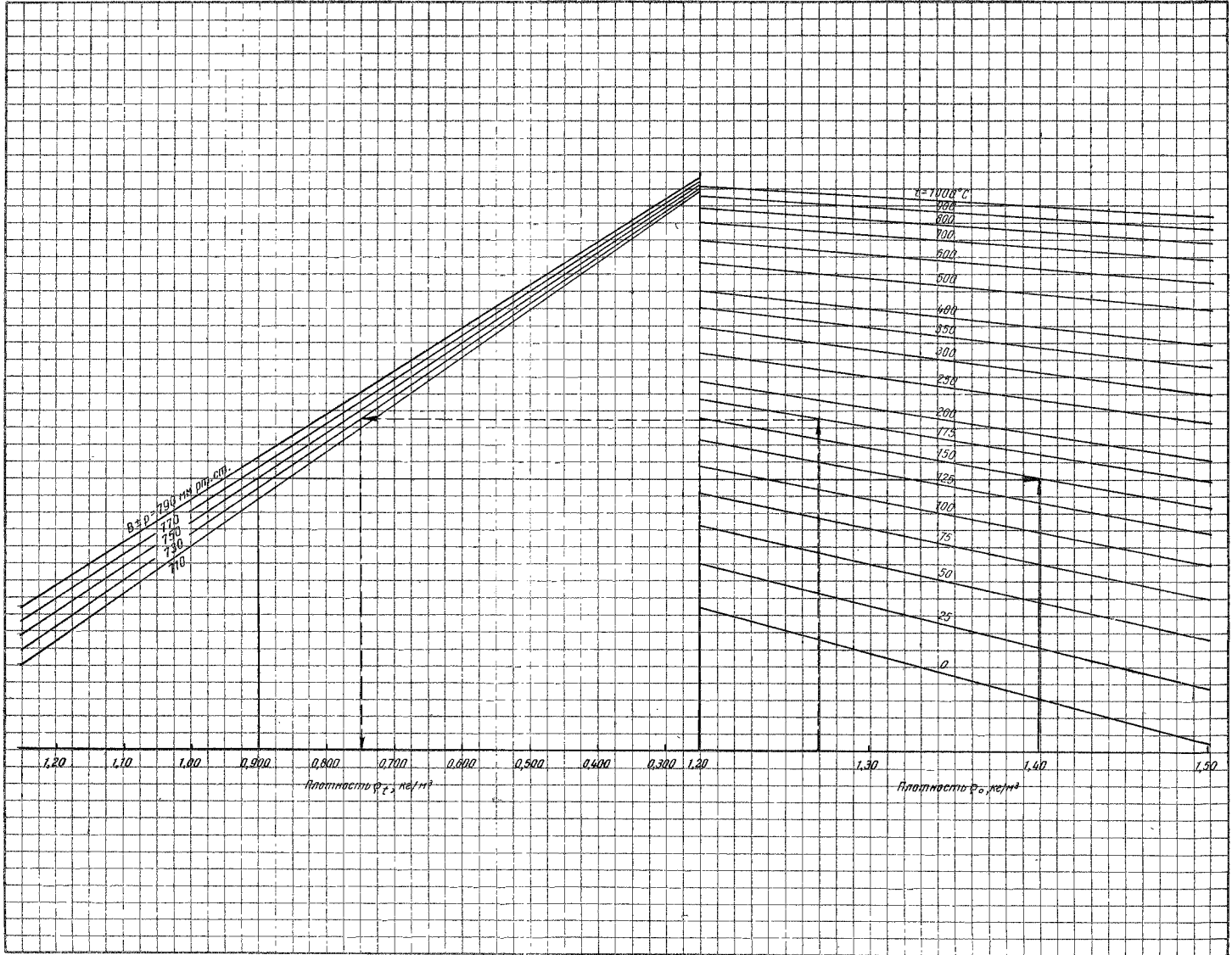
Ставо в производство 16 XII 1964 г.
Подписано в печать 30/IV 1965 г.
Приложение к атласу И. Л. Пейсахов «Атлас диаграмм
и номограмм по газопылевой технике»
Бумага 70 × 1081/16—1,75 бум. л.
4,8 печ. л. (усл.), Уч.-изд. л. 4,34.
Атлас Бумага 70 × 1081 в - 7,78 бум. л. =
21,24 печ. л. (усл.) Уч.-изд. л. 13,02. Всего, с приложе-
нием 17,36 уч.-изд. л.
Т-06630. Заказ 2553 Изд. № 4525. Тираж 2600 экз.
Цена Атласа с приложением 2 р. 80 к.
Св. тем. план по металлургии 1965 г. п. 7.

Издательство «Металлургия»
Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., 14.
Ленинградская типография № 14
«Красный Печатник»
Главполиграфиромна Государственного комитета
Совета Министров СССР по печати.
Московский пр., 21









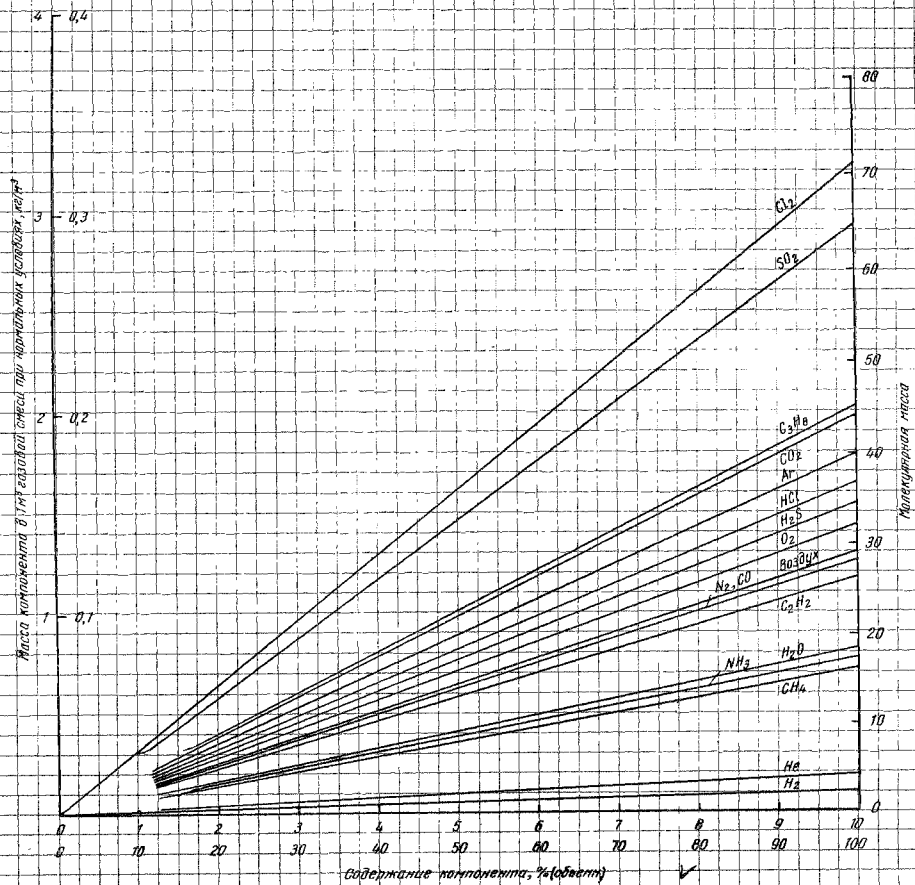
ρ в г/см³
 170
 150
 130
 110

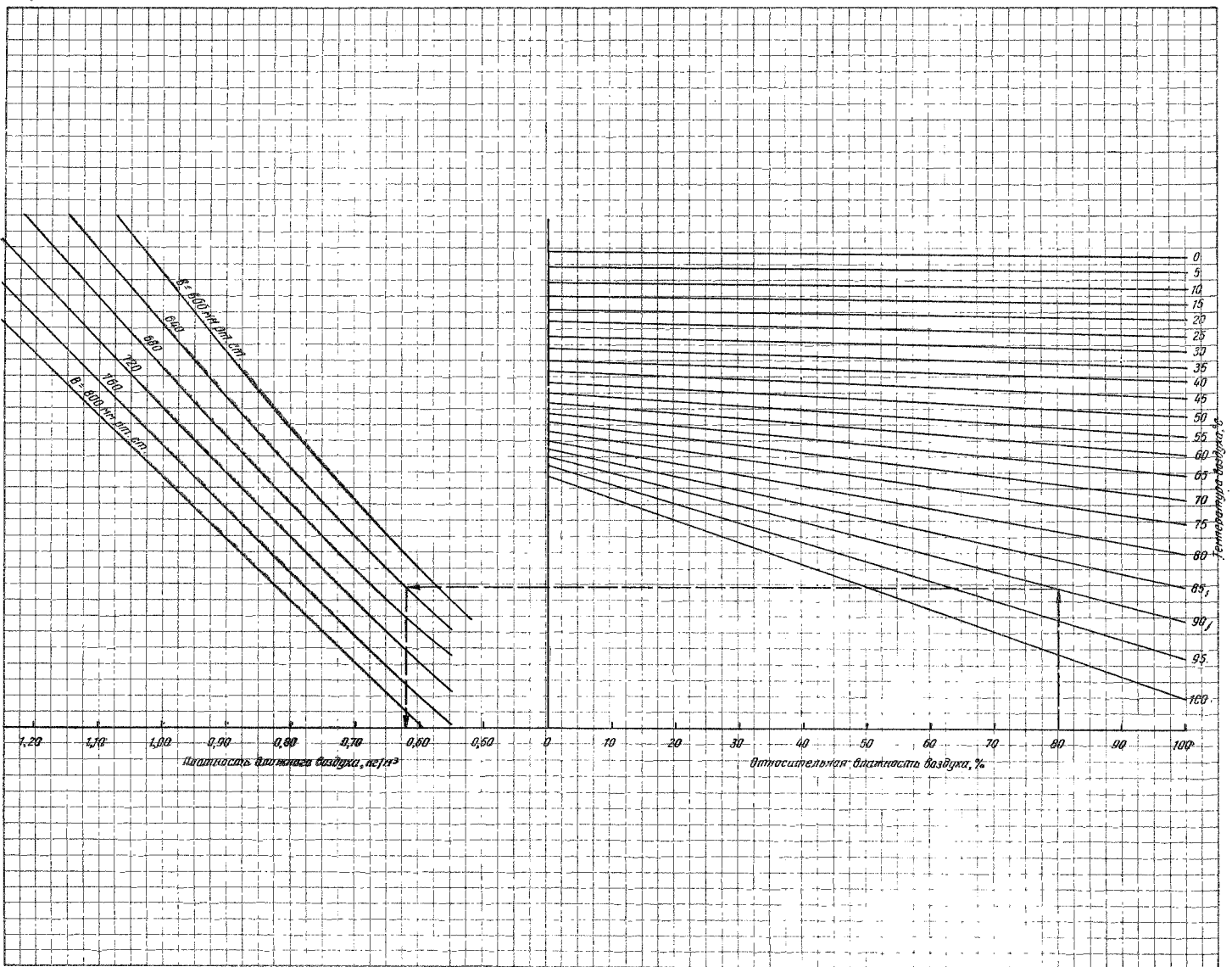
$T = 1000^{\circ}\text{C}$
 900
 800
 700
 600
 500
 400
 350
 300
 250
 200
 175
 150
 125
 100
 75
 50
 25
 0

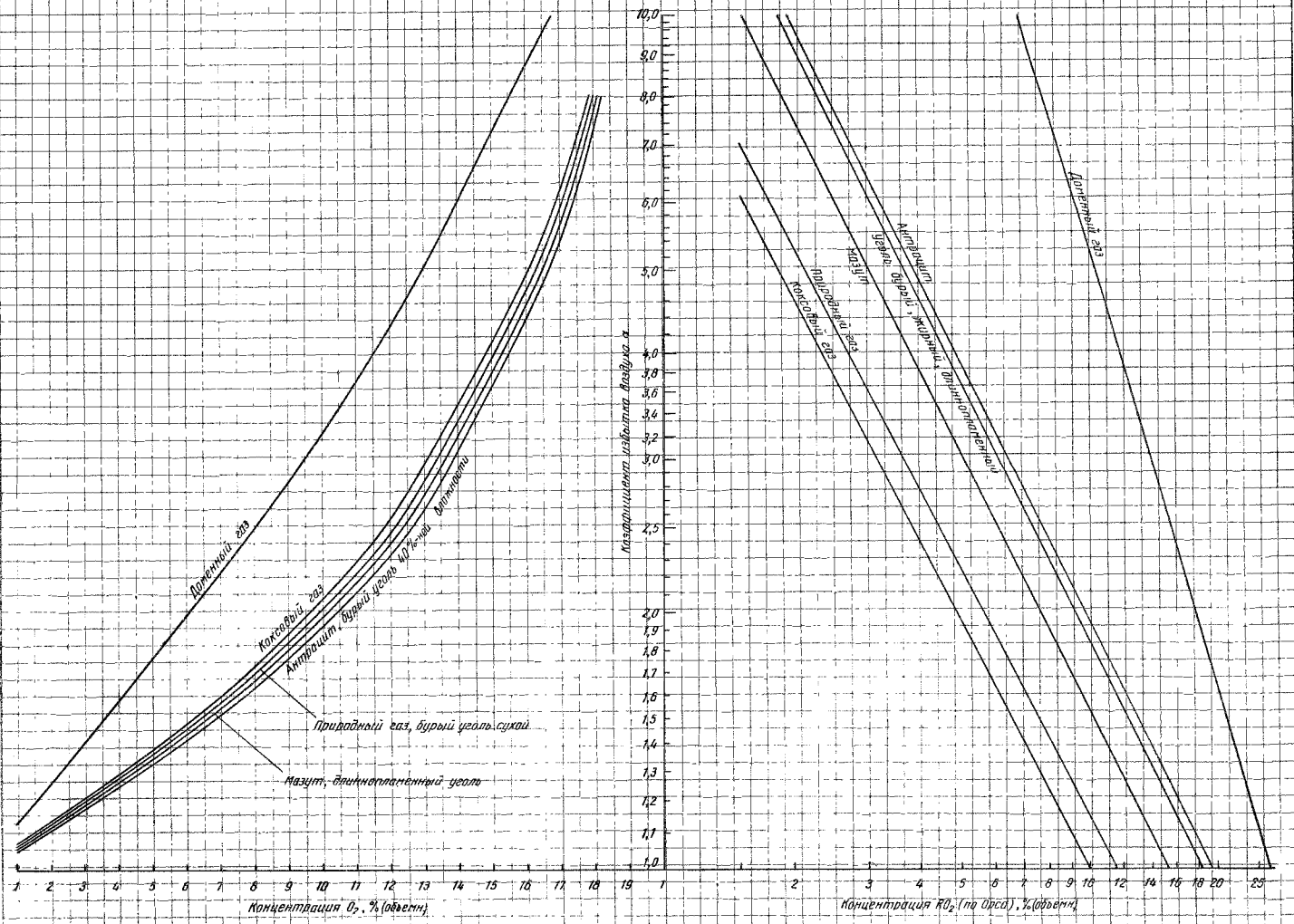
1,20 1,10 1,00 0,900 0,800 0,700 0,600 0,500 0,400 0,300 1,20 1,30 1,40 1,50

Плотность ρ , г/см³

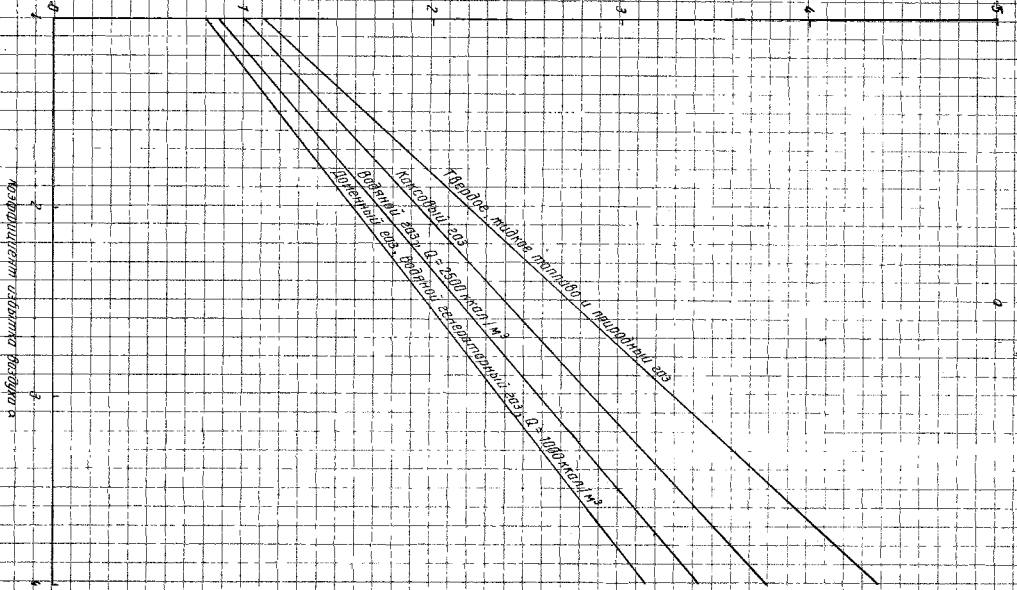
Плотность ρ_0 , г/см³



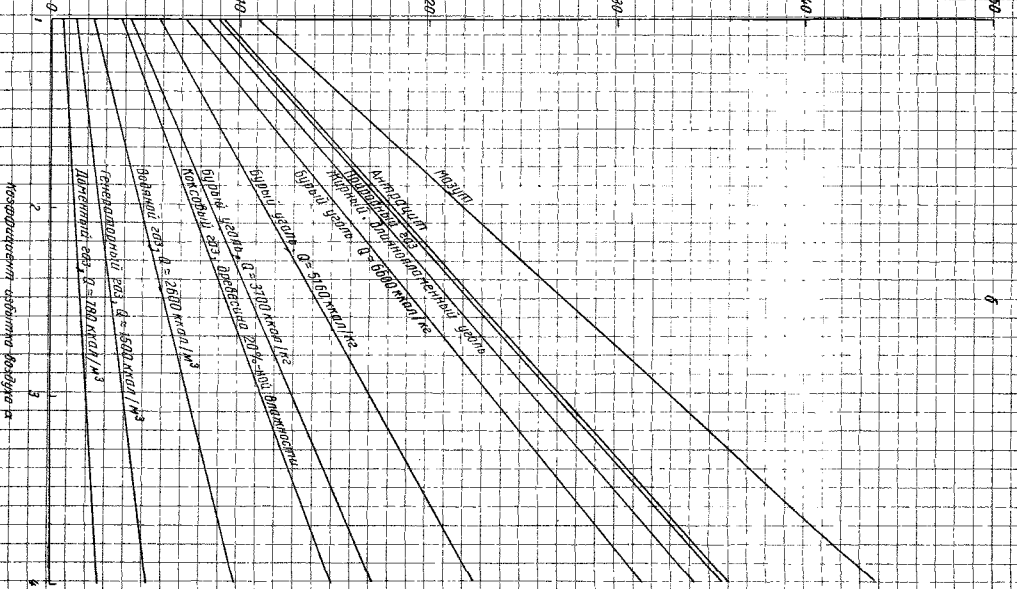


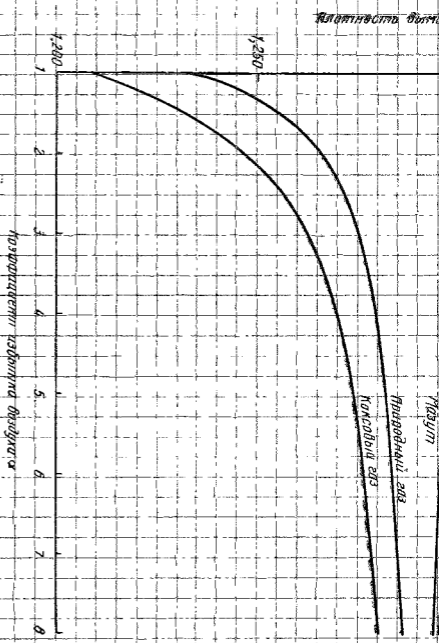


Расход воздуха на полное сгорание топлива, $m^3/1000\text{ккал}$

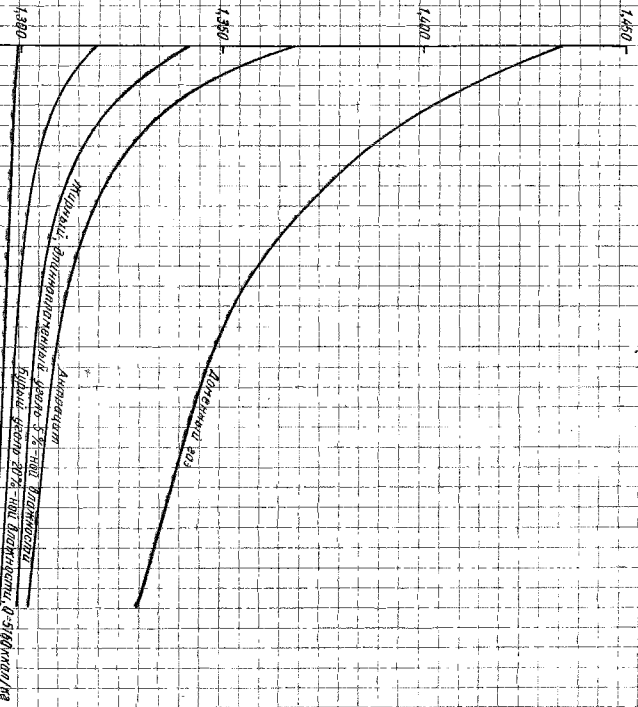


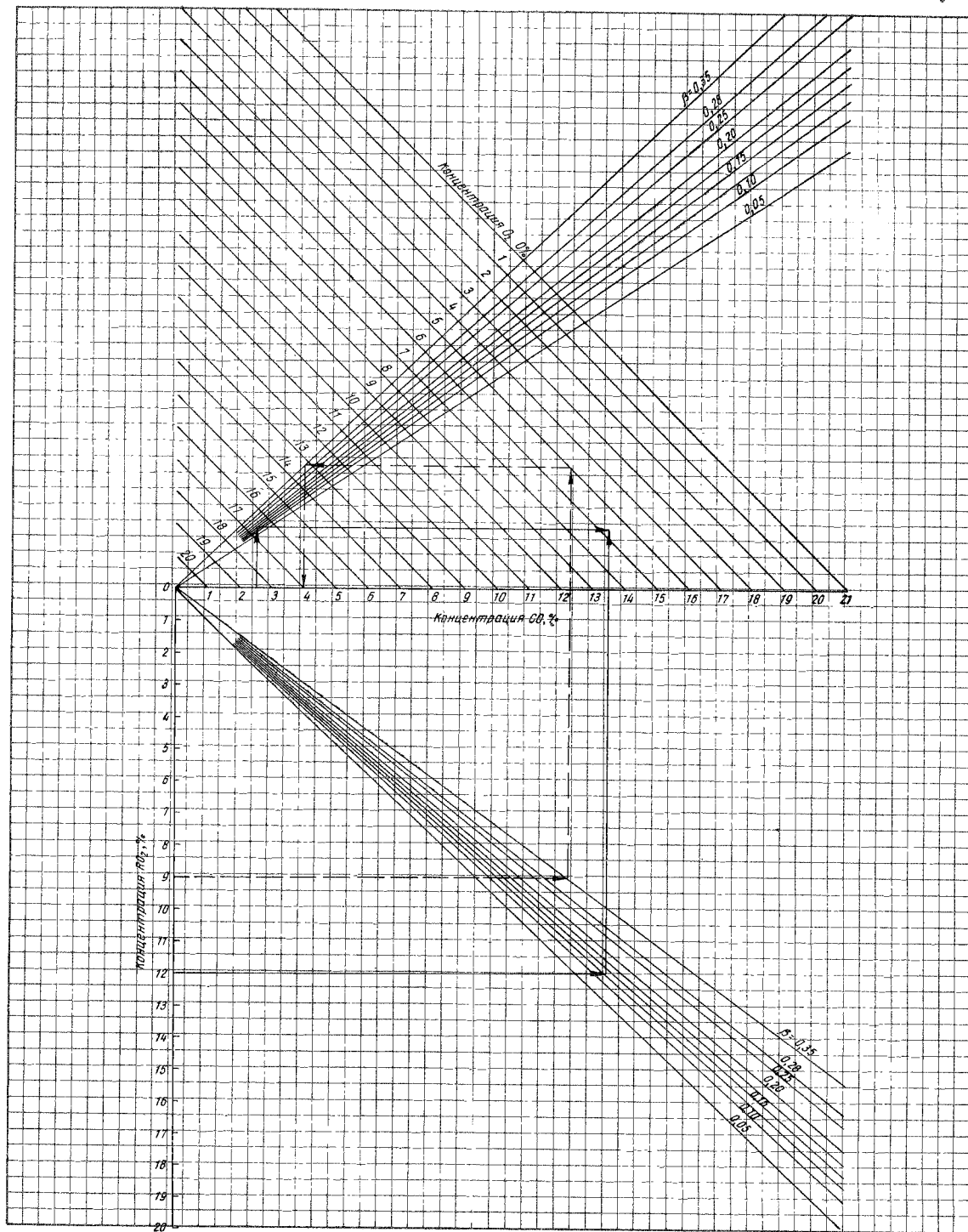
Расход воздуха на полное сгорание 1кг твердого, жидкого или $1m^3$ газообразного топлива, m^3

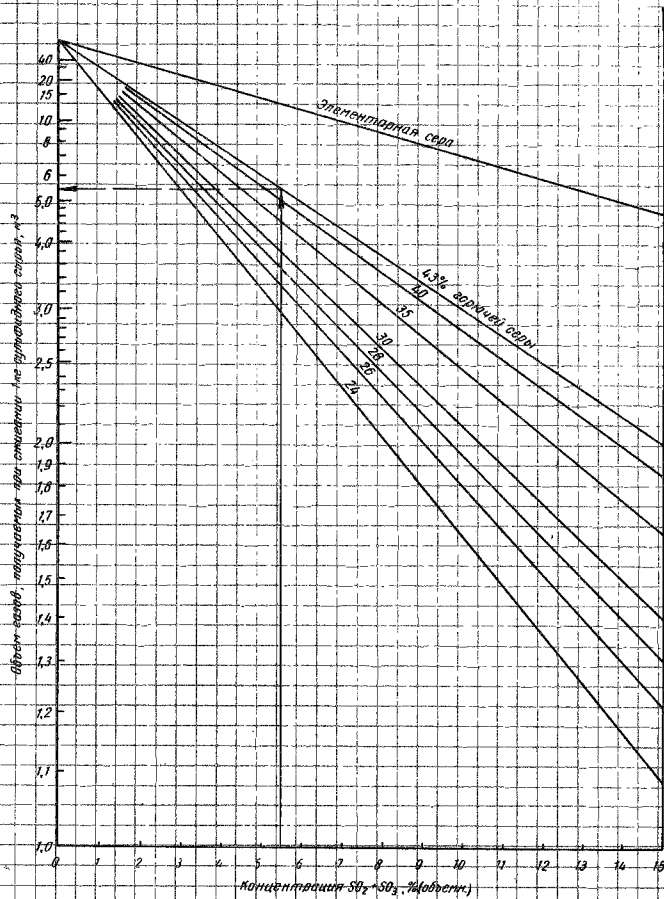


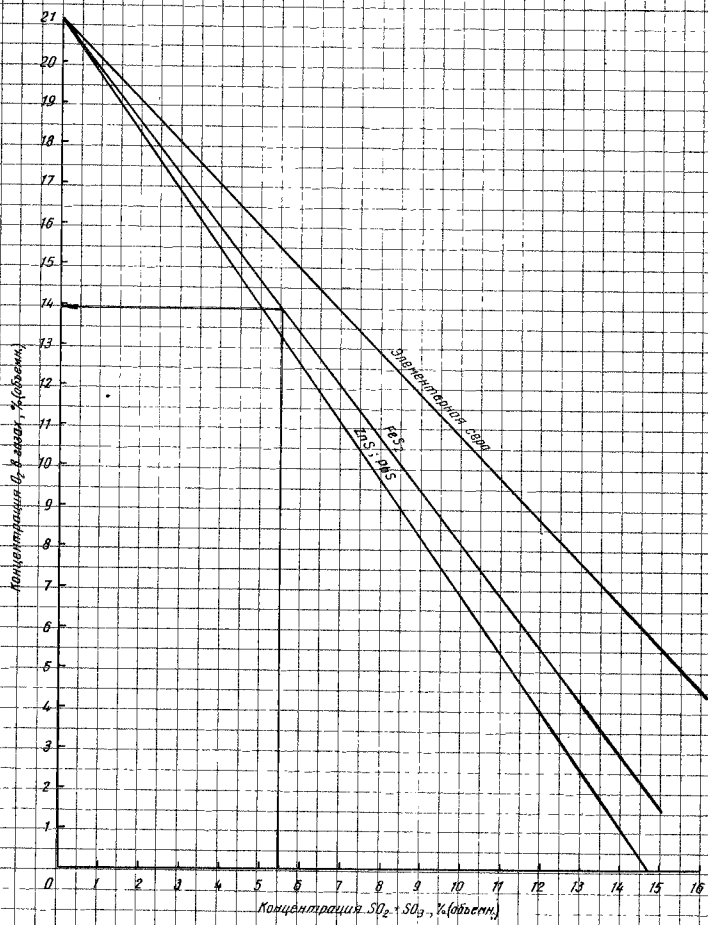


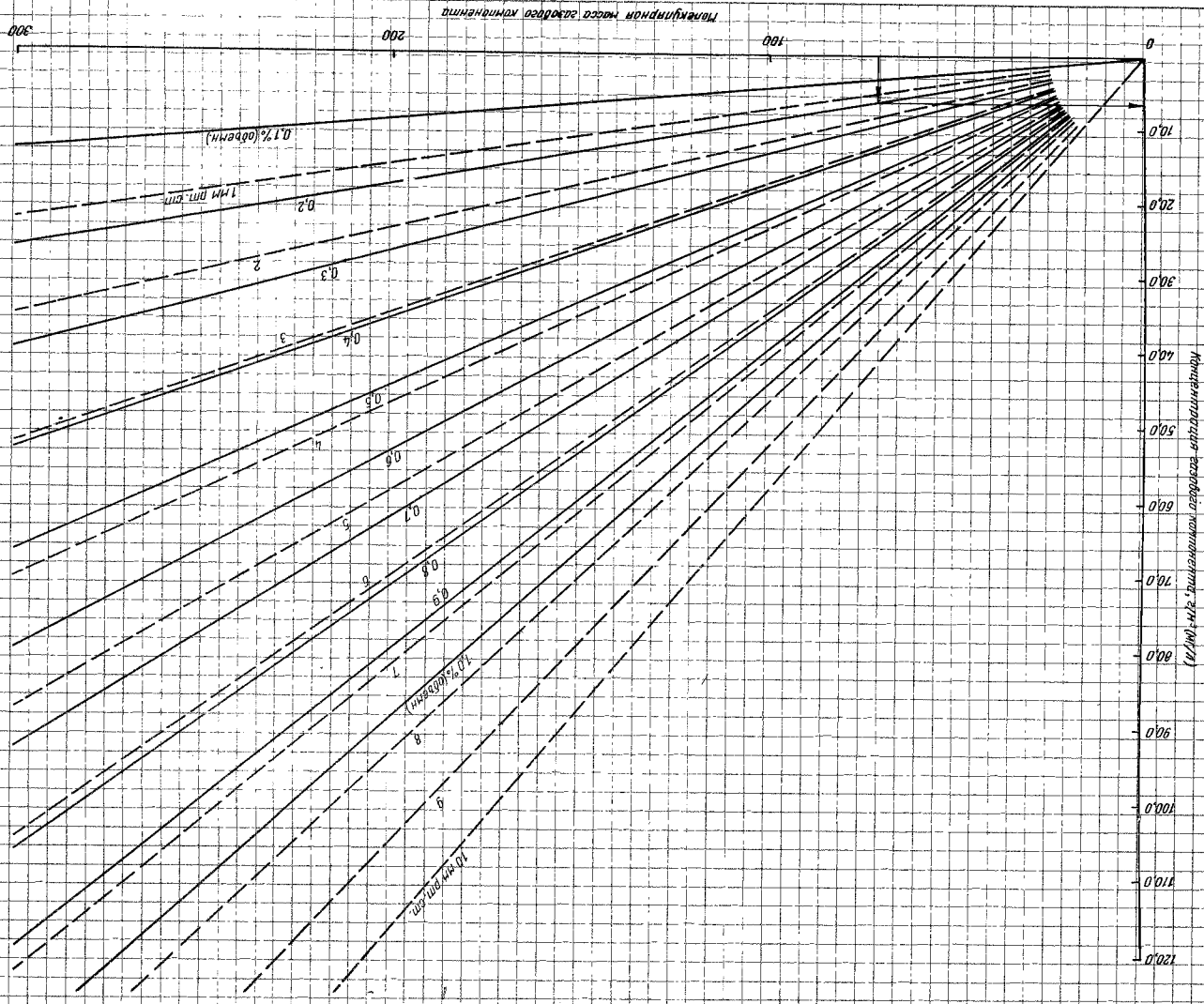
Объем газов, полученный при горении топлива, м³/ч

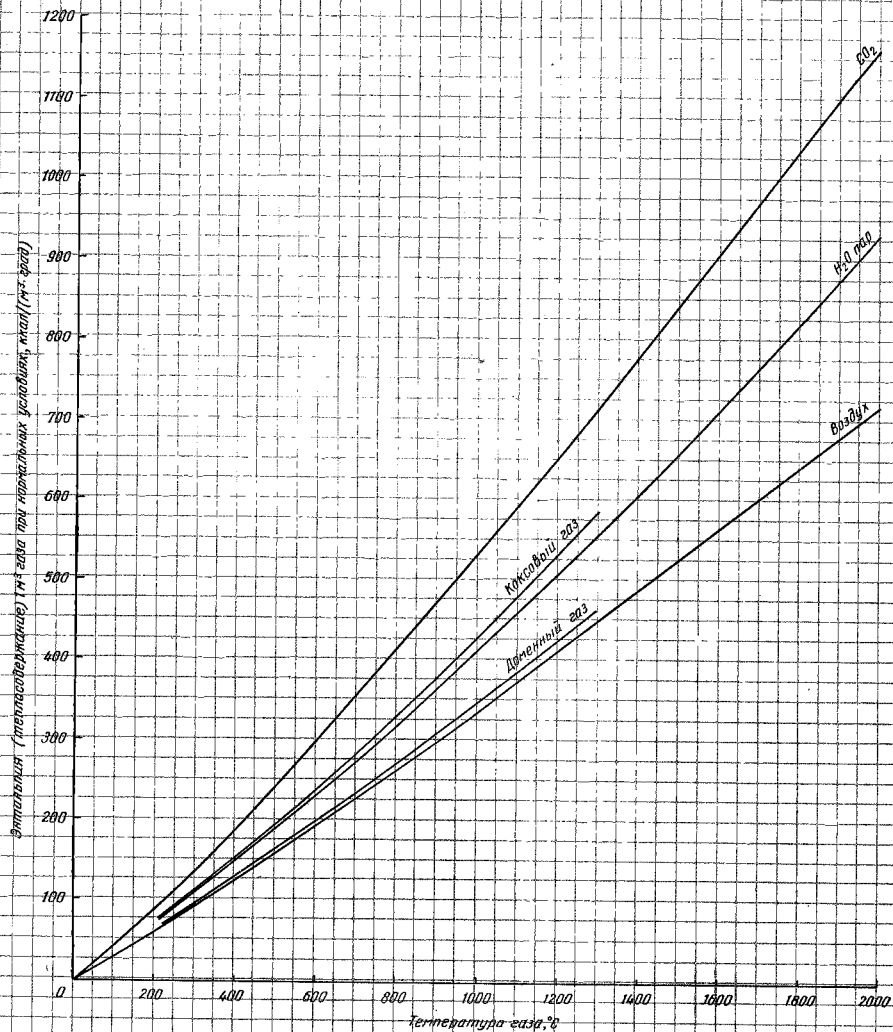


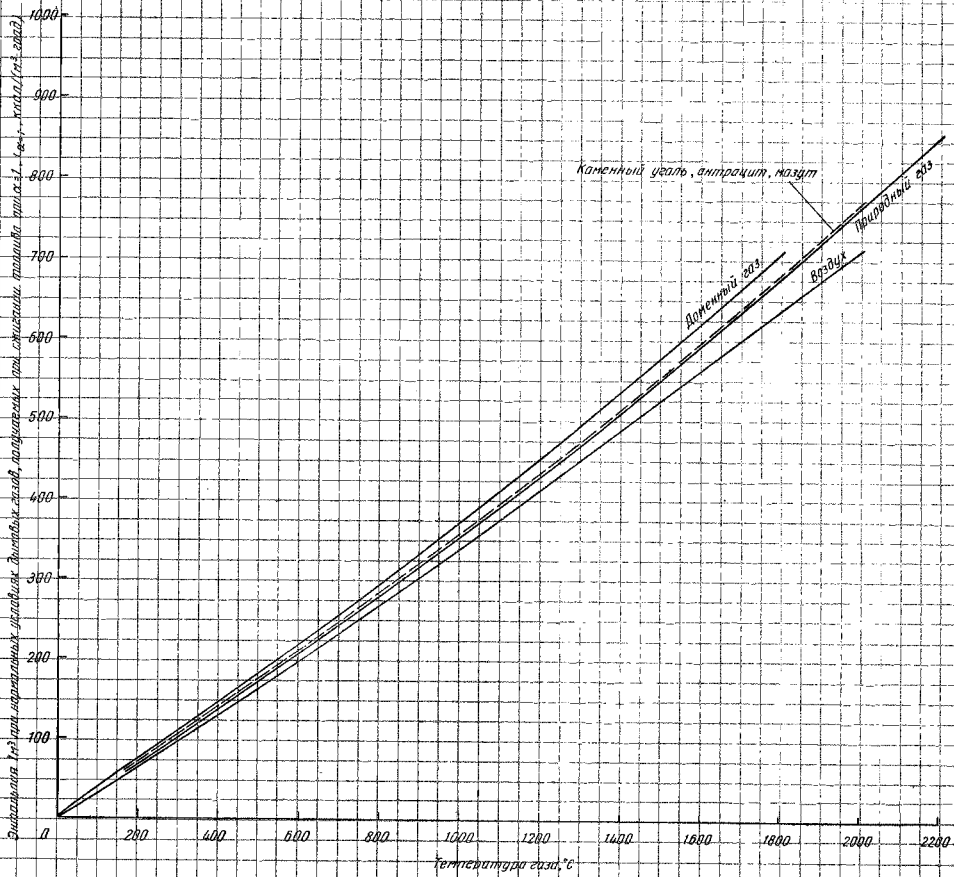


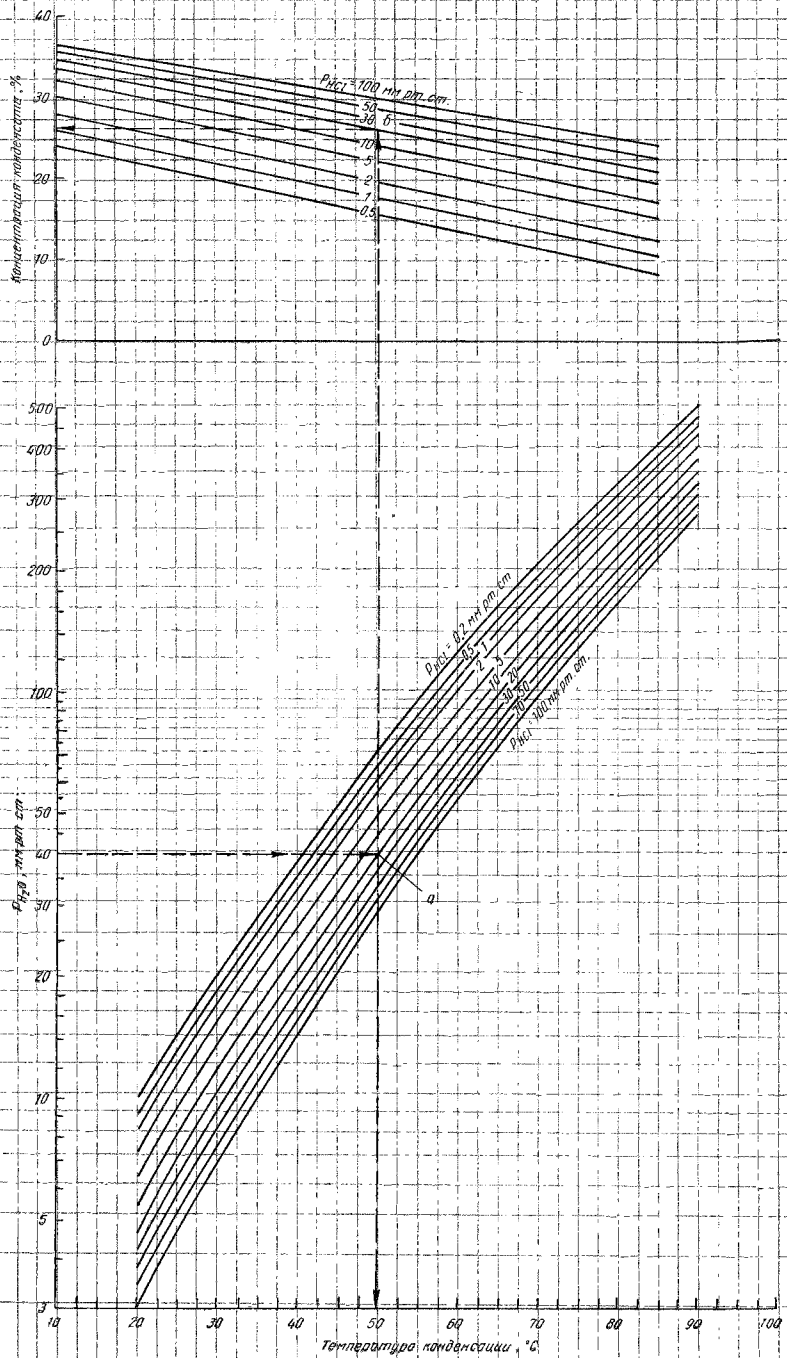


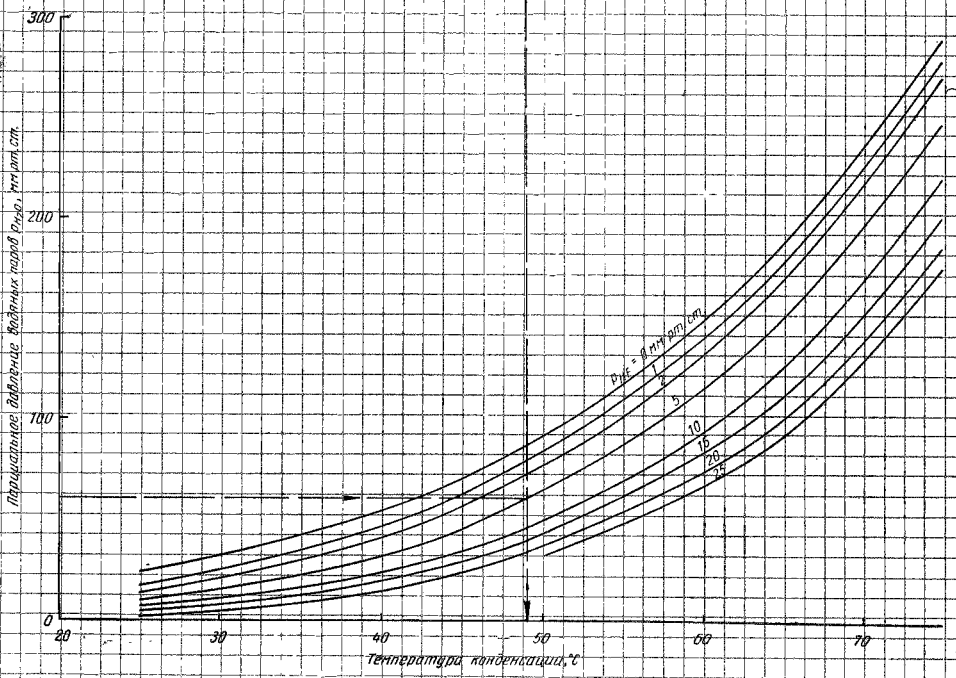
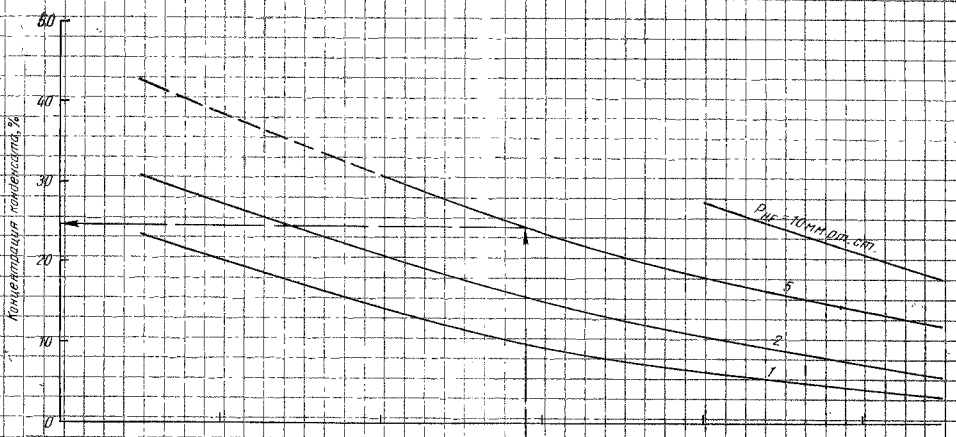


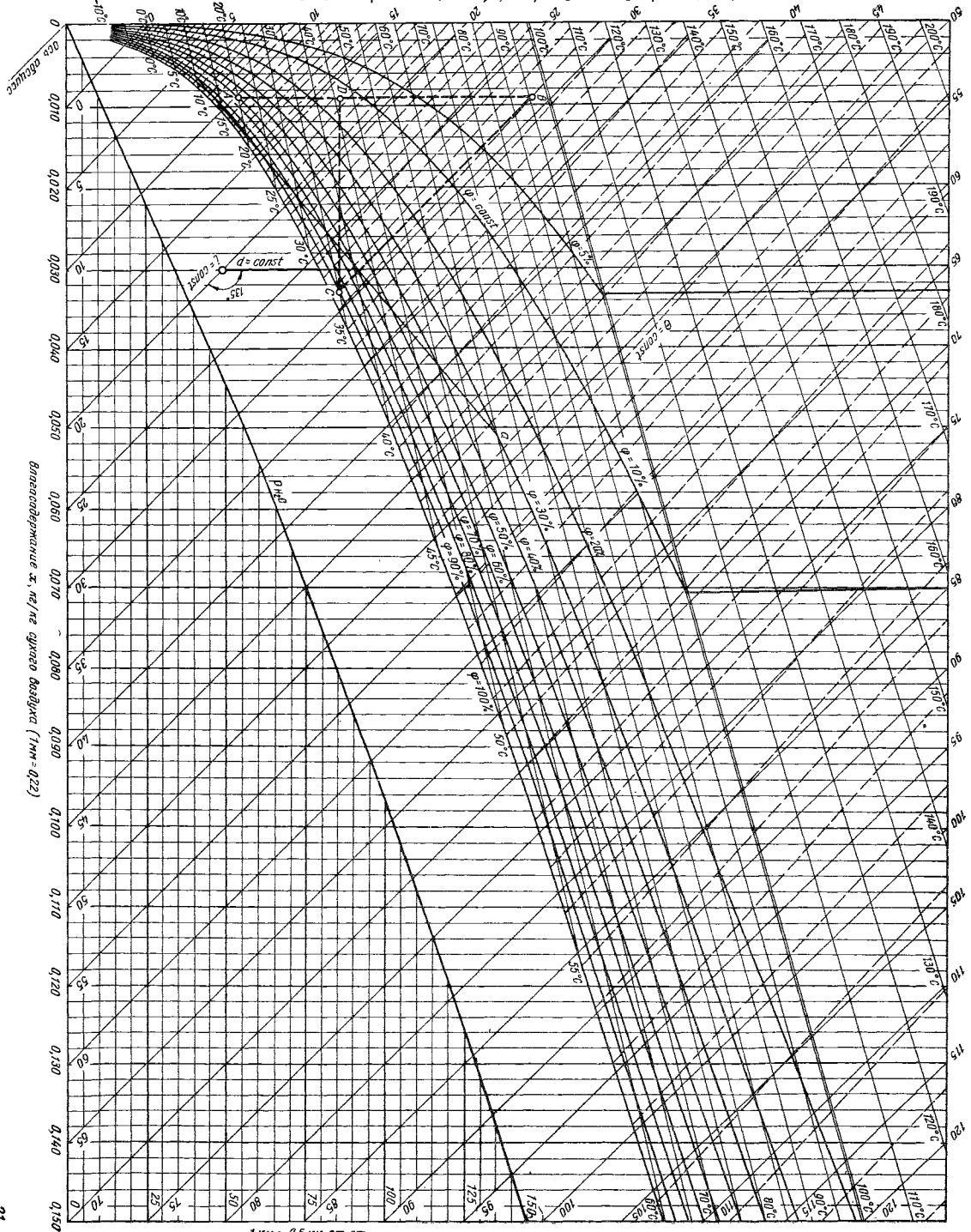






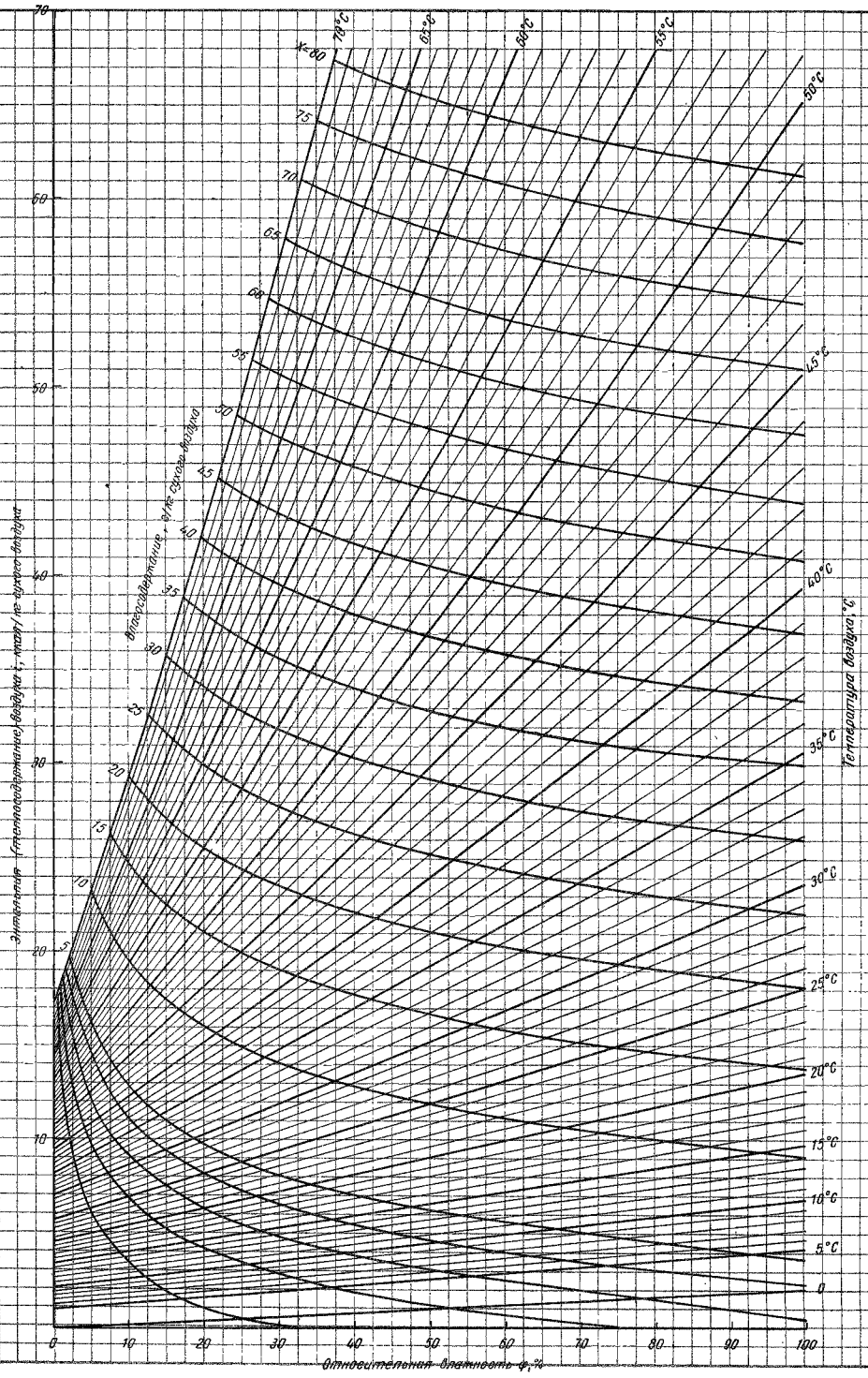


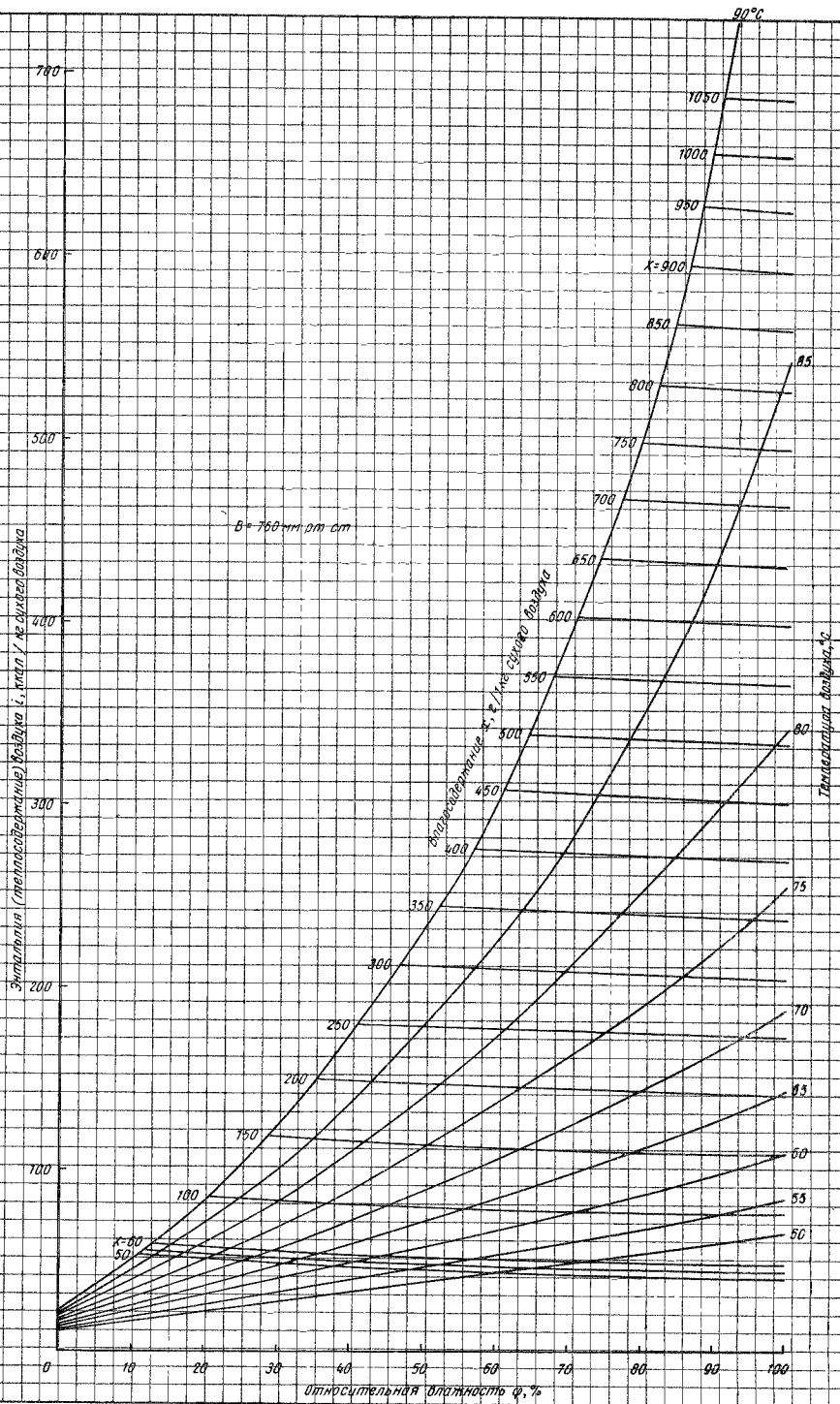


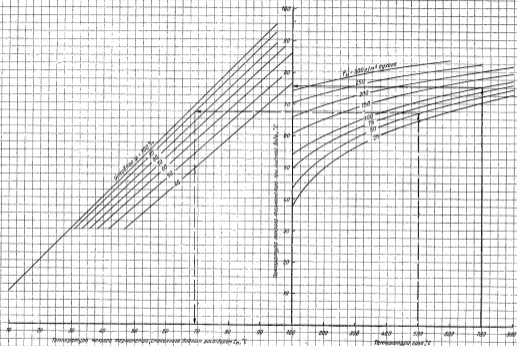


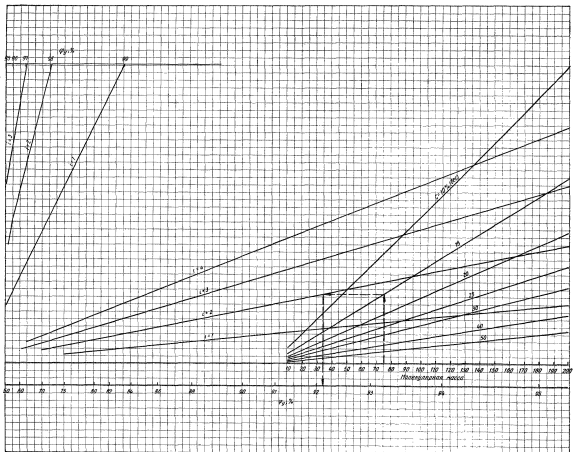
Влагосодержание x , г/кг сухого воздуха (1 мм = 0,22)

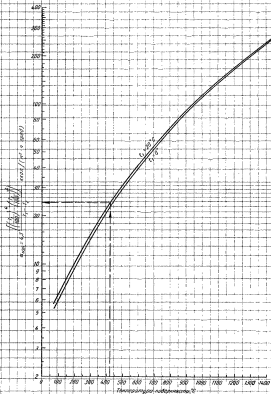
1 мм = 0,5 мм рт.ст.

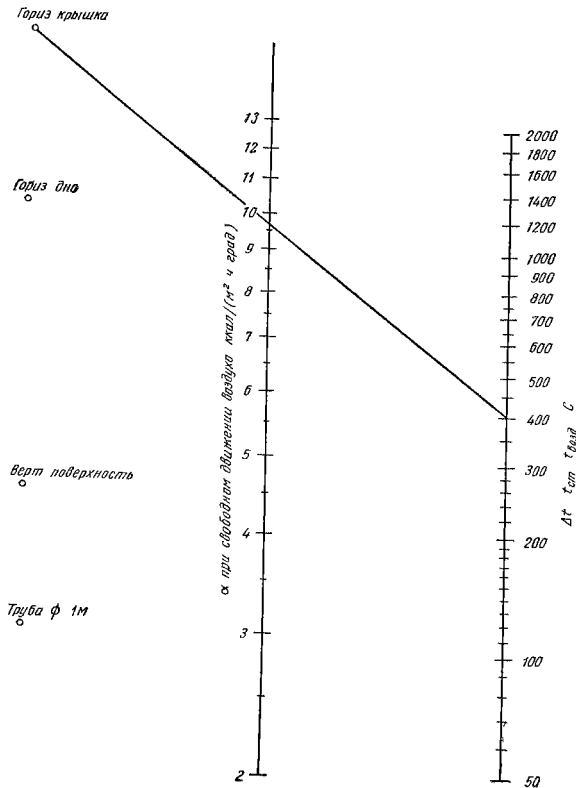


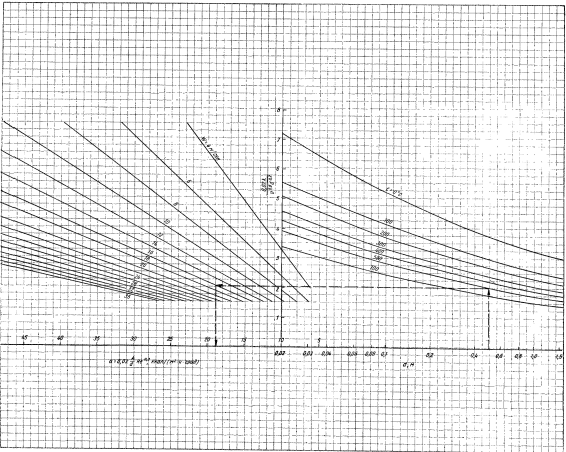


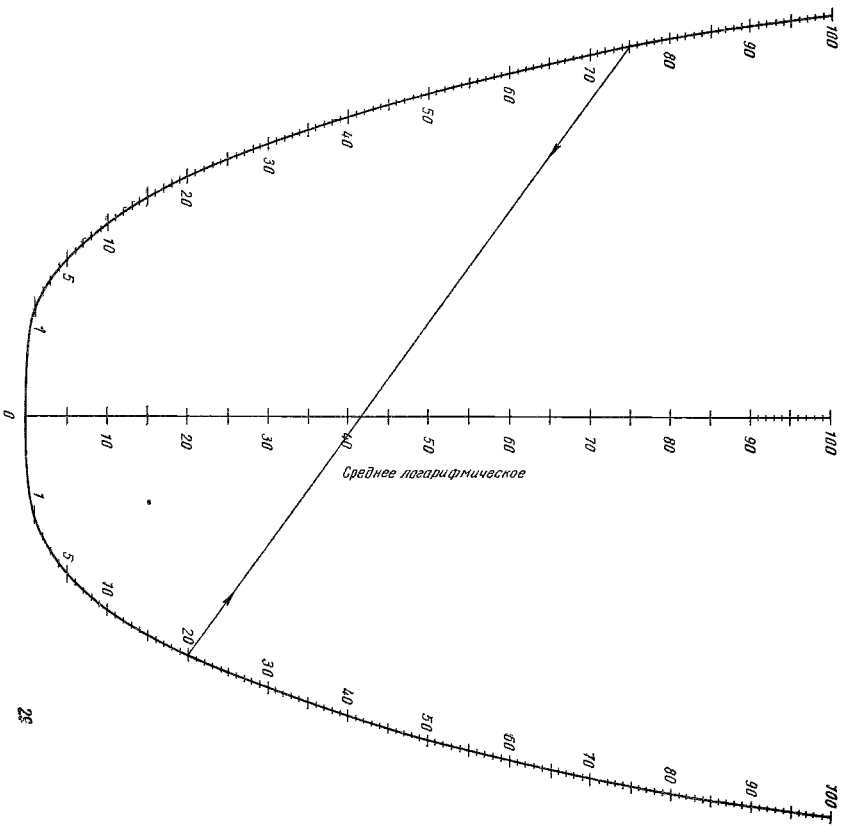


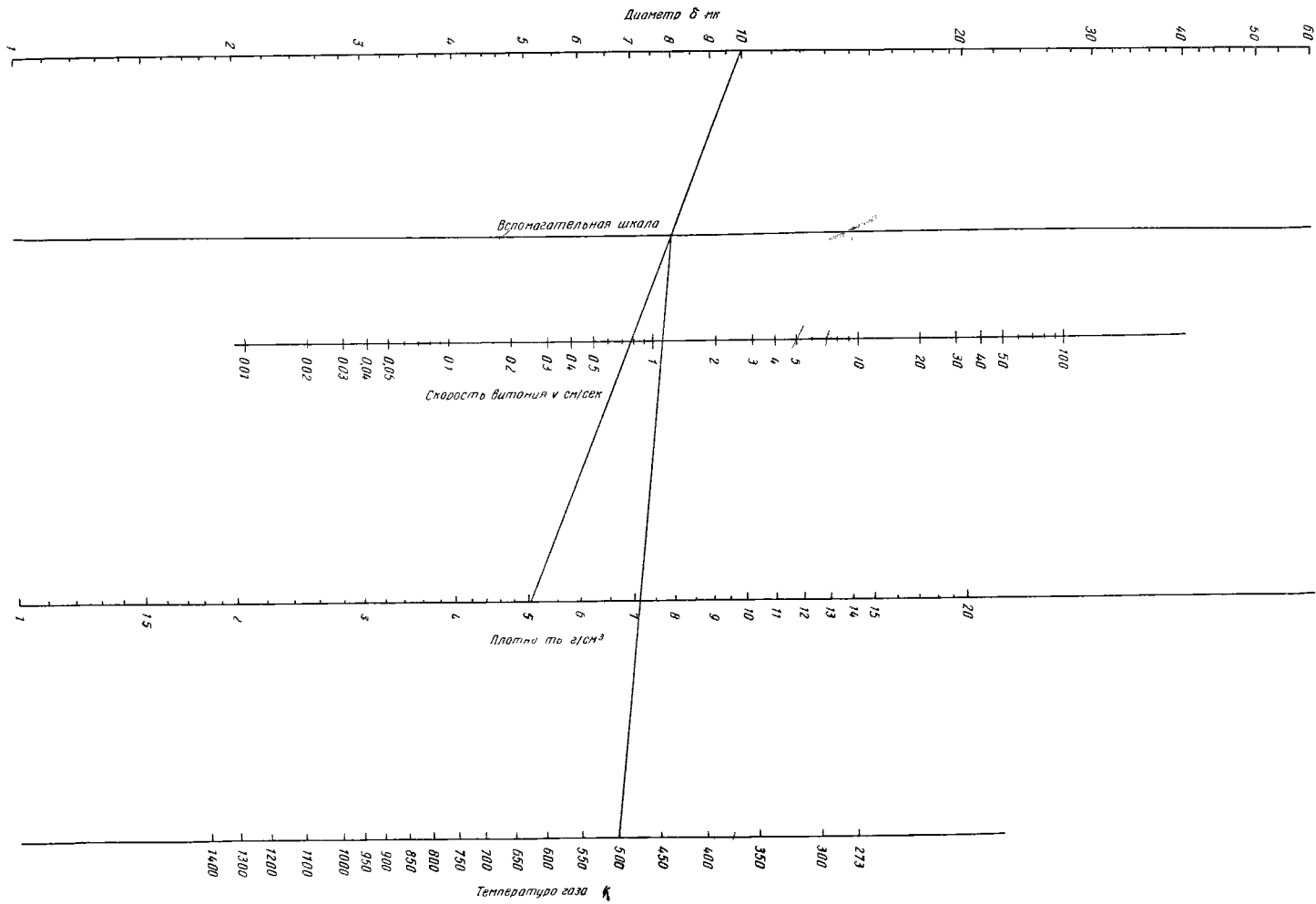


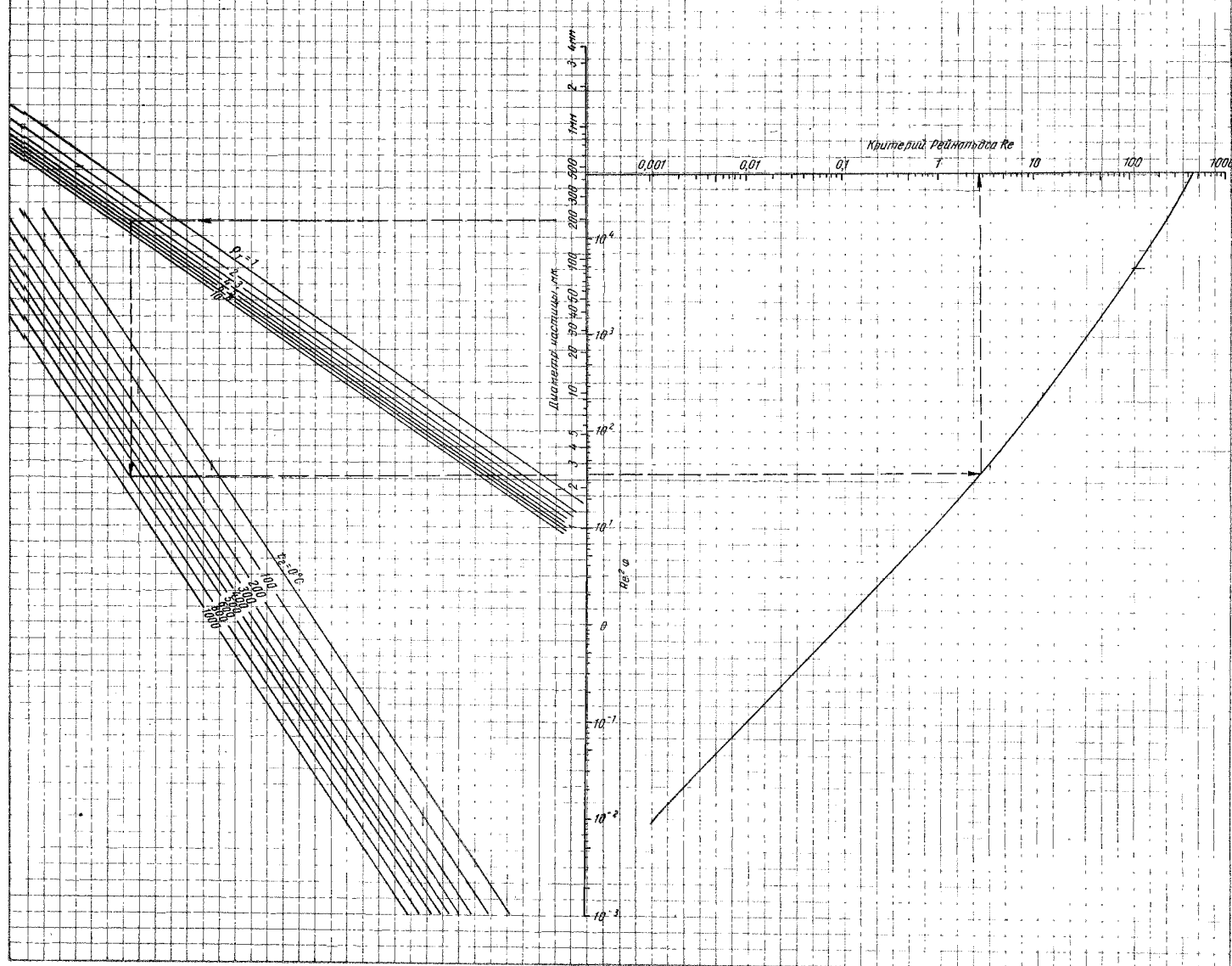


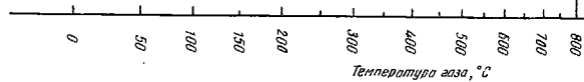
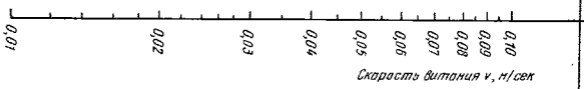
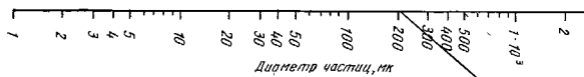
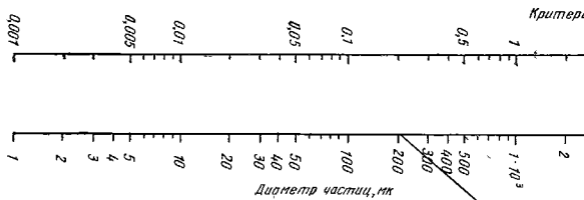




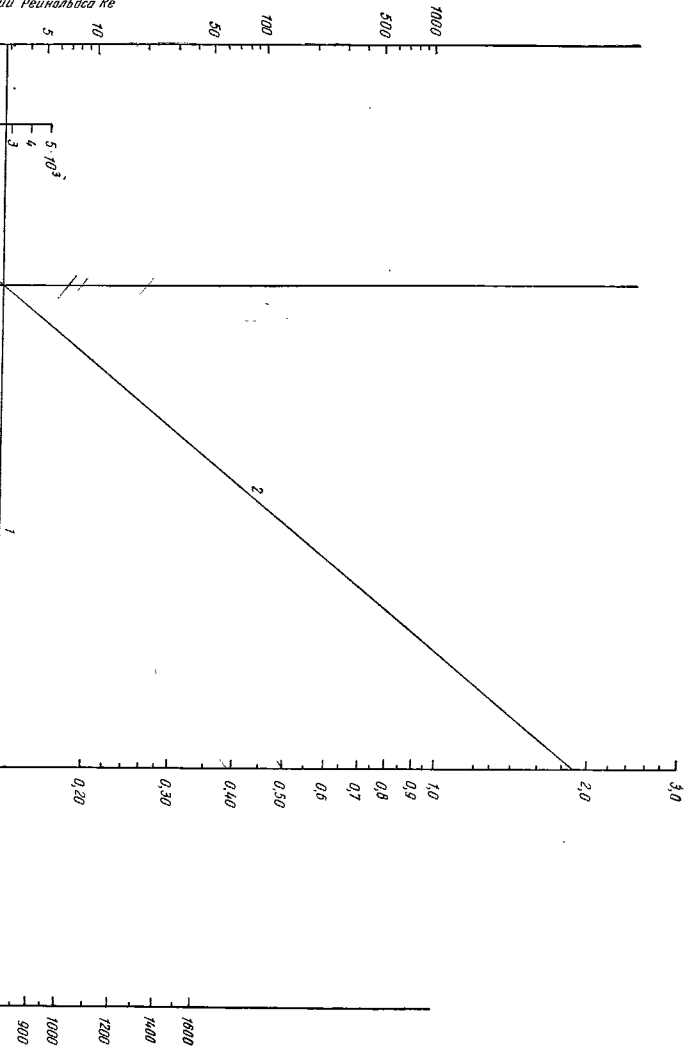


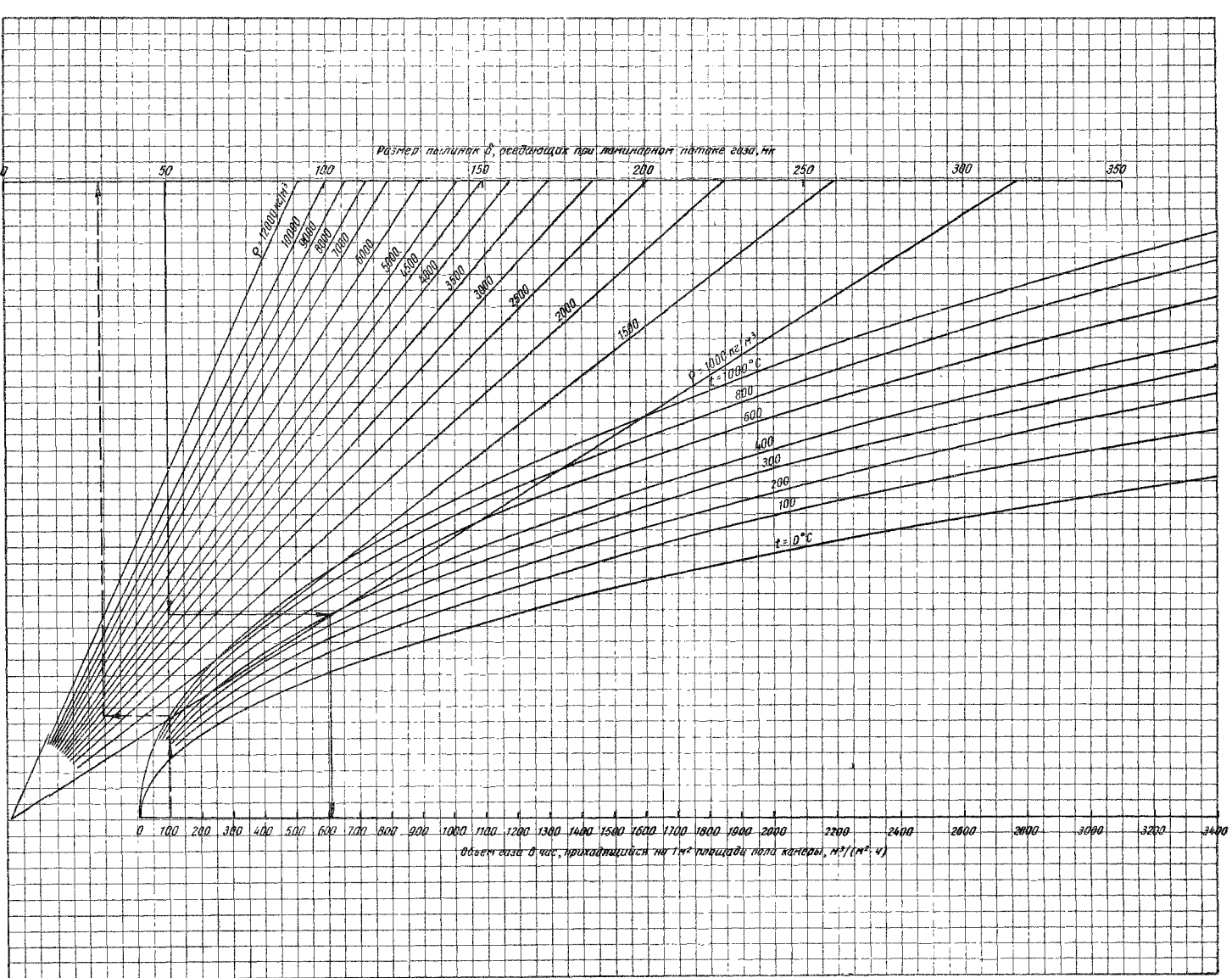


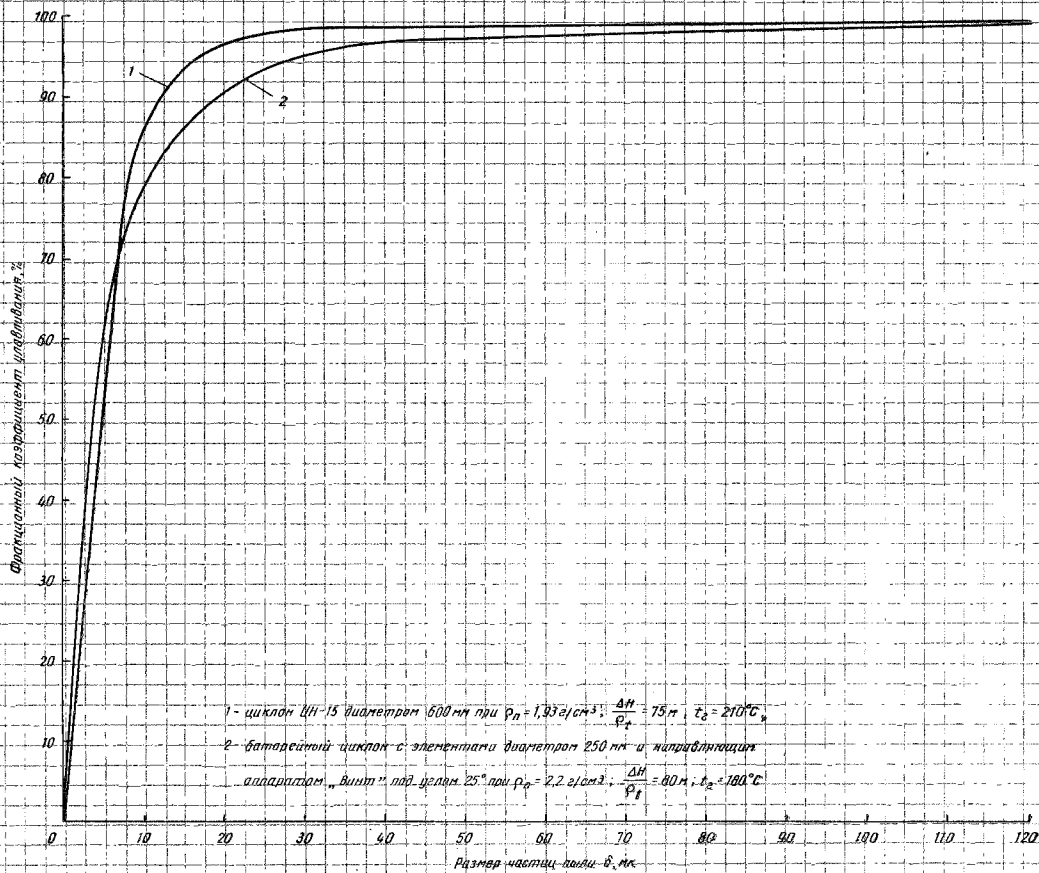


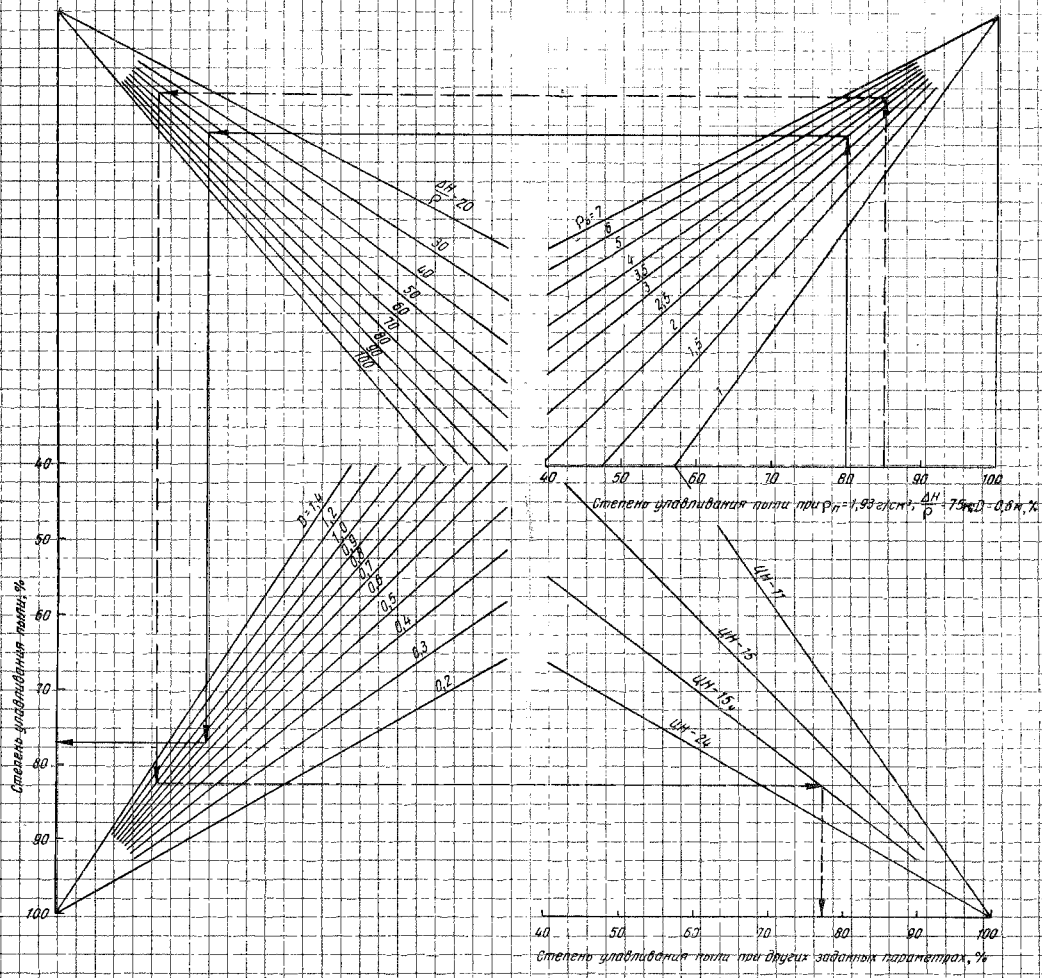


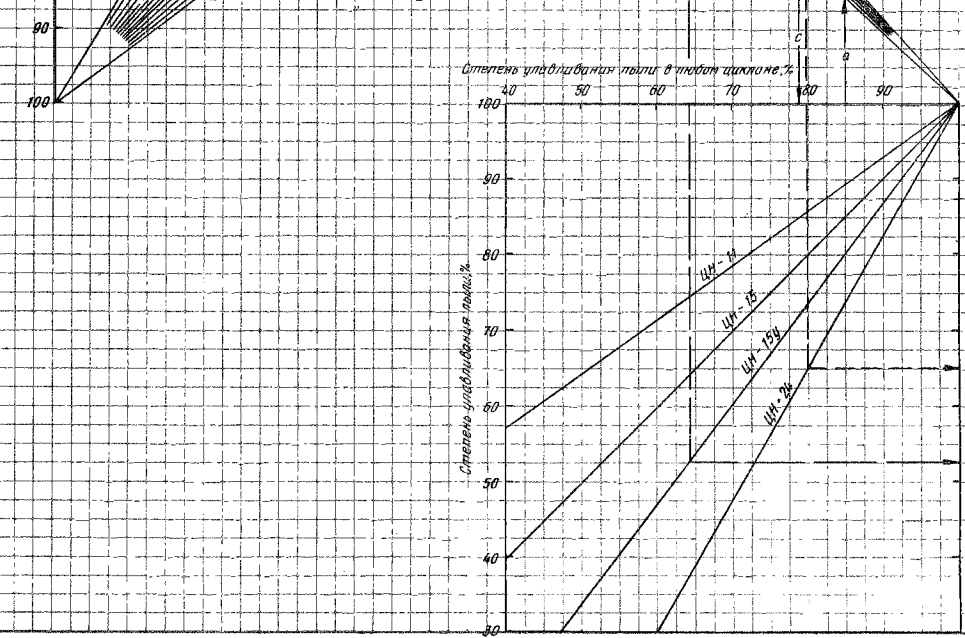
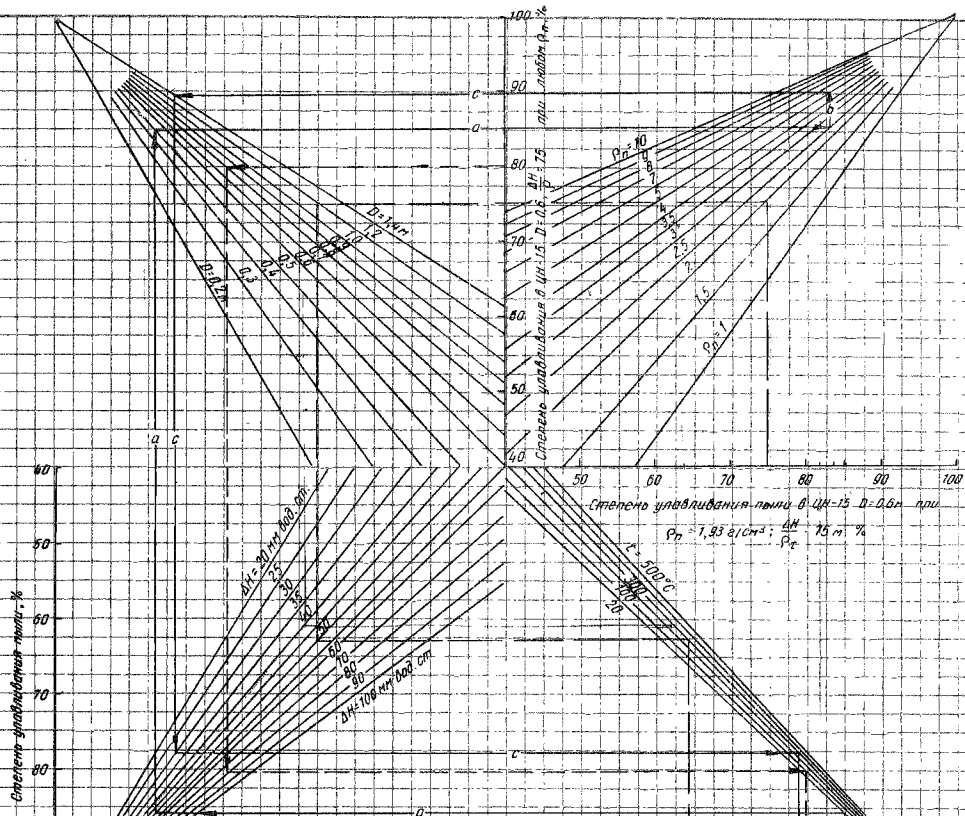
ий Рейнольдса Re

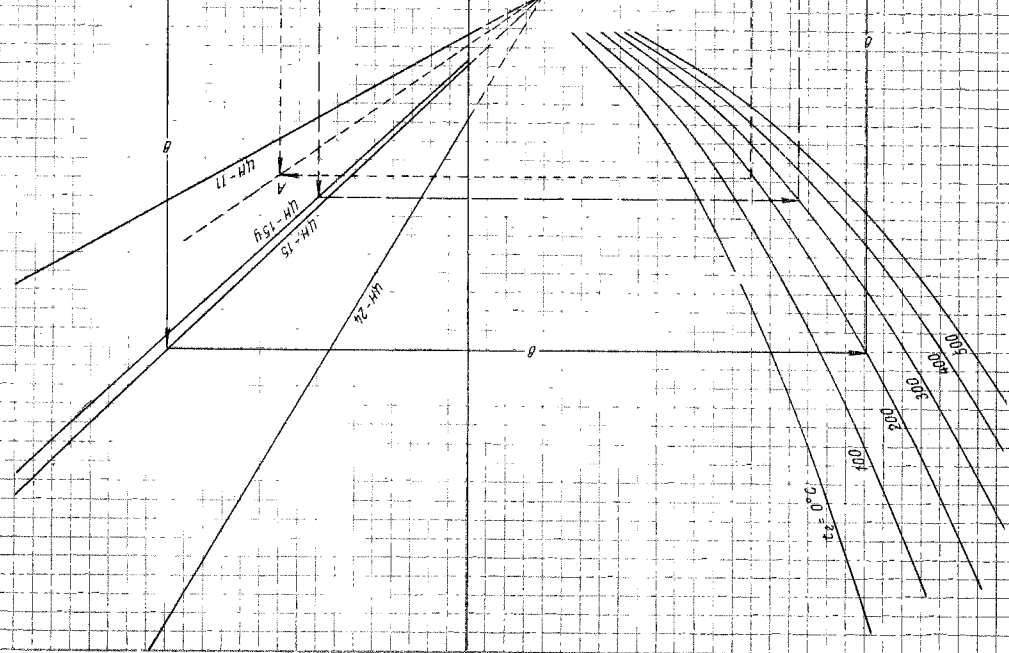
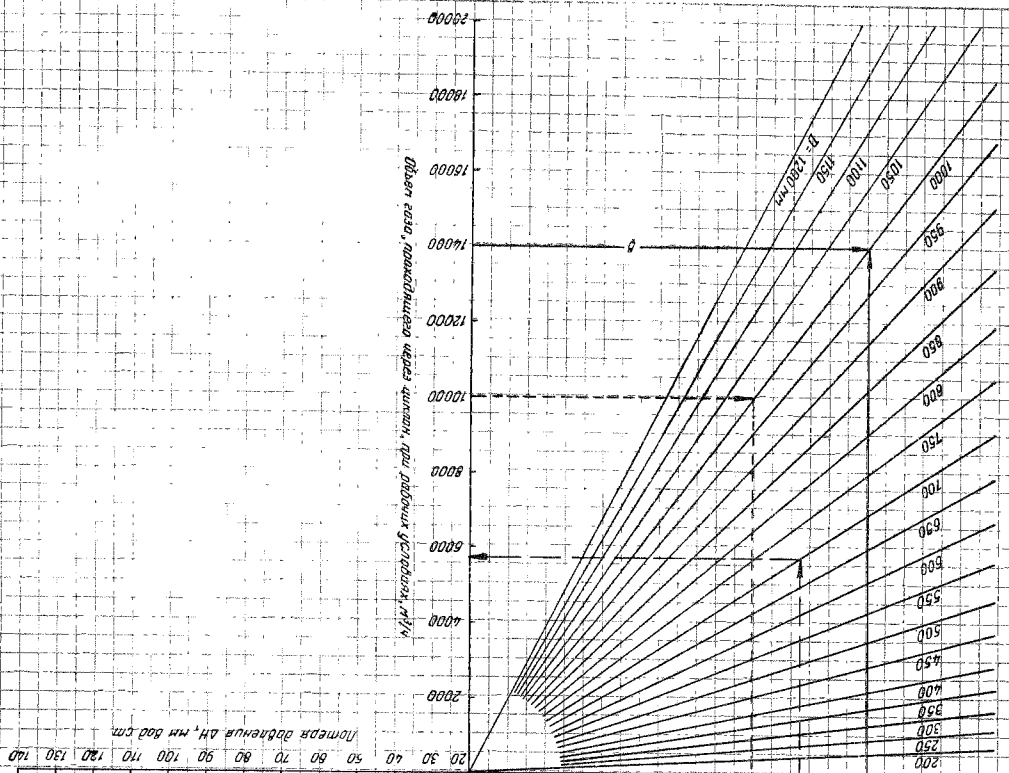


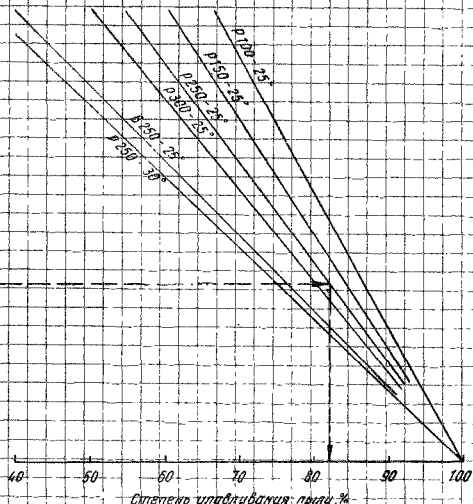
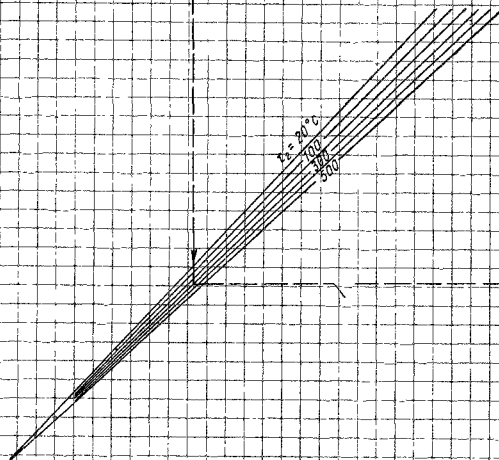
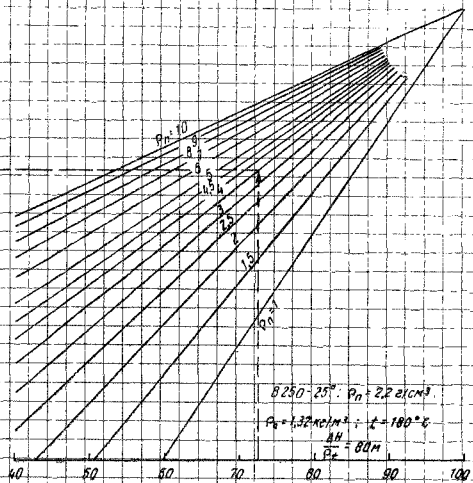
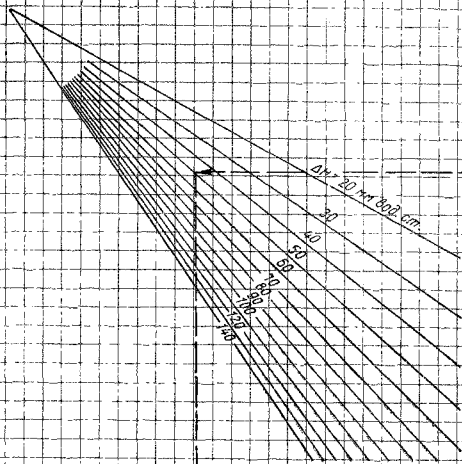






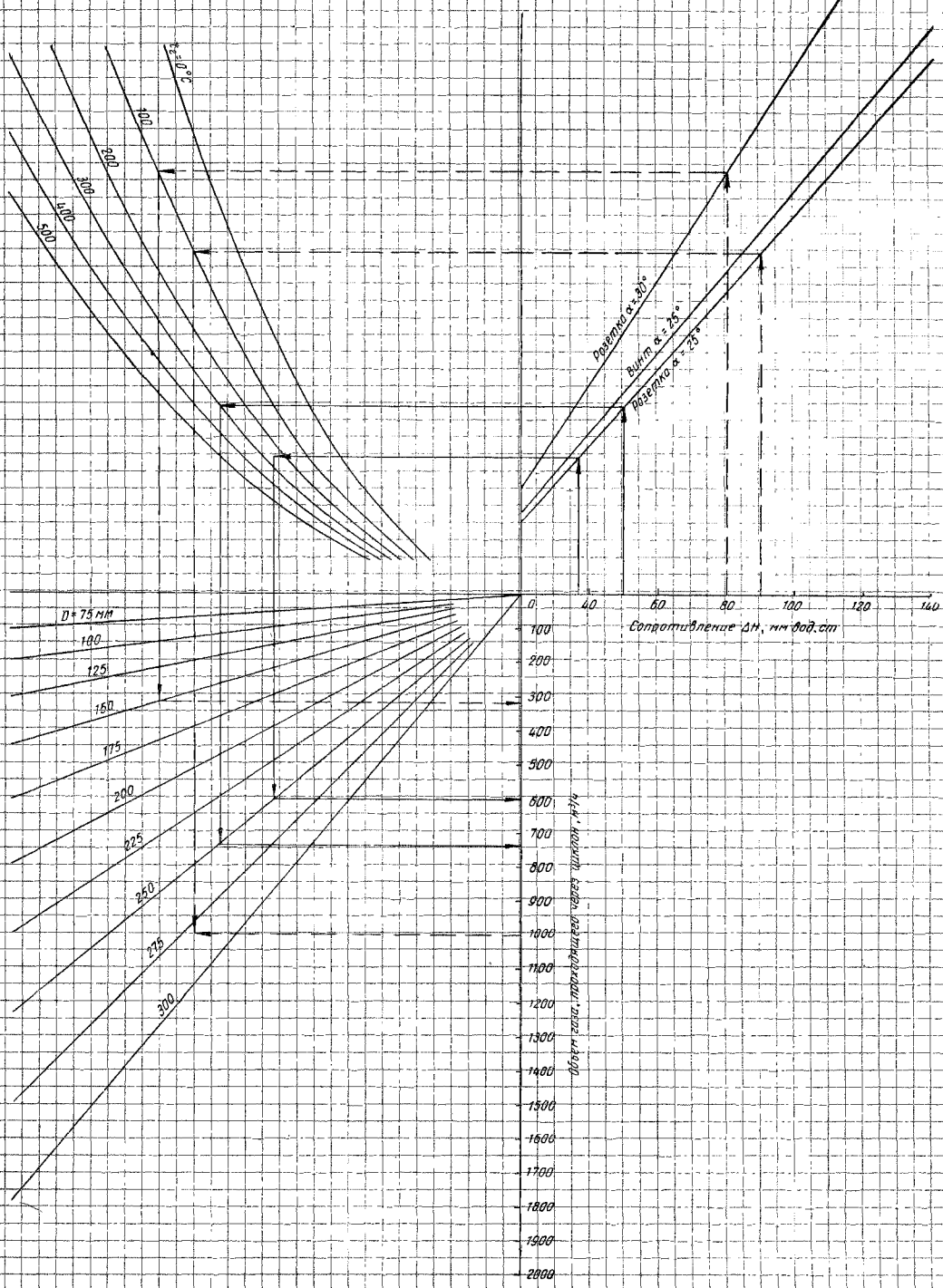


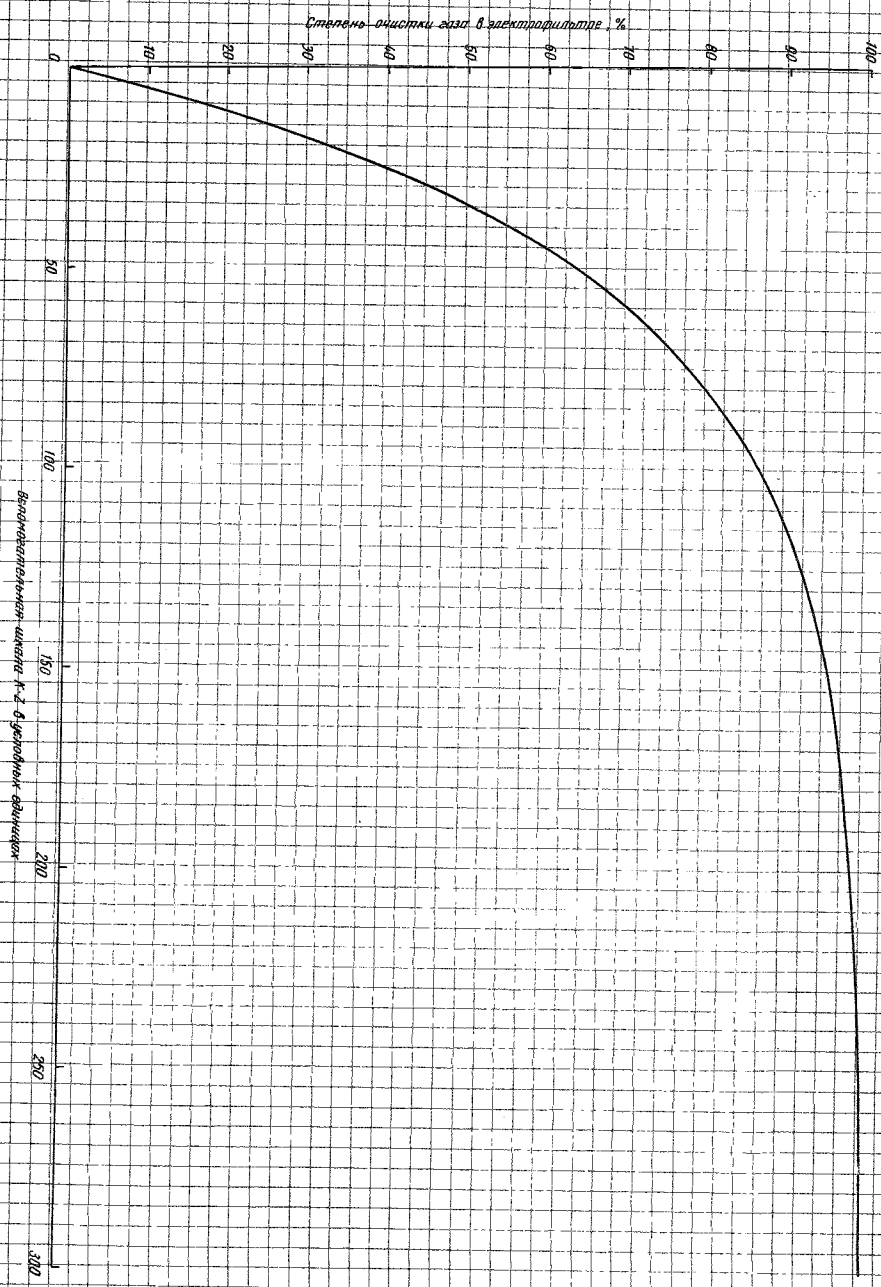


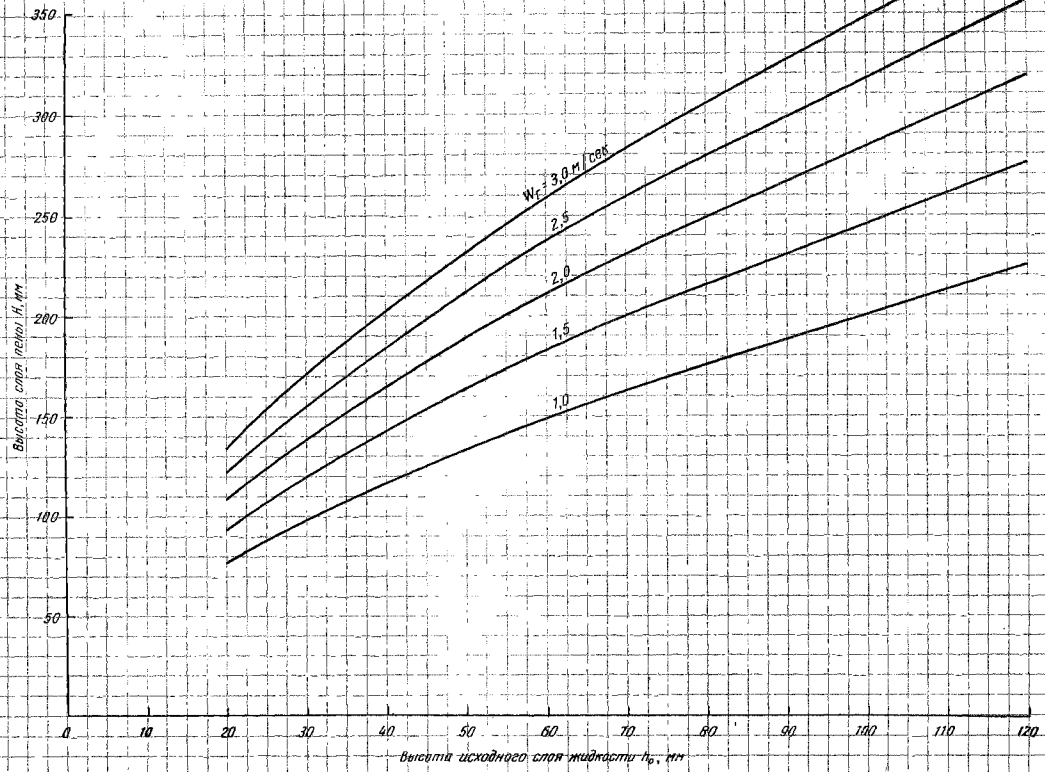


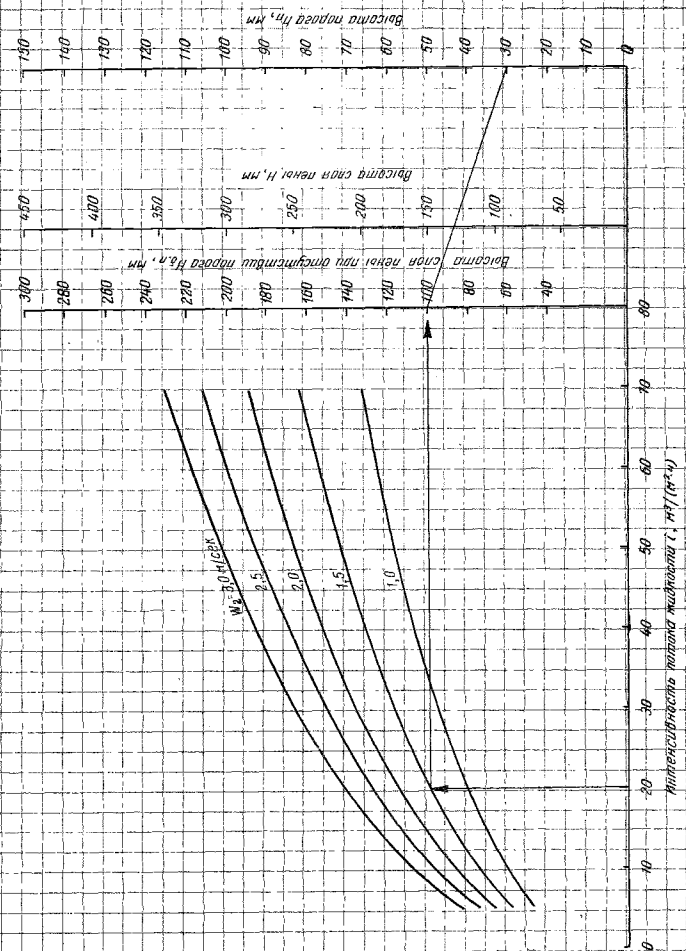
Условные обозначения

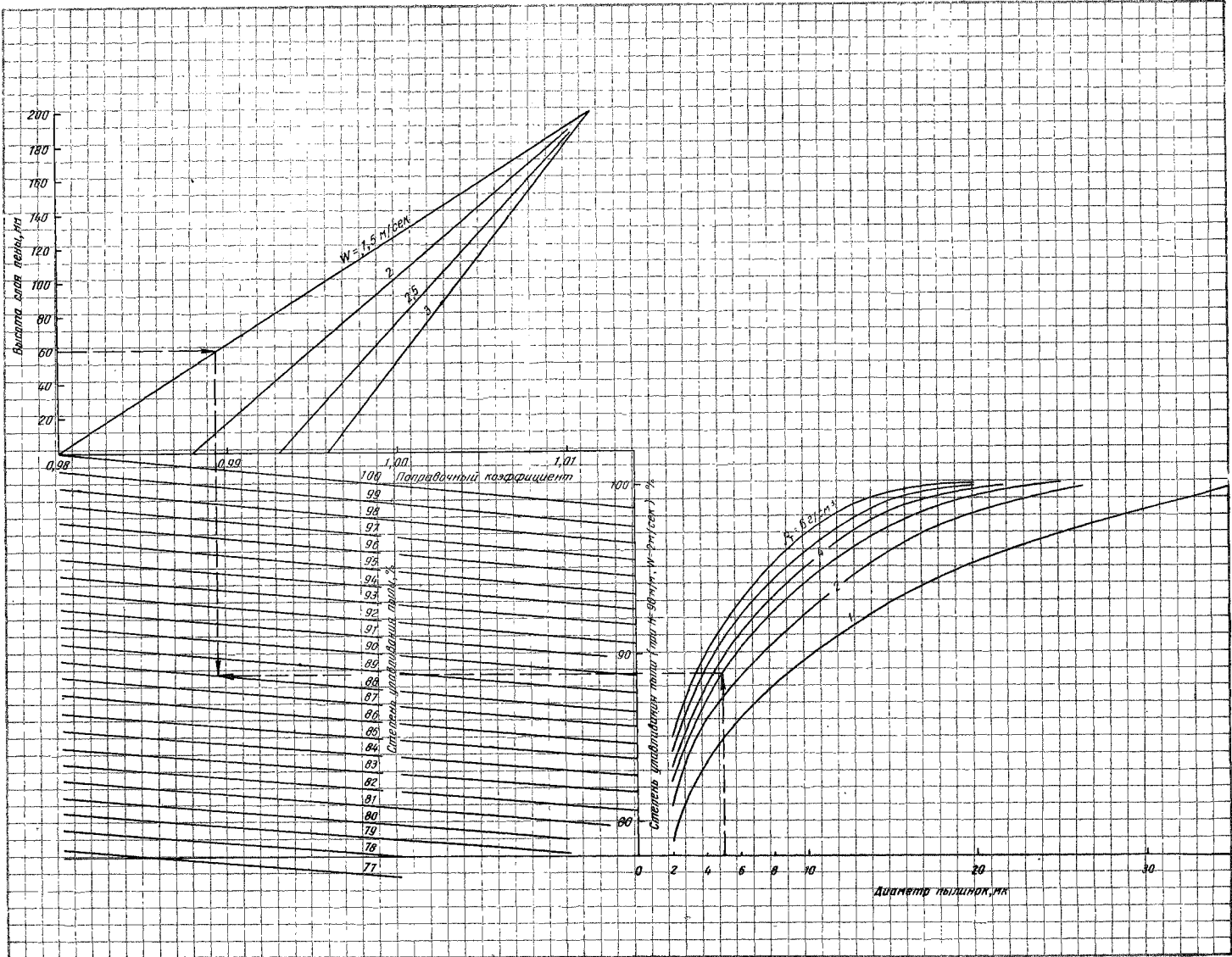
| Элемент | Диаметр, мм | Конструкция | Угол, градусы условные |
|------------------|-------------|-------------|------------------------|
| $P 250-25^\circ$ | 250 | Витка | 75 |
| $P 250-30^\circ$ | 250 | Розетка | 30 |
| $P 150-25^\circ$ | 150 | Розетка | 25 |
| $P 100-25^\circ$ | 100 | Розетка | 25 |
| $P 300-25^\circ$ | 300 | Розетка | 25 |

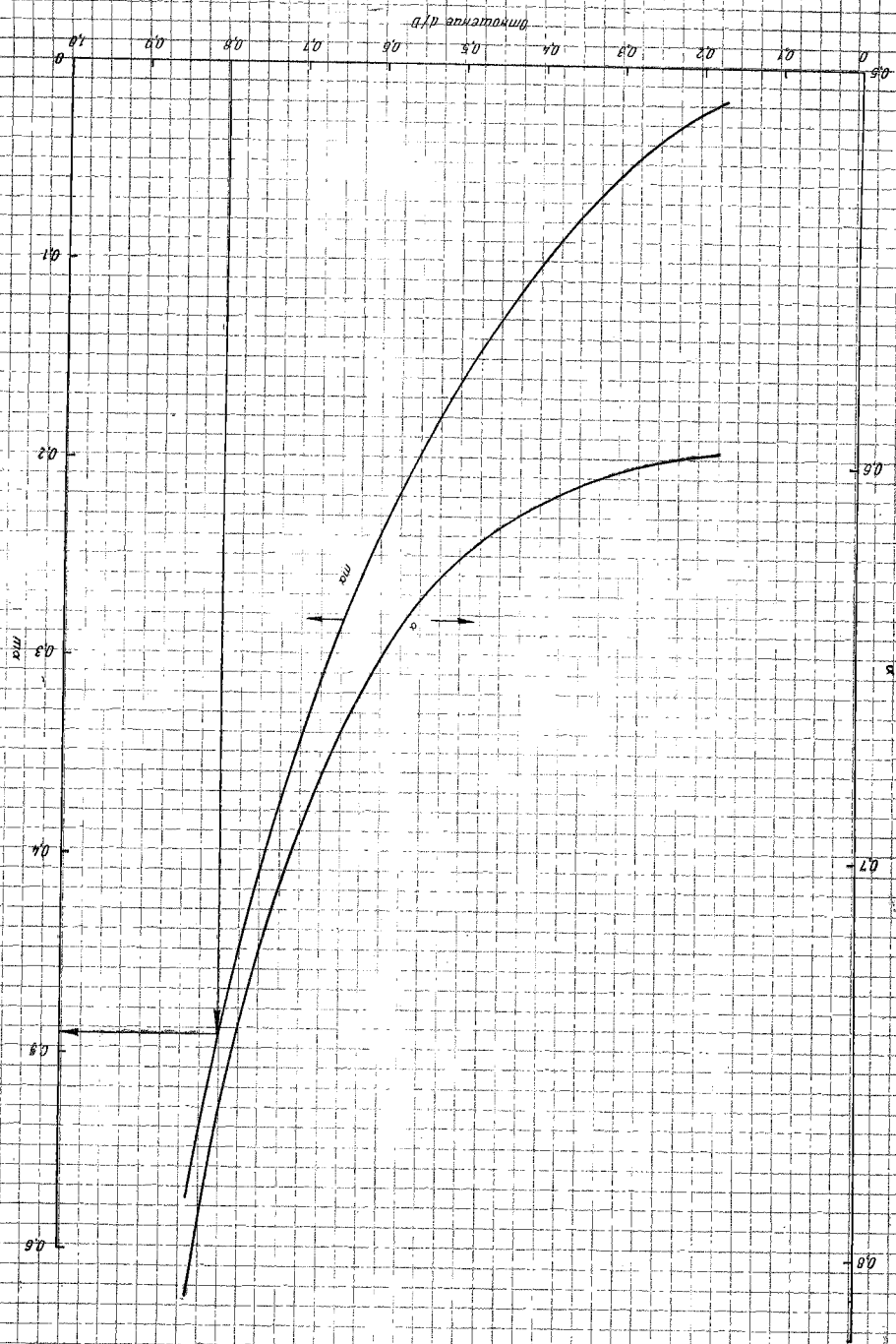




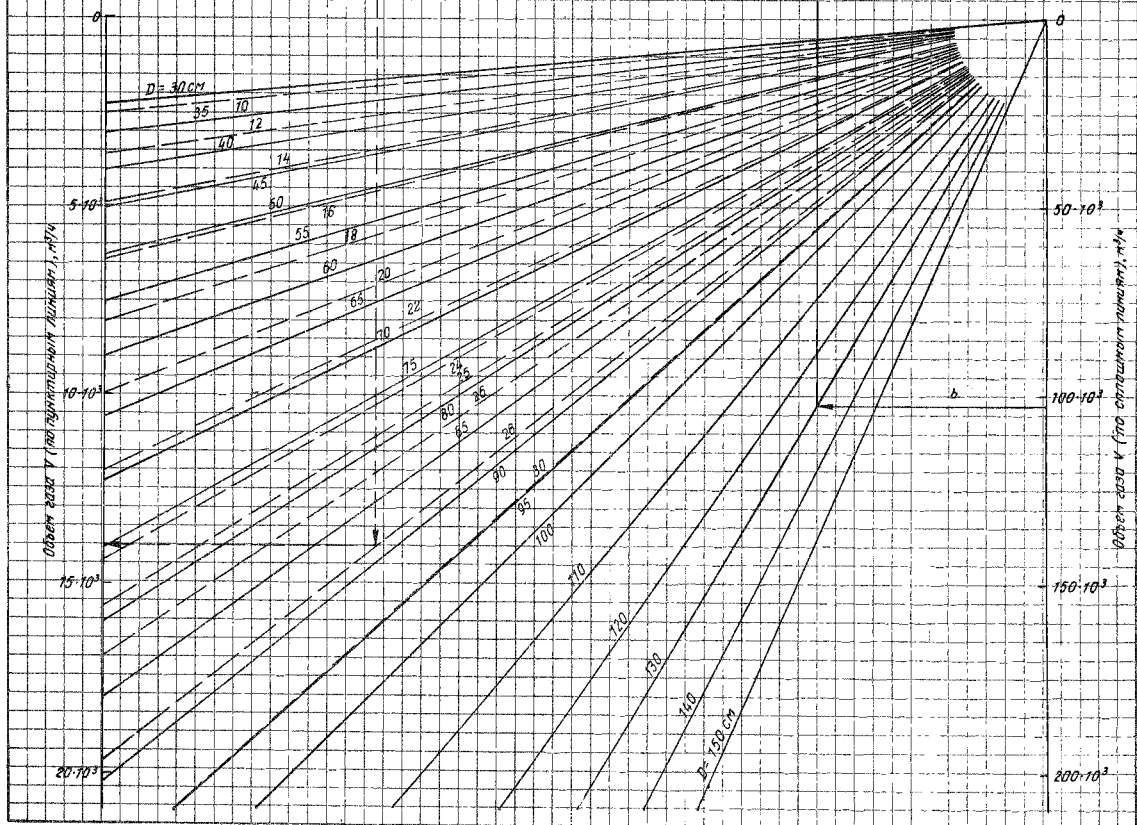
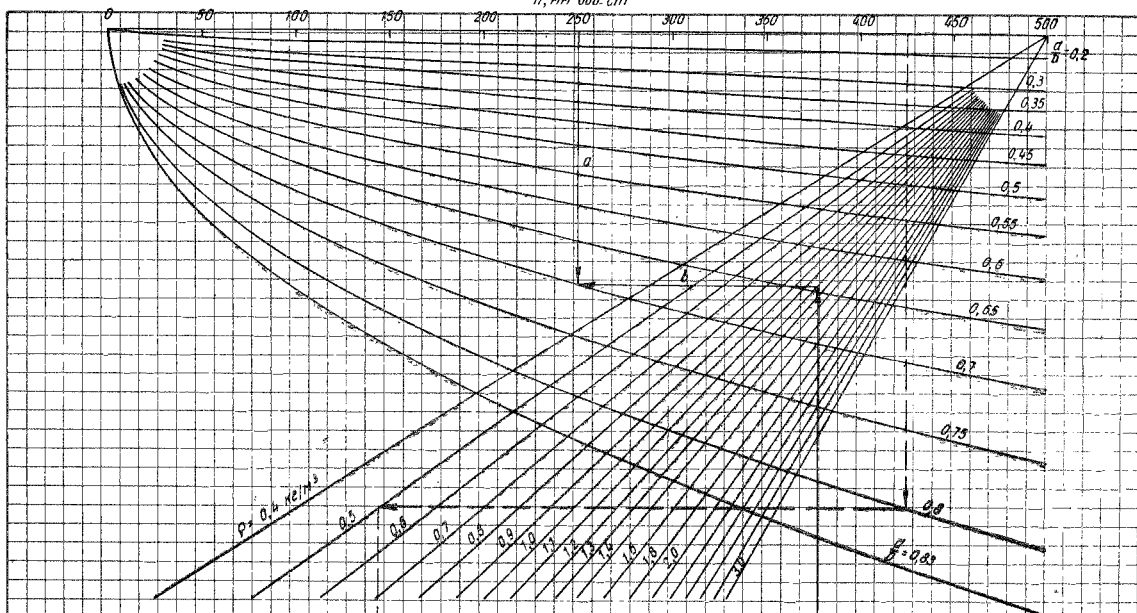




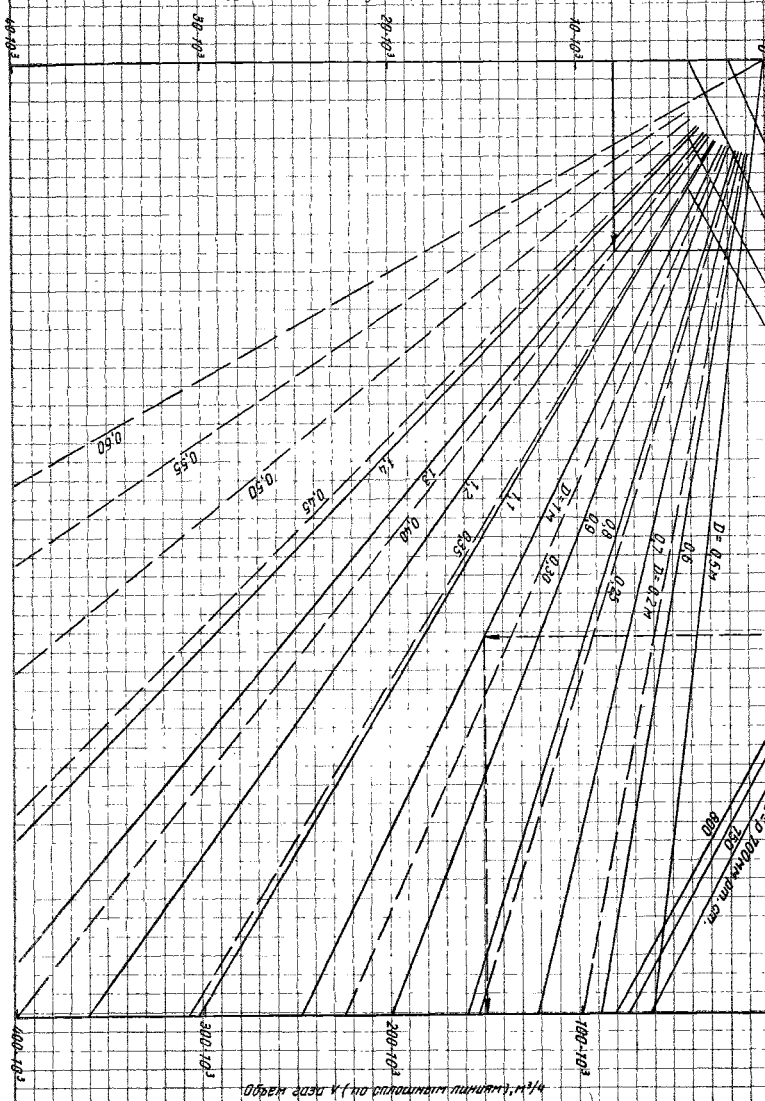




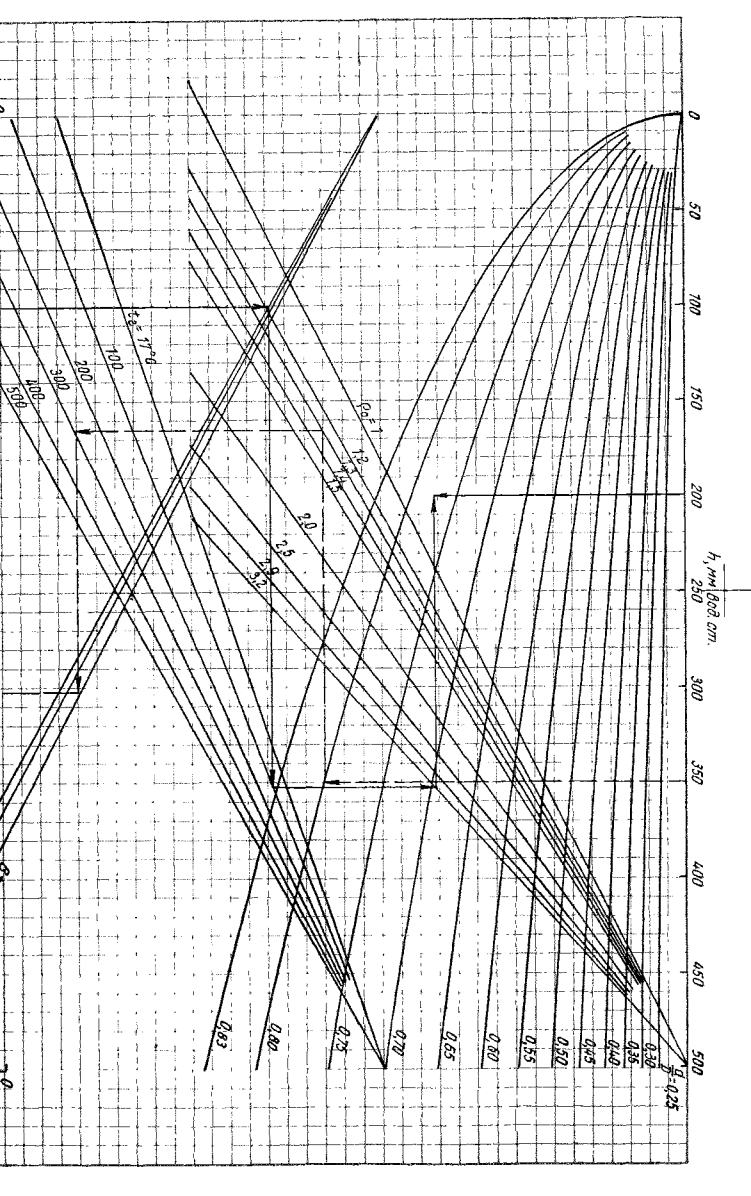
h, мм 800 см

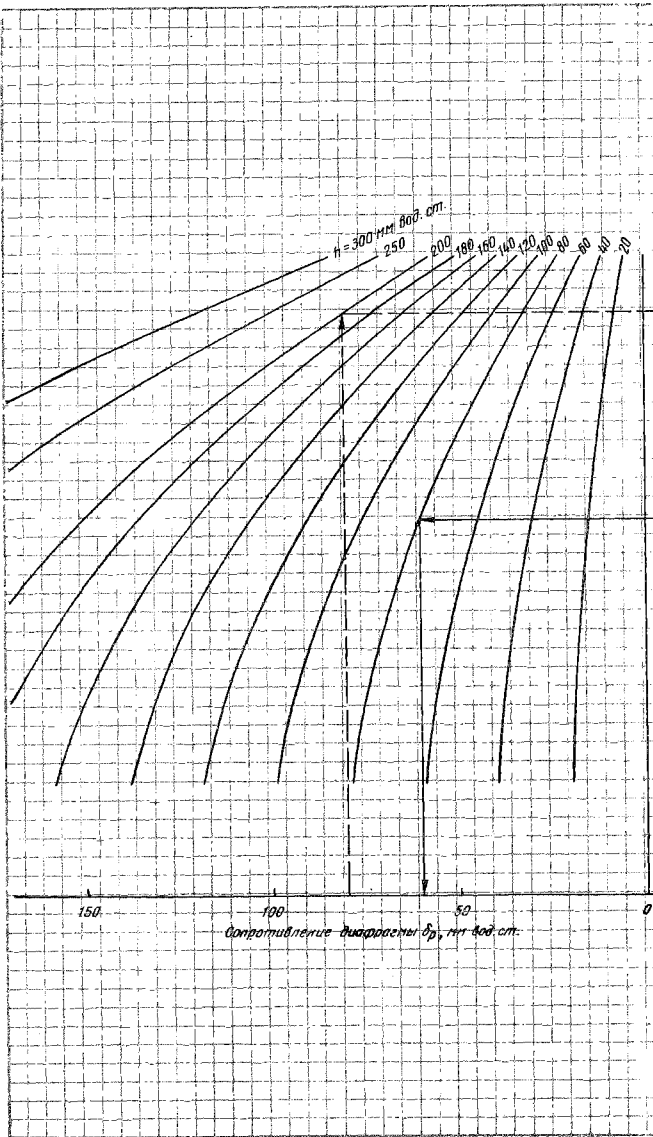


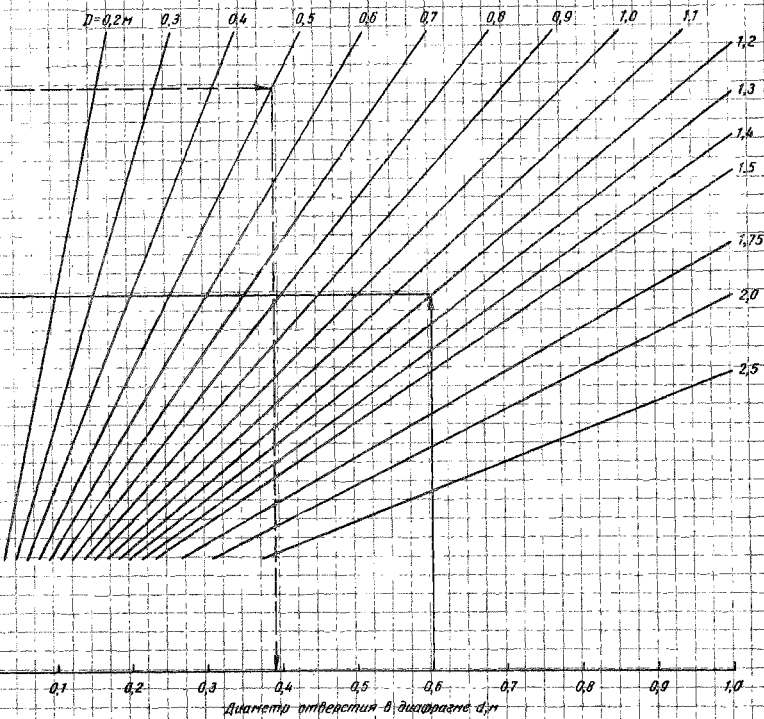
Объем газа V (по пунктирным линиям), м³/ч



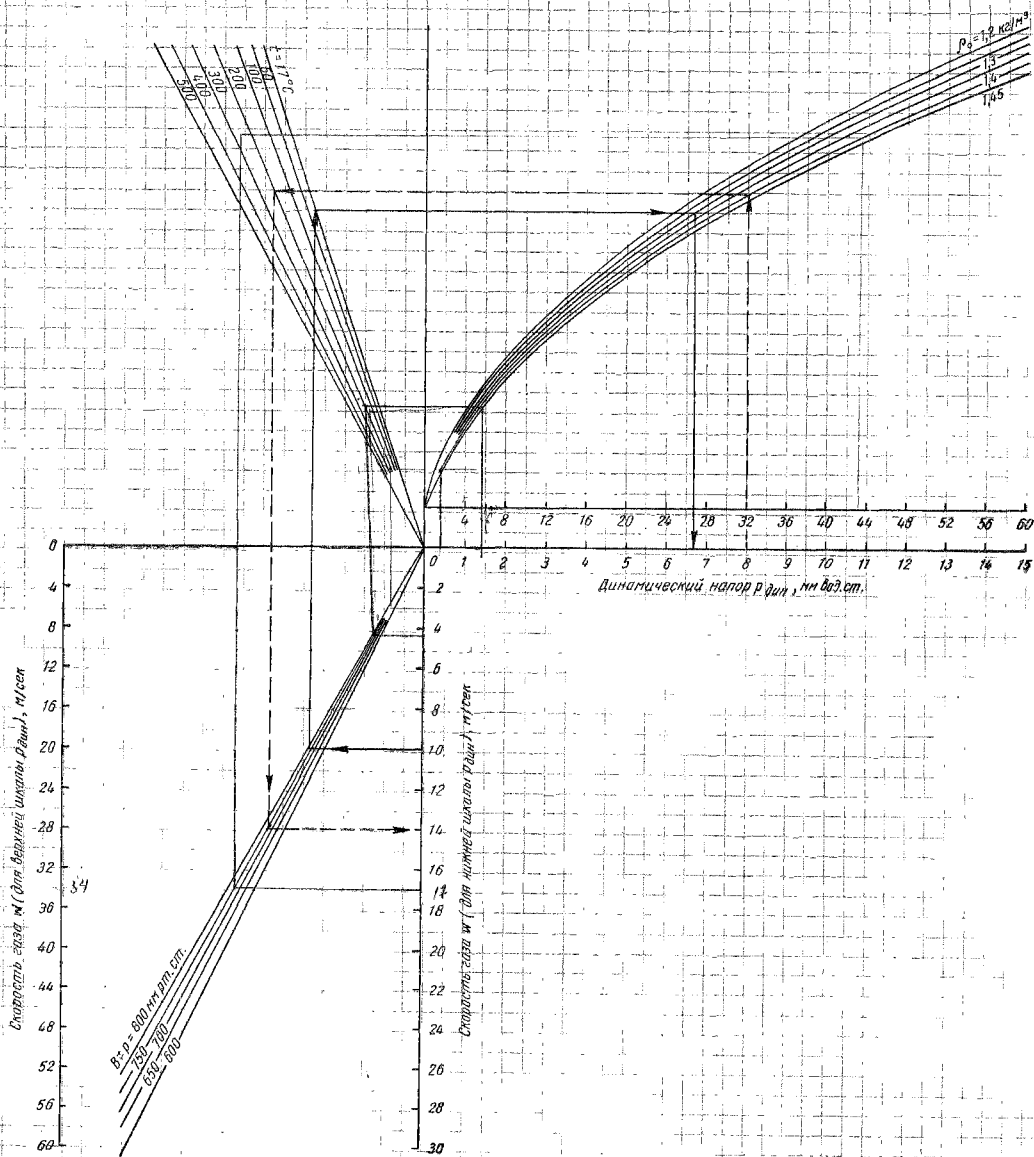
Объем газа V (по сплошным линиям), м³/ч

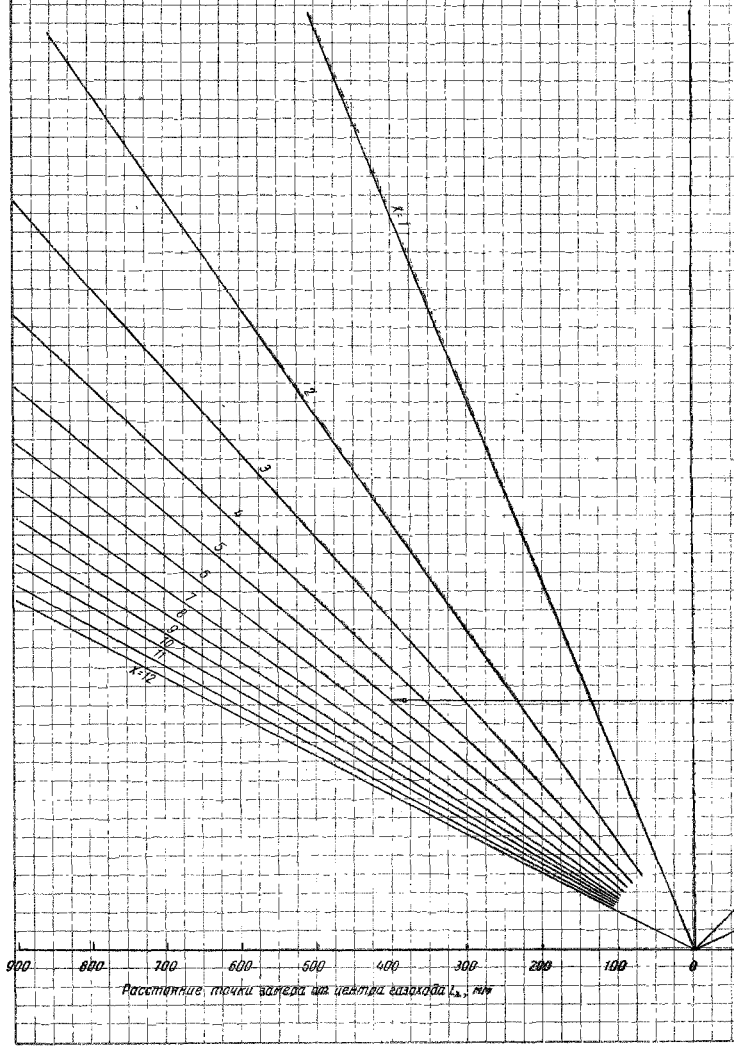


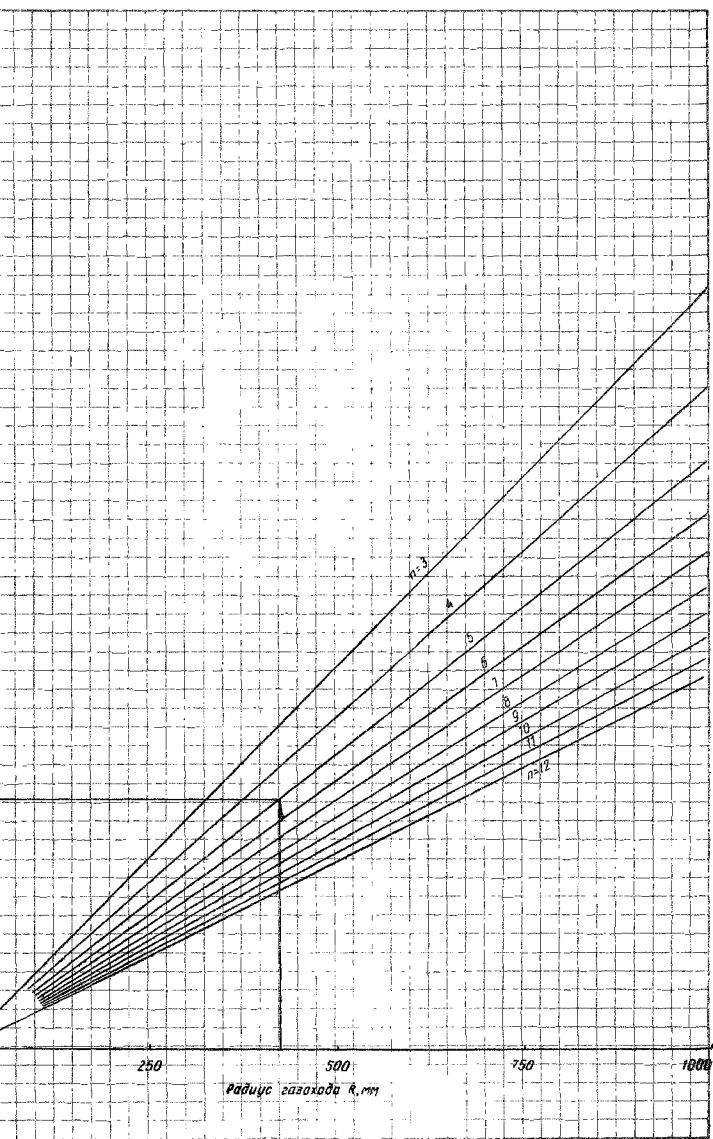


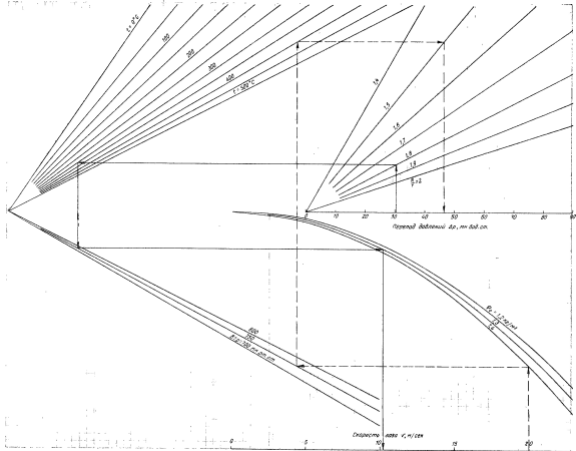


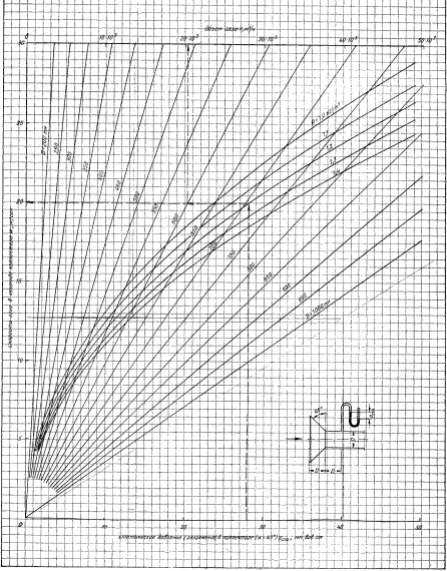
Диаметр отверстия в диаметре d, м

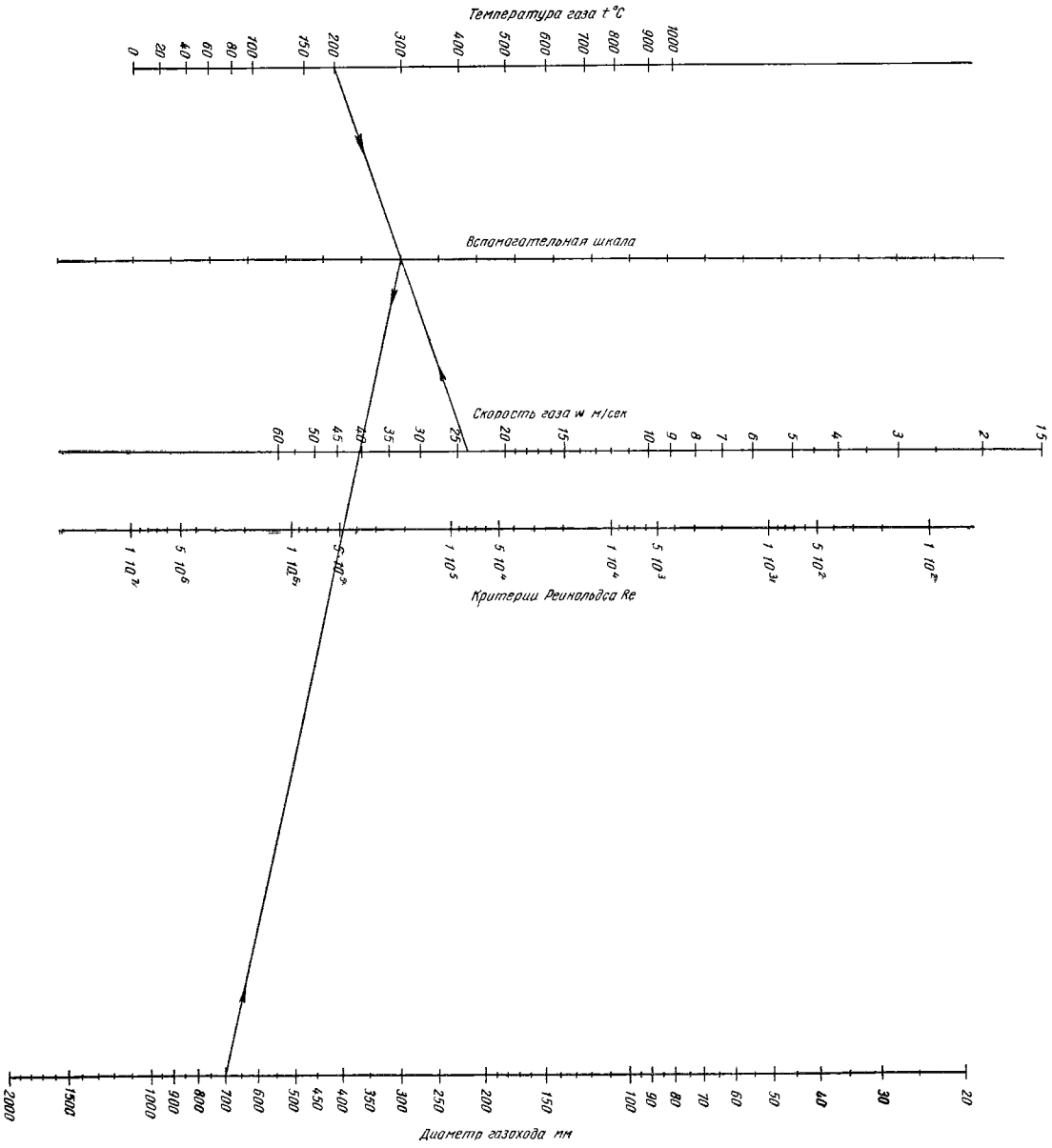


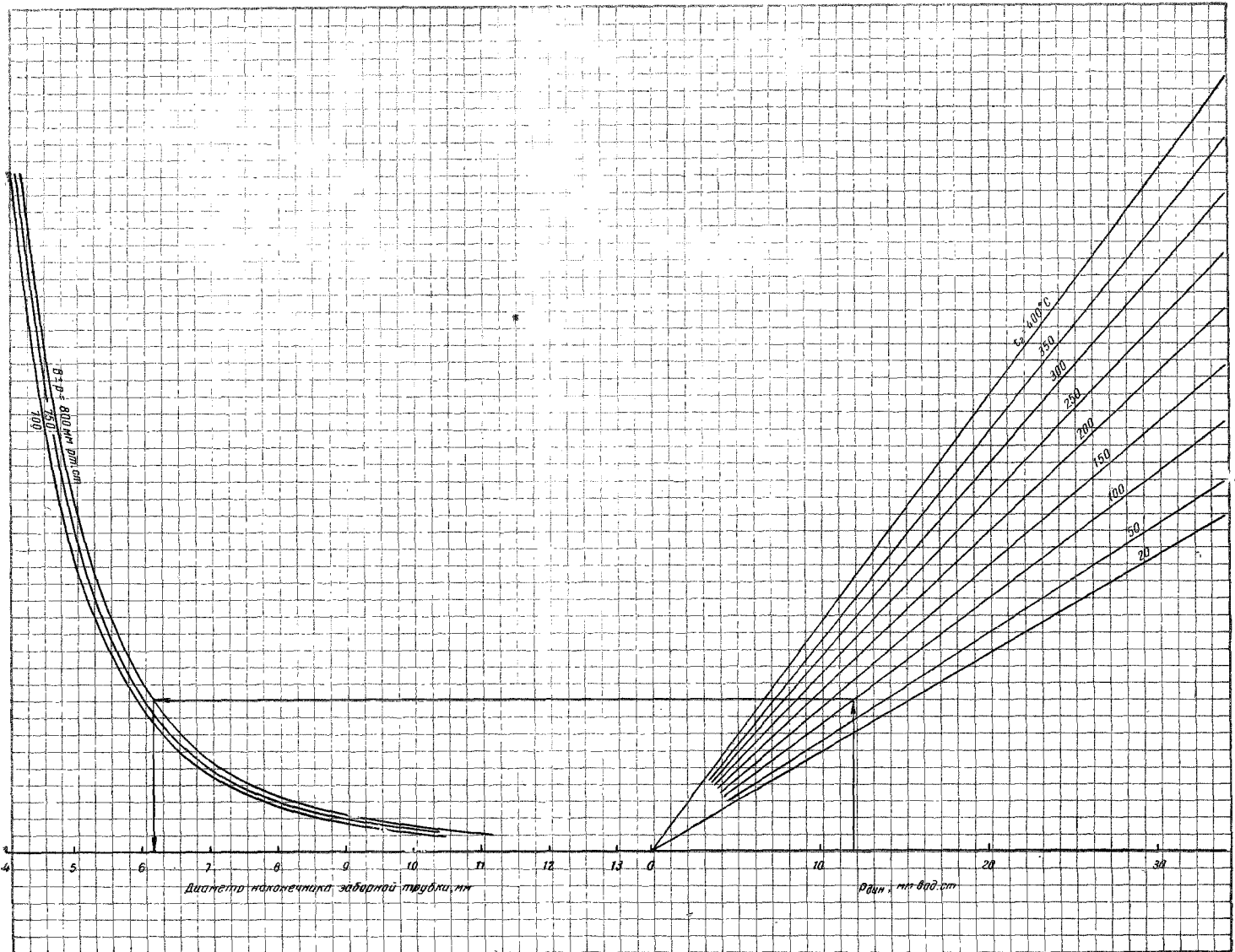


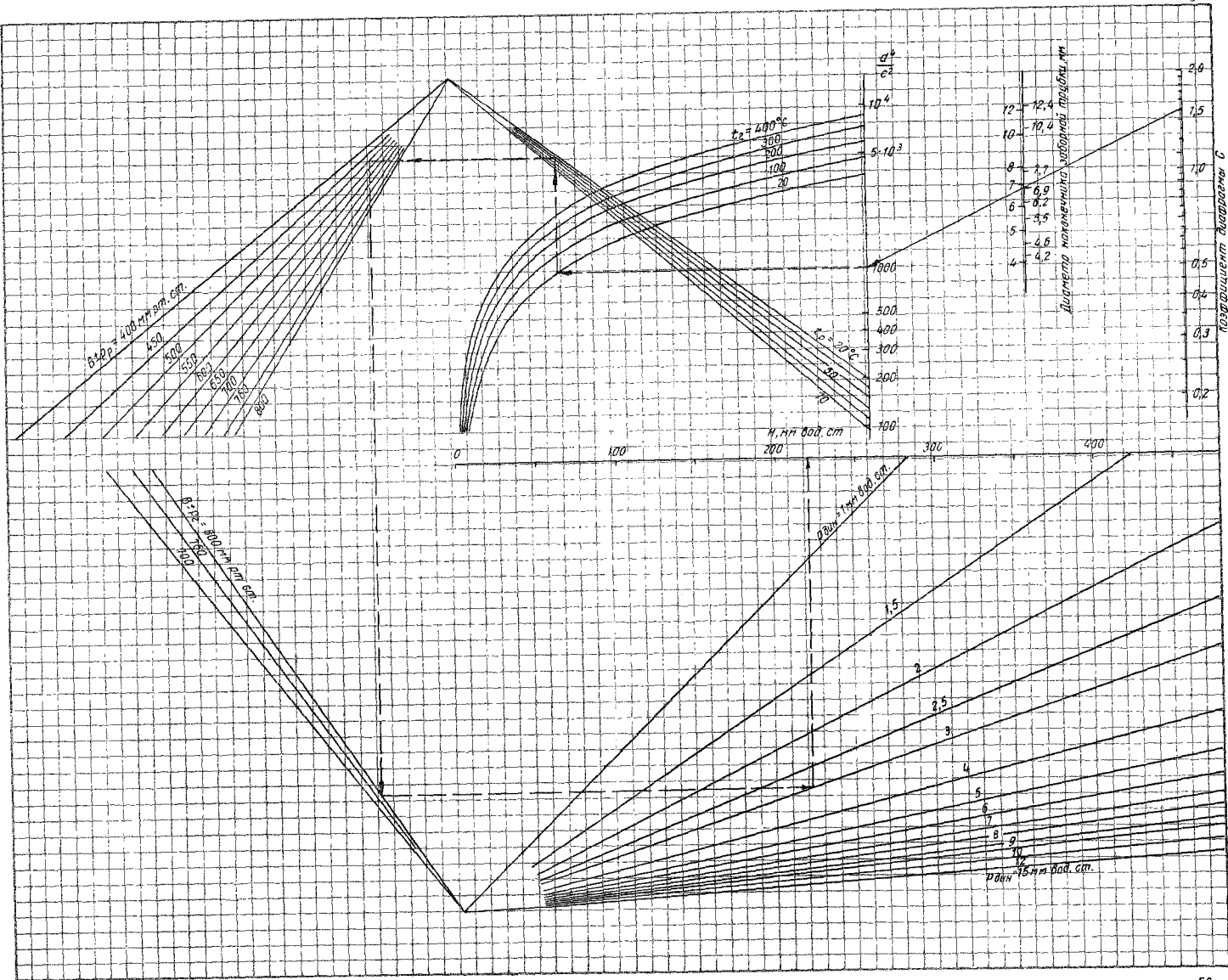


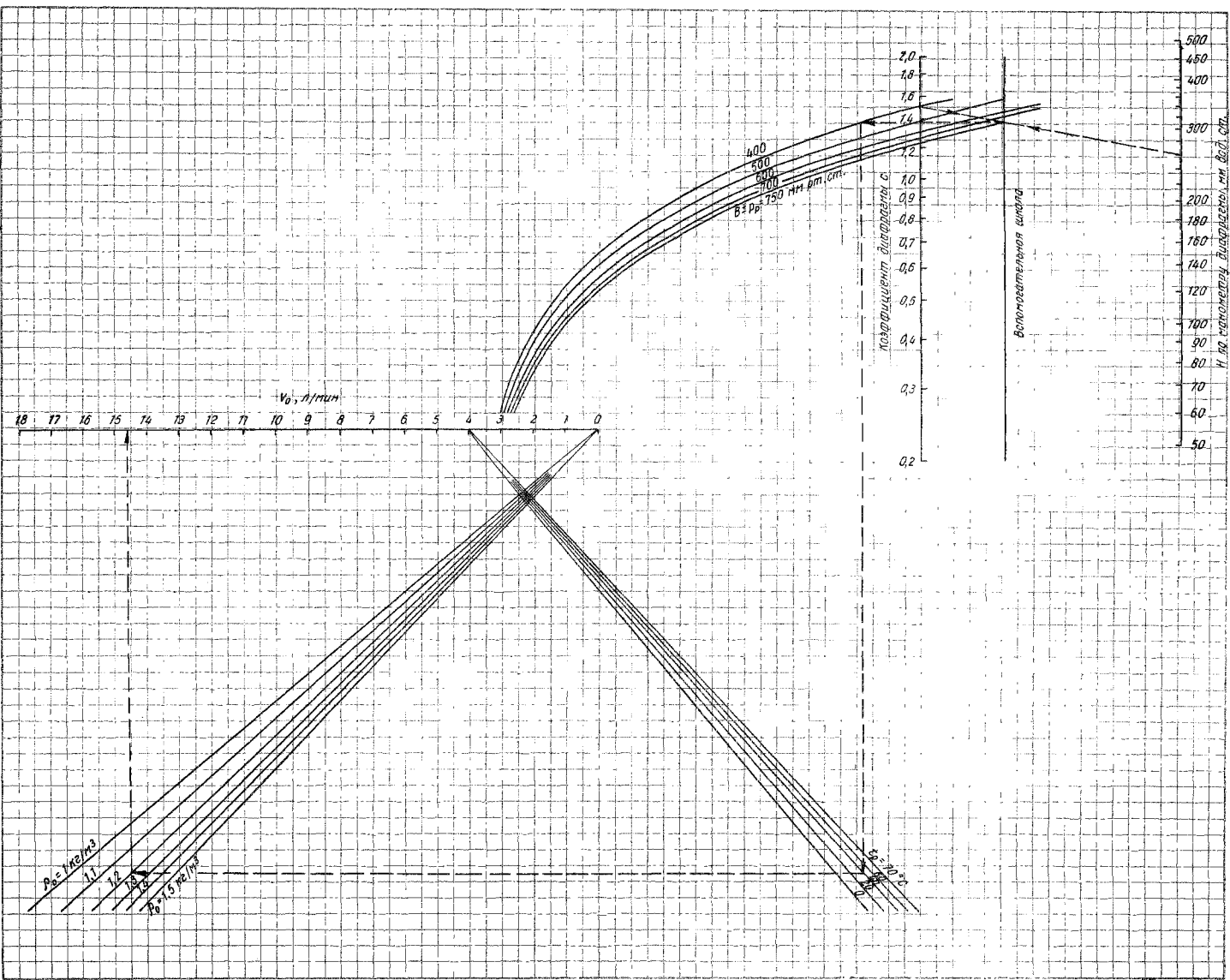


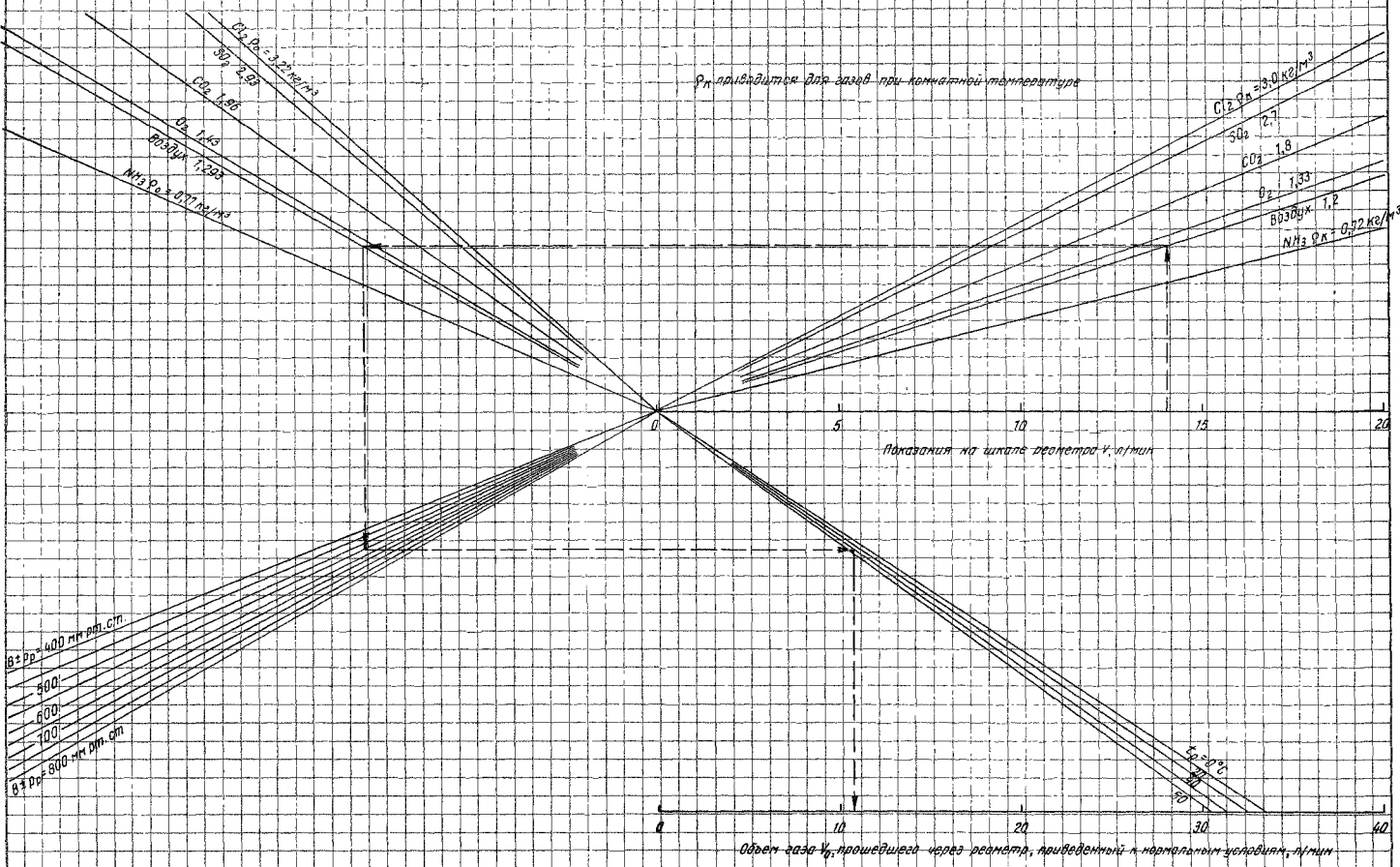












$t = 30^\circ \text{C}$
 100
 200
 300
 400
 500

$R_2 = 2000 \text{ мм} \cdot \text{см}^2$
 700
 800

