Я. И. Николинъ.
Профессоръ Томскаго Технологическаго Института Императора Николая II.

ГРАФИЧЕСКІЕ МЕТОДЫ
РАСЧЕТА
ВОДОСНАБЖЕНІЯ и КАНАЛИЗАЦІИ.

ВЫПУСКЪ II.

Классификація и теоретическія предпосылки номографическихъ способовъ расчета водопроводовъ.

Съ 10 таблицами чертежей.

ТОМСКЪ.
Типо-литографія Сибирскаго Товарищества Печ. Дѣла, уг. Дворянской ул. и Ямского пер., с. д.
1913.

Широкое развитіе въ послѣднія десятилѣтія XIX и въ началѣ XX вѣка постройки водопроводныхъ и канализаціонныхъ сооруженій поставило вопросъ объ упрощеніи способовъ гидравлическаго расчета, въ видахъ сбереженія труда и времени, самымъ настоятельнымъ образомъ. Подъ давленіемъ необходимости въ практикѣ расчета трубопроводовъ явилось новое теченіе, которое выразилось въ стремленіи къ возможному, безъ ущерба практической точности, упрощенію расчетныхъ формулъ, въ широкой разработкѣ вспомогательныхъ таблицъ, наконецъ, въ примѣненіи способовъ графическаго расчета. Всѣ эти способы, различными путями идущіе къ одной цѣли—упрощенію процесса гидравлическаго расчета, заслуживаютъ вниманія техниковъ спеціалистовъ, въ смыслѣ изученія и дальнѣйшаго развитія. Особенно интересными, и съ практической, и съ теоретической точки зрѣнія являются графическіе способы расчета, которые сводятся къ различнымъ методамъ преобразованія гидравлическихъ формулъ въ графическій видъ, а именно къ изображенію ихъ въ видѣ діаграммъ кривыхъ или прямыхъ линій, или особыхъ логарифмическихъ масштабовъ. И дѣйствительно, въ послѣднее время эти примѣненія начали привлекать къ себѣ болѣе замѣтное вниманіе. Однако техническая литература, посвященная данному вопросу, какъ на русскомъ, такъ и на иностранныхъ языкахъ, пока ограничивается почти исключительно болѣе или менѣе краткими сообщеніями, разбросанными въ разныхъ журналахъ по поводу отдѣльныхъ способовъ графическаго расчета, причемъ бросается въ глаза недостаточность теоретическихъ обоснованій и обобщеній. Матеріалы, могущіе служить для освѣщенія вопроса, какъ теоретическіе, такъ и практическіе (таблицы, альбомы) являются еще болѣе разбросанными и отрывочными. Эти обстоятельства, въ особенности же теоретическій интересъ и практическая важность новаго теченія, заставляютъ считать своевременнымъ изученіе вопроса о примѣненіи графическихъ методовъ всякаго рода къ расчету водоснабженія и канализаціи, въ видахъ, съ одной стороны, систематизаціи и освѣщенія этихъ методовъ съ ихъ теоретическими предпосылками, математическими и гидравлическими, и съ вытекающими изъ нихъ обобщеніями и выводами, съ другой—въ видахъ популяризаціи этихъ методовъ среди спеціалистовъ, которая можетъ содѣйствовать ихъ практическому приложенію и дальнѣйшей разработкѣ.

Работая въ этомъ направленіи по опредѣленному плану надъ отдѣльными способами графическаго расчета трубопроводовъ, я считаю не лишнимъ изложить въ настоящей статьѣ, возможно краткимъ образомъ, нѣкоторыя свѣдѣнія и соображенія, относящіяся ко всѣмъ вообще способамъ такого расчета. Я имѣю въ виду систематизировать существующіе способы графогидравлическаго расчета, познакомить съ ихъ сущностью и формой, и указать ту математическую основу, къ которой они сводятся. Моей задачей въ данномъ случаѣ является—привлечь вниманіе къ этому вопросу во всей его полнотѣ и дать лицамъ, которыя могли бы заинтересоваться разработкой отдѣльныхъ методовъ, общія свѣдѣнія о теоретическихъ основаніяхъ, отъ которыхъ исходятъ эти методы, и въ которыхъ нужно искать путей для дальнѣйшаго развитія. Съ этою же цѣлью я даю въ концѣ статьи возможно полный перечень литературы вопроса.

Графическіе способы расчета трубопроводовъ, которые были предложены до настоящаго времени, могутъ быть классифицированы слѣдующимъ образомъ.

1) *Діаграммы для опредѣленія* различныхъ *коэффиціентовъ* гидравлическихъ формулъ.

2) Графическія таблицы для изображенія соотношеній между величинами въ видѣ системы прямыхъ и *кривыхъ* линій (*діаграммы изоплетныхъ кривыхъ*). Таковы діаграммы Баумейстера, Гобрехта, Гергарда, Гюртена, Колиньона, Д'Обрива и Вильрю, Коффина, Э. и Г. Тэйлоръ, П. Ф. Горбачева.

3) *Логарифмографическія* таблицы для изображенія соотношеній между логарифмами величинъ въ видѣ системы *прямыхъ* линій *(діаграммы изоплетныхъ прямыхъ)*. Таковы діаграммы Тима, Франка, Фромма, фонъ-Мейдена, В. А. Саткевича, М. С. Ясюковича.

4) Изображеніе соотношеній между логарифмами величинъ въ видѣ діаграммъ *сопряженныхъ масштабовъ*, построенныхъ *по методу масштабовъ функцій*. Таковы діаграммы по формулѣ Лампе для метрическихъ мѣръ Венера, для русскихъ—проф. Н. К. Чижова.

5) Примѣненіе *счетныхъ* логарифмическихъ *линеекъ для гидравлическаго расчета* (главнымъ образомъ, въ Англіи), которыя представляютъ одинъ изъ видовъ *сопряженныхъ масштабовъ*.

6) *Діаграммы сопряженныхъ масштабовъ*, построенныя по *методу точекъ прямолинейнаго пересѣченія* (*діаграммы или „абаки" изоплетныхъ точекъ*). Таковы діаграммы: по формулѣ Леви—Валло для метрическихъ мѣръ Даріэса; по формулѣ Фламана для метрическихъ мѣръ Бертрана и (сокращенная) Даріэса, для англійскихъ (и русскихъ) мѣръ помѣщенная въ курсѣ проф. М. М. Черепашинскаго.

7) Примѣненія графическихъ методовъ къ расчету *сомкнутой* водопроводной *сѣти*, напримѣръ, способъ, предложенный М. С. Ясюковичемъ.

Перечисленные графическіе способы расчета трубопроводовъ нужно раздѣлить на два вида, существенно отличающіеся другъ отъ друга, именно на способы просто *графическіе* и способы *номографическіе*. Послѣдній терминъ относится къ тѣмъ способамъ, которые основаны на принципахъ математической науки, извѣстной подъ названіемъ *Номографіи*. Чтобы установить различіе между только что указанными видами графогидравлическаго разсчета, достаточно разъяснить общій характеръ Номографіи.

Подъ именемъ Номографіи разумѣется теорія графическаго представленія математическихъ законовъ, выражаемыхъ уравненіями съ какимъ либо числомъ перемѣнныхъ.

Если для всѣхъ перемѣнныхъ, которыя связаны извѣстнымъ уравненіемъ, построить систему геометрическихъ элементовъ (точекъ или линій), градуированныхъ въ соотвѣтствіи съ значеніями этихъ перемѣнныхъ, и если связь между перемѣнными, установленная уравненіемъ, выражается геометрически легко опредѣляемыхъ относительнымъ положеніемъ соотвѣтствующихъ геометрическихъ элементовъ, то совокупность послѣднихъ представляетъ діаграмму даннаго уравненія. Подъ именемъ Номографіи разумѣется теорія такихъ діаграммъ.

Въ примѣненіи къ практикѣ *Номографія* ставитъ своею цѣлью свести вычисленія, которыя являются необходимыми въ различныхъ отрасляхъ техники, къ простому *чтенію* на *графическихъ таблицахъ*, составленныхъ разъ навсегда.

Этотъ *постоянный характеръ діаграммъ* даетъ основаніе проводить разницу между *Номографіей* и *графическимъ расчетомъ* въ собственномъ значеніи слова.

Номографическія діаграммы изображаютъ результаты извѣстнаго соотношенія *для всѣхъ возможныхъ значеній данныхъ элементовъ* въ опредѣленныхъ предѣлахъ. Можно сказать, что номографическая діаграмма представляетъ синтезъ геометрическихъ построеній, соотвѣтствующихъ безконечному количеству различныхъ значеній элементовъ, фигурирующихъ въ расчетѣ. Что касается *графическаго расчета* въ собственномъ значеніи слова, то здѣсь *въ примѣненіи къ даннымъ каждаго частнаго случая* числовой расчетъ замѣняется вычерчиваніемъ эпюры. Каждый разъ *для новаго состава данныхъ* приходится составлять *новую эпюру*.

Такой именно расчетъ составляетъ предметъ Графической статики.

Изъ семи перечисленныхъ выше способовъ графическаго расчета трубопроводовъ *первые шесть* относятся къ категоріи *номографическаго* расчета, а *седьмой* (расчетъ сѣти) представляетъ типъ расчета *просто графическаго*, который можно было бы называть, въ отличіе отъ номографическаго, *идіографическимъ*.

Мы ограничиваемъ наше изложеніе въ настоящей статьѣ номографическими способами расчета и расположимъ свѣдѣнія, относящіяся къ отдѣльнымъ способамъ этой категоріи, въ порядкѣ послѣдовательнаго развитія тѣхъ номографическихъ методовъ, которые положены въ ихъ основаніе.

Первымъ по времени изъ такихъ методовъ является *принципъ Декартовыхъ прямоугольныхъ координатъ*, положенный также въ основу Аналитической геометріи. Всѣмъ извѣстно графическое изображеніе функціи одной перемѣнной

$$y = f\ (x) \tag{1}$$

или, что все равно, уравненія между двумя перемѣнными

$$\varphi\ (x, y) = 0. \tag{2}$$

По абсциссамъ прямоугольной системы координатъ (черт. 1) откладываютъ величины x, а по ординатамъ величины y, и получаютъ кривую, изображающую зависимость этихъ двухъ перемѣнныхъ.

Въ практикѣ этотъ номографическій пріемъ постоянно примѣняется для изображенія зависимости между величинами, получаемой въ результатѣ физическихъ опытовъ.

Въ примѣненіи къ расчету трубопроводовъ онъ употребляется въ тѣхъ случаяхъ, когда искомая величина является функціей одной перемѣнной. Такой именно случай представляютъ діаграммы, изображающія измѣненія величины *коэффиціента скорости* k въ зависимости отъ гидравлическаго радіуса сѣченій при опредѣленной степени шероховатости, или діаграммы расходовъ для опредѣленнаго діаметра при разныхъ гидравлическихъ уклонахъ, которыя приходится нерѣдко строить спеціально, въ видахъ удобства расчета, примѣнительно къ условіямъ работы проектируемыхъ трубопроводовъ. При этомъ обыкновенно діаграммы вычерчиваются на сѣткѣ взаимно-пересѣкающихся координатъ съ равномѣрно возрастающими отмѣтками. Въ качествѣ примѣра номографическихъ діаграммъ этого рода приводится діаграмма (черт. 2) для величины k при гидравлическихъ радіусахъ отъ 0,010 до 0,500, опредѣляемой по сокращенной формулѣ Гангилье-Куттера

$$k = \frac{100\sqrt{\rho}}{b + \sqrt{\rho}}, \tag{3}$$

при коэффиціентѣ шероховатости b равномъ 0,35, т. е. для случая обыкновенныхъ чугунныхъ трубъ. Пользованіе такими діаграммами понятно само собой.

Методъ номографическаго представленія уравненій съ тремя перемѣнными былъ примѣненъ впервые Пуше (Pouchet) въ его Arithmétique linéaire въ 1795 году, затѣмъ въ работахъ Obenheim'a, Piombert'a, Bellencontre'a, Allix'a и освѣщенъ теоретически Terquem'омъ и Лаланномъ (Lalanne) (работы эти относятся къ первой половинѣ XIX столѣтія). Методъ Пуше служитъ основаніемъ для представленія зависимости между элементами гидравлическаго расчета въ видѣ системъ кривыхъ и прямыхъ линій, которыя мы называемъ *діаграммами изоплетныхъ кривыхъ.*

Предварительно разъясненія этого метода, мы должны дать понятіе объ одномъ изъ основныхъ принциповъ Номографіи, который приходится примѣнять и въ данномъ случаѣ, и въ дальнѣйшемъ изложеніи.

Пусть имѣется нѣкоторая функція $f(x)$ независимой перемѣнной x, въ такихъ предѣлахъ, что для каждаго значенія перемѣнной x имѣется только одно опредѣленное значеніе функціи. Будемъ наносить на оси OX, отъ начала координатъ O (черт. 3), длины

$$\begin{aligned} l_1 &= \lambda f(x_1), \\ l_2 &= \lambda f(x_2), \\ l_3 &= \lambda f(x_3), \\ &\ldots\ldots\ldots \end{aligned} \tag{4}$$

гдѣ λ—произвольно выбранная длина, и надпишемъ надъ точками, обозначающими концы отрѣзковъ l_1, l_2, l_3. . . , соотвѣтствующія значенія x_1, x_2, x_3. . . , перемѣнной.

Совокупность полученныхъ такимъ образомъ точекъ съ числовыми отмѣтками составитъ *масштабъ функціи* $f(x)$. Длина λ называется *модулемъ* этого *масштаба.*

Если масштабъ функціи долженъ быть ограниченъ двумя частными значеніями перемѣнной, напр. x_0 и x_n, то можно построить его, начиная съ низшаго предѣла x_0, безъ участія начала координатъ O.

Чтобы получить точки x_1, x_2, x_3. . . , нужно нанести на оси, начиная отъ произвольно выбранной точки съ отмѣткой x_0, отрѣзки

$$\begin{aligned} l_1 &= \lambda\,[f(x_1) - f(x_0)], \\ l_2 &= \lambda\,[f(x_2) - f(x_0)], \\ l_3 &= \lambda\,[f(x_3) - f(x_0)], \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ L &= \lambda\,[f(x_n) - f(x_0)], \end{aligned} \tag{5}$$

гдѣ L—длина масштаба.

Принимая

$$f(x) = x \tag{6}$$

и измѣняя ее черезъ ровное и круглое число единицъ того или другого десятичнаго порядка, мы получимъ, путемъ указаннаго построенія, *нормальный* масштабъ. Въ зависимости отъ задачъ, подлежащихъ графическому рѣшенію, иногда приходится примѣнять построеніе къ инымъ функціямъ, и тогда получаются масштабы функцій другого характера, напр. *логарифмическіе, сегментные, изоградные* [1]).

---

[1]) Идея построенія масштабовъ функцій (въ примѣненіи къ логарифмической функціи) принадлежитъ Гюнтеру и относится къ началу XVII вѣка. Дальнѣйшія подробности о масштабахъ функцій см. d'Ocagne, Traité de Nomographie.

Итакъ допустимъ теперь, что мы имѣемъ уравненіе съ 3 перемѣнными вида

$$F(x, y, z) = 0, \tag{7}$$

которое желаемъ представить въ графической формѣ. Способъ, примѣненный для этой цѣли Пуше, сводится къ слѣдующему. Дадимъ одной изъ перемѣнныхъ, (по преимуществу той, которая чаще всего выражается въ видѣ функціи двухъ другихъ), напримѣръ z, опредѣленное значеніе. Тогда мы получимъ одно уравненіе съ двумя перемѣнными. Такое уравненіе легко представить въ видѣ кривой, вычерченной на сѣти прямоугольныхъ координатъ, опредѣляемой равенствами

$$\begin{aligned} x' &= \lambda_1 x, \\ y' &= \lambda_2 y, \end{aligned} \tag{8}$$

гдѣ λ_1 и λ_2 соотвѣтственно выбранные модули масштаба отложенія величинъ x и y по осямъ координатъ (ср. черт. 4).

Уравненіе этой кривой будетъ,

$$F\left(\frac{x'}{\lambda_1}, \frac{y'}{\lambda_2}, z\right) = 0. \tag{7'}$$

Такая кривая, на протяженіи которой элементъ z сохраняетъ одно и то же значеніе, была названа Лаланномъ кривой равнаго элемента (*courbe d'égale élément*), затѣмъ нѣмецкимъ авторомъ Фоглеромъ (Vogler) *изоплетной кривой* (ἴσος—равный, πλῆθος—величина). Этотъ послѣдній терминъ былъ затѣмъ принятъ и Лаланномъ.

Построимъ подобнымъ же образомъ кривыя, соотвѣтствующія цѣлому ряду значеній z, возрастающихъ черезъ опредѣленные промежутки, и будемъ надписывать при каждой кривой соотвѣтствующее ей значеніе z. При этомъ, конечно, достаточно провести часть каждой кривой внутри прямоугольника, который образуется двумя парами перпендикуляровъ, проведенныхъ къ осямъ OX и OY черезъ точки, соотвѣтствующія конечнымъ значеніямъ x и y.

Такимъ образомъ мы получили систему кривыхъ внутри прямоугольника (черт. 5), разбитаго рядами координатъ на клѣтки, въ видѣ сѣти. Эта система и представляетъ графически наши перемѣнныя въ назначенныхъ предѣлахъ. Діаграммамъ этого вида, а по аналогіи съ ними и другимъ діаграммамъ съ градуировкой и числовыми отмѣтками, Лаланномъ и его французскими учениками присвоено названіе *абакъ (les abaques des lignes isoplèthes)*. Мы будемъ называть ихъ просто діаграммами, въ данномъ случаѣ *діаграммами изоплетныхъ кривыхъ*.

Если мы условимся обозначать терминами *горизонталь* и *вертикаль* линіи, параллельныя соотвѣтственно OX и OY, то способъ пользованія такой діаграммой въ цѣляхъ опредѣленія значенія z по даннымъ x и y, можетъ быть формулированъ слѣдующимъ образомъ: прочитать отмѣтку кривой, проходящей черезъ точку встрѣчи вертикали съ отмѣткой x и горизонтали съ отмѣткой y.

Само собой разумѣется, что при чтеніи, въ случаѣ надобности, примѣняется интерполяція. Та же самая діаграмма даетъ возможность опредѣлить x или y, если даны одна изъ этихъ перемѣнныхъ, а также z. Напримѣръ, если даны y и z, то можно получить x, прочитавъ отмѣтку вертикали, проходящей черезъ точку встрѣчи горизонтали съ отмѣткой y и изоплетной кривой съ отмѣткой z.

Не трудно видѣть, что въ діаграммахъ изоплетныхъ кривыхъ графическое представленіе уравненія создается путемъ горизонтальныхъ сѣченій поверхности, опредѣляемой уравненіемъ (7), въ которомъ x, y и z приняты за Декартовы координаты пространства.

Методъ изоплетныхъ кривыхъ въ примѣненіи къ графическому расчету получилъ широкое распространеніе во всѣхъ областяхъ техники. Количество діаграммъ изоплетныхъ кривыхъ для разсчета трубопроводовъ также весьма значительно. Онѣ примѣняются къ формуламъ какъ нелогарифмическаго, такъ и логарифмическаго вида. Не имѣя въ виду представлять исчерпывающаго списка діаграммъ этого типа, что едва ли возможно, мы можемъ указать на діаграммы Гобрехта (примѣненныя для расчета Берлинской канализаціи—Hobrecht, Die Kanalisation von Berlin), Гергарда (Gerhard's Diagramm für Abzugskanäle, Gesundheits-Ingenieur, 1883), Баумейстера (Baumeister, Städtische Strassenwesen und Städtereinigung), Гюртена (Hürten, Kurventafeln zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit unter Druck liegender Bauwerke in Entwässerungs und Bewässerungsgräbens), Колиньона (Collignon, Cours de mécanique, II, Hydraulique), д'Обрива и Вильрю (d'Aubrive et Villerupt, L'album des abaques pour le calcul des conduites d'eau), Коффина (Coffin, The graphical solution of hydraulic problems), Э. и Г. Тэйлоръ (E. B. and G. M. Taylor's Diagrams of the discharge of pipes in accordance with Kutter's formula), П. Ф. Горбачева (П. Ф. Горбачевъ, О расчетѣ скоростей теченія и отводоспособности въ водопроводахъ и водостокахъ).

Примѣромъ діаграммъ изоплетныхъ кривыхъ могутъ служить діаграммы для расчета водопроводныхъ трубъ д'Обрива и Вильрю. Эти діаграммы, въ числѣ пяти, для расходовъ отъ 0 до 20000 литровъ въ секунду и для діаметровъ трубъ до 3,00 литра, построены на основаніи логарифмической формулы Леви-Валло [1])

$$D = 0{,}324 \left(\frac{Q}{\sqrt{i}}\right)^{3/8}, \tag{9}$$

гдѣ D — діаметръ трубы,

Q — расходъ,

i — гидравлическій уклонъ.

---

*) Подробности объ этой формулѣ въ моей работѣ „Формулы логарифмическаго вида для расчета водопроводовъ“ (Журналъ Общ. Сибирск. Инженеровъ, 1910).

Полагая

$$j = \sqrt{i}\,, \tag{10}$$

получаемъ

$$D = 0{,}324 \left(\frac{Q}{j}\right)^{3/8}, \tag{9'}$$

$$\frac{Q}{j} = \left(\frac{D}{0{,}324}\right)^{8/3}. \tag{9''}$$

Чтобы найти выраженіе скоростей v, замѣтимъ, что

$$v = \frac{4}{\pi}\frac{Q}{D^2}, \tag{11}$$

и, вводя вмѣсто D его выраженіе черезъ Q и j, получимъ

$$v = \frac{4\, Q^{1/4} j^{3/4}}{(0{,}324)^2\, \pi}, \tag{12}$$

откуда уравненіе

$$Q\, j^3 = \frac{(0{,}324)^8\, \pi^4}{256}\, v^4. \tag{13}$$

Возьмемъ оси прямоугольныхъ координатъ OQ и OJ (черт. 6) и будемъ откладывать расходы въ видѣ нормальнаго масштаба по оси OQ, а уклоны въ видѣ масштаба функціи

$$j = \sqrt{i}\,. \tag{10}$$

Тогда изоплеты расходовъ изобразятся прямыми, параллельными OJ, изоплеты уклоновъ—прямыми OQ. Изоплеты скоростей будутъ кривыя, которыя могутъ быть построены по точкамъ, на основаніи предшествующаго уравненія. Изоплеты діаметровъ изобразятся въ видѣ радіальныхъ прямыхъ, исходящихъ изъ начала координатъ.

Для полученія, по заданнымъ Q и i, напримѣръ, скорости, нужно найти пересѣченіе соотвѣтственныхъ изоплетъ расхода и уклона и взять скорость по изоплетѣ скоростей, проходящей черезъ найденную точку пересѣченія. При этомъ, конечно, въ случаѣ надобности, примѣняется интерполяція.

На черт. 7 изображена діаграмма изоплетныхъ кривыхъ изъ альбома д'Обрива и Вильрю, для расчета водопроводныхъ трубъ. Она включаетъ діаметры отъ 0,45 до 1,25 метра и расходы отъ 100 до 2000 литровъ въ секунду.

Другимъ примѣромъ діаграммъ изоплетныхъ кривыхъ для расчета трубопроводовъ являются извѣстныя діаграммы Баумейстера. Онѣ построены по одному и тому же принципу для круглыхъ и овоидальныхъ сѣченій, при различныхъ коэффиціентахъ шероховатости, при чемъ коэффиціентъ скорости взятъ на основаніи сокращенной формулы Гангилье-Куттера

$$k = \frac{100\sqrt{D}}{0,7 + \sqrt{D}}. \tag{14}$$

На черт. 8 представлена такая діаграмма для круговыхъ сѣченій при степеняхъ шероховатости, по Гангилье-Куттеру, IV (чугунныя трубы хорошія; хорошая кирпичная кладка) и VI (засоренныя чугунныя трубы; бутовая кладка).

Для построенія ея отложены скорости v какъ абсциссы, расходы Q какъ ординаты, діаметры D даны наклонными лучами, а паденія i — кривыми, которыхъ меньшая отмѣтка дѣйствительна для степени шероховатости IV, а большая—для степени шероховатости VI. Діаграмма содержитъ, слѣдовательно, четыре величины Q, v, i и D. Помощью ея двѣ изъ послѣднихъ могутъ быть опредѣлены, когда двѣ другія извѣстны.

Въ діаграммахъ для овоидальныхъ сѣченій діаметры D замѣнены высотами H профиля (черт. 9). Слѣдовательно, по этой діаграммѣ даны расходы Q — ординатами, скорости v — абсциссами, высоты H — лучами и паденія i — кривыми.

Для выраженія болѣе сложныхъ функцій, встрѣчающихся при гидравлическомъ расчетѣ, примѣняются иногда болѣе или менѣе сложныя комбинаціи діаграммъ изоплетныхъ кривыхъ. Такую комбинацію представляетъ, напримѣръ, діаграмма для графическаго опредѣленія коэффиціента скорости k по полной формулѣ Гангилье-Куттера, приводимая, между прочимъ, проф. М. М. Черепашинскимъ[1]).

При построеніи діаграммы изоплетныхъ кривыхъ могутъ быть частные случаи, когда кривыя z обращаются въ прямыя. Разсматривая уравненія (7), (7′) и (8), мы видимъ, что это бываетъ тогда, когда уравненіе (7) можетъ быть сведено къ виду

$$\frac{x'}{\lambda_1} f(z) + \frac{y'}{\lambda_2} \varphi(z) + \psi(z) = 0 \tag{15}$$

и, въ силу (8)

$$x f(z) + y \varphi(z) + \psi(z) = 0. \tag{15'}$$

Въ томъ болѣе общемъ случаѣ, когда для построенія уравненія (7) оказывается болѣе удобнымъ откладывать по осямъ координатъ не x и y, а $f_1(x)$ и $f_2(y)$, такимъ образомъ, что

$$\begin{aligned} x' &= \lambda_1 f_1(y), \\ x' &= \lambda_2 f_2(y), \end{aligned} \tag{8'}$$

для того, чтобы кривыя (z) діаграммы обратились въ прямыя, уравненіе (7) должно имѣть форму

$$\frac{x'}{\lambda_1} f(z) + \frac{y'}{\lambda_2} \varphi(z) + \psi(z) = 0 \tag{16}$$

[1]) М. М. Черепашинскій. Водоснабженіе, стр. 6—7.

или

$$f_1(x)\,f(z) + f_2(y)\,\varphi(z) + \psi(z) = 0. \tag{16'}$$

Номографическія діаграммы, отличающіяся этимъ свойствомъ, называются *діаграммами изоплетныхъ прямыхъ.*

Построеніе такихъ діаграммъ, конечно, значительно легче, нежели діаграммъ съ кривыми линіями.

Отсюда понятно, что на практикѣ болѣе охотно прибѣгаютъ къ употребленію діаграммъ этого типа, если только уравненіе, опредѣляющее соотношеніе между элементами задачи, можетъ быть сведено къ виду (15′) или (16′).

Примѣромъ діаграммы изоплетныхъ прямыхъ могла бы служить діаграмма д'Обрива и Вильрю, изображенная на черт. 7, еслибы ограничиться построеніемъ соотношенія между расходомъ Q, уклономъ i и діаметромъ D. Характеръ діаграммы въ этомъ случаѣ объясняется тѣмъ, что уравненіе, выражающее зависимость между Q, i и D (9) представляетъ частный случай уравненія (15′).

Нужно замѣтить, что всякая отдѣльная кривая, построенная въ координатной системѣ (прямоугольной или иной) можетъ быть обращена въ эквивалентную ей по значеніямъ прямую путемъ простого графическаго процесса. Пусть, напримѣръ, имѣемъ кривую OMP (черт. 10) полученную въ результатѣ построенія по методу Декартовыхъ координатъ, при нормальномъ масштабѣ отложенія перемѣнныхъ. Пусть точки съ отмѣтками x и y на осяхъ координатъ соотвѣтствуютъ точкѣ M на кривой OMP. Продолжимъ линію yM до пересѣченія съ прямою OP въ точкѣ M, и изъ этой точки опустимъ перпендикуляръ на ось OX до пересѣченія въ точкѣ A. Если мы теперь точкѣ A дадимъ отмѣтку x и продѣлаемъ такую же операцію съ другими точками кривой OMP, то ясно, что прямая OP совершенно замѣнитъ кривую OMP. При этомъ, очевидно, масштабъ отложенія по оси OУ остается нормальный, а масштабъ отложенія по оси OX измѣнитъ свой характеръ. Такая замѣна въ діаграммахъ кривыхъ линій прямыми въ Номографіиноситъ названіе *анаморфоза.* Этотъ наиболѣе примитивный способъ анаморфоза, въ отличіе отъ другихъ, можно назвать *графическимъ.*

Очевидно, однако, что такой анаморфозъ, примѣняемый къ отдѣльной кривой, не можетъ принести существеннаго облегченія въ пользованіи діаграммами. Несравненно важнѣе способы, дающіе возможность замѣнить всѣ кривыя линіи цѣлой діаграммы прямыми.

Лаланнъ, Лаллеманъ и позднѣйшіе изслѣдователи показали разными путями, что діаграммы, заключающія кривыя линіи (діаграммы изоплетныхъ кривыхъ) въ извѣстныхъ случаяхъ, благодаря нѣкоторымъ предварительнымъ операціямъ, могутъ быть искусственно замѣнены діаграммами, состоящими исключительно изъ прямыхъ линій, параллельныхъ или непараллельныхъ между собою, т. е. діаграммами изоплетныхъ прямыхъ.

Дѣло сводится при этомъ къ преобразованію уравненій, подлежащихъ графическому изображенію, тѣмъ или другимъ способомъ въ видъ (15′) или (16′), чему сопутствуетъ обыкновенно измѣненіе масштабовъ функцій по осямъ координатъ; иногда приходится прибѣгать къ введенію новой системы координатъ или спеціальнаго третьяго масштаба функцій (гексагональныя діаграммы Лаллемана). Такіе способы преобразованія Лаланнъ назвалъ *геометрическимъ анаморфозомъ*. Въ тѣхъ случаяхъ, когда при преобразованіи уравненій приходится прибѣгать къ логарифмированію (что опредѣленно отражается на характерѣ получаемыхъ діаграммъ изоплетныхъ прямыхъ, которыя тогда получаютъ названіе логарифмо-графическихъ таблицъ), анаморфозъ называется *логарифмическимъ*.

Къ числу уравненій, которыя представляютъ частные случаи типа (16′), относятся уравненія

$$f_1(x) + f_2(y) + f_3(z) = 0, \tag{17}$$

которыя весьма часто встрѣчаются въ практикѣ.

Въ этомъ случаѣ, примѣняя прежній способъ нанесенія на оси координатъ, имѣемъ

$$\begin{aligned} x' &= \lambda_1 f_2(x), \\ y' &= \lambda_1 f_2(y), \end{aligned} \tag{18}$$

откуда получается уравненіе кривыхъ (z)

$$\frac{x'}{\lambda_1} + \frac{y'}{\lambda_2} + f_3(z) = 0. \tag{19}$$

Уравненія такого вида даютъ діаграмму изоплетныхъ прямыхъ, параллельныхъ между собою.

Другая форма уравненій, очень употребительная въ практикѣ и представляющая частный случай типа (16′), слѣдующая:

$$f_1(x) \cdot f_2(y) = f_3(z). \tag{20}$$

Уравненія этого типа, будучи построены непосредственно, даютъ діаграммы изоплетныхъ прямыхъ въ видѣ ряда радіантъ, исходящихъ изъ начала координатъ, что мы и видѣли на частномъ примѣрѣ.

Но кромѣ того уравненія типа (20) могутъ быть приведены къ предшествующему виду путемъ логарифмированія обѣихъ частей:

$$\lg f_1(x) + \lg f_2(y) = \lg f_3(z). \tag{21}$$

Въ такомъ видѣ уравненіе можетъ быть представлено графически въ видѣ діаграммы параллельныхъ прямыхъ (на логарифмической сѣткѣ). Полученнымъ такимъ образомъ діаграммамъ изоплетныхъ прямыхъ, въ силу логарифмическаго характера преобразованія и нанесенія, присвоено въ практикѣ, какъ мы уже упоминали, названіе *логарифмо-графическихъ таблицъ*.

Этотъ простой и удобный способъ преобразованія имѣетъ очень важное значеніе. Онъ принадлежитъ извѣстному французскому инженеру Лаланну, который по праву считается основателемъ Номографіи, какъ науки.

Дѣло въ томъ, что долгое время принципъ изоплетныхъ линій и основанный на немъ графическій способъ расчета не находилъ широкаго примѣненія. Развитіе въ 40-хъ годахъ XIX столѣтія сѣти желѣзныхъ дорогъ во Франціи поставило на очередь задачу о быстромъ подсчетѣ большихъ количествъ земляныхъ работъ. Для рѣшенія этой задачи у инженеровъ Лаланна (Léon-Louis-Chrétien Lalanne, 1811—1892) и Девена (Devaine) явилась мысль примѣнить графическіе методы. Этому обстоятельству мы обязаны тѣмъ, что Лаланнъ систематизировалъ и развилъ способы графическаго расчета и между прочимъ открылъ (въ 1843 г.) замѣчательный принципъ логарифмическаго анаморфоза. Открытіе Лаланна было опубликовано въ видѣ мемуара въ Annales des Ponts et Chaussées за 1846 годъ подъ заглавіемъ Mémoire sur les tables graphiques et sur la géometrie anamorphose appliquée à diverses questions qui se rattachent à l'art de l'ingénieur. Этотъ принципъ легъ въ основаніе способа расчета при посредствѣ логарифмографическихъ таблицъ. Самый способъ нерѣдко называется также способомъ Лаланна, а логарифмо-графическія таблицы—діаграммами Лаланна.

Указанное произведеніе легло въ основу дальнѣйшаго развитія Номографіи и само по себѣ дало почву для цѣлаго ряда приложеній къ техническому расчету. Самъ Лаланнъ былъ крайне заинтересованъ практическимъ приложеніемъ своей теоріи и разработалъ нѣсколько руководствъ къ графическому расчету (Tables nouvelles pour abréger divers calculs, Tables graphiques à l'usage des chemins de fer, Description et usage de l'abaque ou compteur universel, Instruction sur les règles de calcul и др.; онъ же изобрѣлъ особое приспособленіе для механическаго производства вычисленій—balance à calcul, balance algébrique).

Графическому представленію въ формѣ логарифмографическихъ таблицъ подчиняются формулы гидравлическаго (какъ и всякаго другого) расчета, имѣющія логарифмическую форму, т. е. такія, въ которыхъ перемѣнныя или ихъ функціи входятъ исключительно въ формѣ произведеній или степеней. Другими словами, этимъ свойствомъ обладаютъ уравненія, которыя могутъ быть приведены къ виду

$$f_1(x) \cdot f_2(y) = f_3(z). \tag{20}$$

Не трудно видѣть, что это уравненіе является частной формой уравненія (16′)[1]) и потому, безъ всякаго дальнѣйшаго преобразованія, можетъ быть представлено въ видѣ діаграммы изоплетныхъ прямыхъ.

[1]) Въ самомъ дѣлѣ, уравненіе (20) можетъ быть переписано въ видѣ

$$f_1(x) \cdot f_2(y) - y^0 \cdot f_3(z) + 0 \cdot y = 0,$$

что вполнѣ соотвѣтствуетъ (16′).

Дѣйствительно, будемъ откладывать $f_1(x)$ и $f_3(z)$ въ видѣ масштабовъ функцій по осямъ прямоугольныхъ координатъ OX и OZ, при модуляхъ масштаба λ_1 и λ_3, на основаніи равенствъ

$$x' = \lambda_1 f_1(y), \quad z' = \lambda_3 f_3(z). \tag{22}$$

Внося значенія $f_1(x)$ и $f_3(z)$ въ уравненіе (20), получимъ уравненіе

$$z' = \frac{\lambda_3}{\lambda_1}' f x_2 (y). \tag{23}$$

Такое уравненіе опредѣляетъ рядъ прямыхъ, измѣняющихъ свое положеніе въ зависимости отъ измѣненія значенія y.

Легко видѣть, что всѣ эти прямыя исходятъ изъ начала координатъ. Такія прямыя, замѣтимъ, называются въ Номографіи радіантами.

Такимъ образомъ мы видимъ, что уравненія вида (20) могутъ быть представлены графически непосредственно въ видѣ діаграммъ изоплетныхъ прямыхъ. Въ этихъ діаграммахъ будетъ три системы прямыхъ, при чемъ прямыя одной системы будутъ параллельны оси абсциссъ, прямыя второй системы параллельны оси ординатъ, а прямыя третьей степени будутъ исходить изъ начала координатъ въ видѣ радіантъ.

Уравненія типа

$$f_1(x) \,.\, f_2(y) = f_3(z) \tag{20}$$

могутъ быть также представлены въ видѣ діаграммы изоплетныхъ прямыхъ, параллельныхъ между собою. Это достигается приведеніемъ уравненія (20) къ виду (17) путемъ логарифмированія обѣихъ частей его. Тогда получается

$$\lg f_1(x) + \lg f_2(y) = \lg f_3(z). \tag{21}$$

Такое уравненіе можетъ быть представлено графически въ видѣ діаграммы параллельныхъ прямыхъ, расположенныхъ на прямоугольной сѣти координатъ. Отличіе такой діаграммы отъ діаграммы изоплетныхъ прямыхъ уравненій вида

$$f_1(x) + f_2(y) + f_3(z) = 0 \tag{17}$$

будетъ состоять въ томъ, что точки градуаціи осей координатъ, имѣющія равномѣрно возрастающія отмѣтки, будутъ находиться на разстояніяхъ не равныхъ, а измѣняющихся по логарифмическому закону. Благодаря этому и координаты, проходящія черезъ точки градуаціи, будутъ представлять неправильную сѣть, вполнѣ характерную, которая и называется логарифмической сѣтью. [1]) Такая діаграмма и носитъ названіе логарифмографической таблицы.

[1]) Во Франціи находится въ продажѣ особая бумага съ нанесенной сѣтью логарифмическихъ дѣленій. При употребленіи такой бумаги построеніе діаграммъ логарифмическаго типа производится такъ же удобно, какъ нанесеніе обычныхъ прямолинейныхъ діаграммъ на обыкновенной клѣтчатой бумагѣ.

Чтобы представить уравненіе (21) графически въ видѣ такой таблицы, отложимъ по осямъ координатъ OX и OY (черт. 11) $\lg f_1(x)$ и $\lg f_2(y)$ въ видѣ масштабовъ функцій, при модуляхъ масштабовъ λ_1 и λ_2. Проводя черезъ точки градуаціи осей координатъ рядъ линій, перпендикулярныхъ этимъ осямъ, мы видимъ, что линіи $\perp$ OX будутъ представлять геометрическія мѣста точекъ, соотвѣтствующихъ различнымъ значеніямъ $\lg f_1(x)$, а линіи $\perp$ OY будутъ подобнымъ же образомъ изображать различныя значенія $\lg f_2(y)$. Эти линіи будутъ прямолинейными изоплетами x и y. При этомъ будутъ имѣть мѣсто равенства

$$\begin{aligned} x' &= \lambda_1 \lg f_1(x), \\ y'^1 &= \lambda_2 \lg f_2(y). \end{aligned} \tag{24}$$

Опредѣливъ изъ нихъ выраженія $\lg f_1(x)$ и $\lg f_2(y)$ и внося въ уравненіе (21), мы получаемъ новое уравненіе

$$\frac{x'}{\lambda_1} + \frac{y'}{\lambda_2} = \lg f_3(z). \tag{25}$$

Придавая z рядъ постоянныхъ значеній, мы можемъ, на основаніи этого уравненія, построить рядъ линій, которыя будутъ изоплетами величины z. Не трудно видѣть, что это будетъ рядъ прямыхъ, параллельныхъ между собою. Угловой коэффиціентъ этихъ прямыхъ постояненъ и равенъ $-\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$.

Для построенія изоплетъ величины z нужно опредѣлить прежде всего направленіе ихъ. Это направленіе получается, если соединить точку оси OX, означенную отмѣткой λ_1, съ точкой оси OY, имѣющей отмѣтку λ_2. Послѣ этого достаточно опредѣлить для каждой изоплеты одну точку. Можно взять для этой цѣли точки встрѣчи ихъ съ осью OX, опредѣляемыя равенствомъ

$$x' = -\lambda_1 \lg x_3(z). \tag{26}$$

Можно также находить, что еще удобнѣе, точки встрѣчи этихъ изоплетъ съ линіей, перпендикулярной ихъ направленію и проходящей черезъ начало координатъ. Уравненіе такой линіи

$$\lambda_1 x' = \lambda_2 y'. \tag{27}$$

Если мы обозначимъ черезъ z' отрѣзки, считаемые по этой прямой, начиная отъ начала координатъ O, не трудно видѣть, что такой отрѣзокъ для изоплеты z_0, представляющій не что иное, какъ разстояніе ея отъ начала координатъ, опредѣляется равенствомъ

$$z_0' = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lg {}_3 z(x_0)}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}}. \tag{28}$$

Это значитъ, что если мы по линіи OZ, опредѣленной, какъ показано выше, будемъ откладывать величины $\lg f_3(z)$ въ видѣ масштаба функціи, при модулѣ, получаемомъ изъ ранѣе взятыхъ нами λ_1 и λ_2 на основаніи равенства

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\sqrt{\lambda_1{}^2 + \lambda_2{}^2}}, \tag{29}$$

и черезъ получаемыя точки будемъ проводить прямыя $\perp$ OZ, то мы и получимъ соотвѣтственныя изоплеты величины z.

Такимъ образомъ въ концѣ концовъ построеніе логарифмо-графической таблицы для уравненія (20) сводится къ нанесенію $\lg f_1(x)$, $\lg f_2(y)$, $\lg f_3(z)$ въ видѣ масштабовъ функцій по осямъ OX, OY и OZ, при модуляхъ λ_1, λ_2 и λ_3, удовлетворяющихъ равенству (29), и къ проведенію черезъ точки градуаціи перпендикуляровъ, которые и будутъ прямолинейными изоплетами перемѣнныхъ x, y и z.

Какъ простѣйшій примѣръ логарифмографической таблицы, мы можемъ указать на приложеніе даннаго метода къ умноженію чиселъ, данное самимъ изобрѣтателемъ метода Лаланномъ.

Пусть мы желаемъ представить графически уравненіе

$$x\,y = z. \tag{30}$$

Логарифмируя обѣ части, получаемъ

$$\lg x + \lg y = \lg z. \tag{31}$$

Положимъ

$$\begin{aligned} x' &= \lambda \lg x, \\ y' &= \lambda \lg y. \end{aligned} \tag{32}$$

Тогда для изоплетъ z получается уравненіе

$$\begin{aligned} \frac{x'}{\lambda} + \frac{y'}{\lambda} &= \lg z, \\ x' + y' &= \lambda \lg z. \end{aligned} \tag{33}$$

Логарифмографическая таблица, представляющая это уравненіе, изображено на черт. 12.

Логарифмографическія таблицы (или діаграммы Лаланна) для расчета трубопроводовъ употребляются преимущественно и съ наибольшимъ удобствомъ для графическаго представленія формулъ гидравлическаго расчета, имѣющихъ логарифмическій видъ, но есть примѣры примѣненія ихъ и къ формуламъ не логарифмическаго вида. Къ данному типу графическихъ таблицъ относятся діаграммы Тима (Thiem, Ueber graphische Durchmesserbestimmung bei Wasserleitung, Journ. für Gasbeleucht. u. Wasserversorg., 1885), Франка (Frank, Die Formeln über die Bewegung des Wassers in Röhren, Civiling., 1881; Frank, Berechnung der Kanäle und Rohrleitungen), Фромма (Fromm, Diagramm für Träger, Schützen, städtische Entwässerungskanäle), Фанъ-Мейдена (van-Muyden, „Abaque logarithmique pour le calcul des conduites d'eau sous pression), В. А. Саткевича (Расчетъ водопроводной сѣти трубъ при помощи логарифмографической таблицы, Строитель 1898), М. С. Ясюковича (Расчетъ водостоковъ съ помощью логарифмографическихъ таблицъ).

Въ видѣ примѣра на черт. 13 воспроизведена логарифмографическая таблица фонъ-Мейдена для расчета водопроводныхъ трубъ, изданная въ Швейцаріи. Таблица эта, повидимому, пользуются нѣкоторымъ распространеніемъ, такъ какъ выдержала уже пять изданій. Въ первыхъ двухъ изданіяхъ авторъ клалъ въ основу разработки формулу Дарси. Но затѣмъ онъ отказался отъ этой формулы и построилъ новую таблицу на основаніи формулы М. Леви, которую онъ считаетъ болѣе подходящей, въ особенности для большихъ діаметровъ. Таблица составлена для трубъ, бывшихъ въ употребленіи и покрытыхъ внутри осадками.

Формула М. Леви въ основной формѣ имѣетъ видъ

$$\left(\frac{v}{n}\right)^2 = Ri\left(a + b\sqrt{R}\right), \tag{34}$$

гдѣ v — скорость движенія воды,

R — радіусъ трубы,

n, a, b — коэффиціенты.

Послѣдніе имѣютъ разное значеніе для новыхъ и старыхъ трубъ.

Для даннаго случая

$$n = 20{,}5,$$
$$a = 1,$$
$$b = 3.$$

Въ видахъ удобства построенія авторъ подвергнулъ формулу М. Леви искусственному преобразованію и привелъ ее къ логарифмическому виду

$$Q = k\sqrt{D^5 i}, \tag{35}$$

гдѣ Q — расходъ.

Взявъ ее въ послѣднемъ видѣ и логарифмируя, получаемъ

$$\lg Q = \lg k + 2{,}5 \lg D + 0{,}5 \lg i. \tag{36}$$

Полагая

$$x = \lg k + 2{,}5 \lg D,$$
$$y = 0{,}5 \lg i,$$
$$z = \lg Q,$$

получаемъ уравненіе

$$x + y = z, \tag{37}$$

которое легко строится въ видѣ логарифмической таблицы, какъ указано выше.

Эта таблица заключаетъ прямолинейныя изоплеты для діаметровъ, уклоновъ и расходовъ. Подобнымъ же образомъ получается уравненіе и изоплеты для скоростей.

На логарифмической таблицѣ фанъ-Мейдена (черт. 13) по оси абсциссъ нанесена градуація діаметровъ (отъ 0,05 до 3,00 метр.), по оси ординатъ градуація гидравлическихъ уклоновъ (отъ 1 до 1000 мм. на 1 пог. метръ). Линіи, проведенныя черезъ точки градуаціи перпендикулярно къ осямъ координатъ, представляютъ изоплетныя прямыя діаметровъ и уклоновъ. Изоплеты расходовъ (отъ 1 до 100 литр. въ сек.) и скоростей (отъ 0,25 до 5,00 метр.) представляются двумя системами прямыхъ, пересѣкающихъ оси координатъ и параллельныхъ между собою.

Такимъ образомъ таблица представляетъ изоплетныя прямыя четырехъ величинъ, связанныхъ между собою уравненіями движенія воды. Если извѣстны любыя двѣ изъ этихъ величинъ, то другія двѣ могутъ быть опредѣлены посредствомъ чтенія на таблицѣ. Для этого достаточно найти точку пересѣченія двухъ изоплетныхъ прямыхъ, соотвѣтствующихъ заданнымъ величинамъ. Тогда проходящія черезъ найденную точку изоплеты искомыхъ величинъ своими отмѣтками опредѣляютъ значенія послѣднихъ, соотвѣтствующія заданнымъ. Если изоплеты искомыхъ величинъ не проходятъ непосредственно черезъ найденную точку, то приходится произвести интерполяцію или принять значенія ближайшихъ изоплетъ, въ зависимости отъ характера задачи.

Среди другихъ логарифмографическихъ таблицъ для насъ заслуживаютъ особаго вниманія таблицы, составленныя русскими спеціалистами В. А. Саткевичемъ и М. С. Ясюковичемъ, обѣ на основаніи формулы Лампе.[1])

Съ переходомъ отъ изоплетныхъ кривыхъ къ изоплетнымъ прямымъ, способъ употребленія діаграммъ нисколько не мѣняется. Способъ этотъ, однако, не лишенъ нѣкоторыхъ неудобствъ, которыя сводятся, главнымъ образомъ къ тому, что для полученія отсчетовъ приходится слѣдить глазами по линіямъ и интерполировать между ними, что утомительно и недостаточно гарантируетъ отъ ошибокъ.

Номографія даетъ возможность графическаго представленія уравненій расчета при посредствѣ діаграммъ иного рода, гдѣ въ качествѣ элементовъ съ числовыми отмѣтками употребляются исключительно точки. Такими являются особыя діаграммы, которыя мы называемъ *діаграммами сопряженныхъ масштабовъ*.

Существуетъ два типа такихъ діаграммъ. Будучи до нѣкоторой степени сходны по своему внѣшнему виду, они замѣтно отличаются другъ

[1]) Таблица В. А. Саткевича, помимо первоисточника, воспроизведена въ моей работѣ „Къ вопросу о графическихъ методахъ расчета водоснабженія и канализаціи. Теорія и примѣненія способа сопряженныхъ масштабовъ“.

отъ друга и по принципамъ, положеннымъ въ ихъ основаніе, и по способу построенія и пользованія. Первый изъ этихъ типовъ, къ разъясненію котораго мы сейчасъ переходимъ, представляетъ только приложеніе номографическаго *принципа масштабовъ функцій*, второй, о которомъ будемъ говорить далѣе--имѣетъ въ основѣ, помимо упомянутаго, еще другой принципъ, именно *принципъ точекъ прямолинейнаго пересѣченія*.

Номографическій принципъ масштабовъ функцій, былъ разъясненъ нами выше. Изъ различныхъ масштабовъ, которые получаются въ результатѣ построенія функцій, наиболѣе важное значеніе имѣетъ логарифмическій масштабъ. Если въ равенствахъ (4) примемъ

$$f(x) = \lg x \tag{38}$$

и примѣнимъ къ этому случаю указанные выше методы построенія, тогда получается *логарифмическій масштабъ функціи*.

Образцомъ его могутъ служить дѣленія счетной логарифмической линейки. Такой масштабъ примѣняется для построенія всѣхъ логарифмическихъ діаграммъ, въ томъ числѣ и діаграммъ сопряженныхъ масштабовъ.

По поводу этого логарифмическаго масштаба нужно замѣтить, что, если продолжить его далѣе 10, то въ промежуткѣ отъ 10 до 100 онъ будетъ имѣть ту же длину и тѣ же дѣленія, какъ отъ 0 до 10, причемъ дѣленія будутъ соотвѣтствовать величинамъ въ 10 разъ большимъ. То же самое было бы отъ 100 до 1000, только съ отмѣтками еще въ 10 разъ большими и т. д. Изъ этого слѣдуетъ, во первыхъ, что на логарифмическомъ масштабѣ, построенномъ въ предѣлахъ отъ 0 до 10, единицы могутъ относиться къ какому угодно десятичному порядку; во вторыхъ, что степень относительной точности отсчета въ примѣненіи къ любому порядку остается постоянной.

Первое ясно само собою. А то, что относительная точность (или процентъ точности) расчета при употребленіи логарифмическаго масштаба вездѣ одинакова, видно изъ слѣдующаго разсужденія. Въ любомъ мѣстѣ масштаба наибольшая величина ошибки при отсчетѣ глазомъ, вообще говоря, по длинѣ одна и та же. Эта величина представляетъ разность двухъ логарифмовъ нѣкоторыхъ значеній, между которыми заключается истинное значеніе. Такимъ образомъ, называя крайнія значенія черезъ X_n и X_{n+1}, мы можемъ сказать, что

$$\lg x_{n+1} - \lg x_n = \text{const}. \tag{39}$$

Но

$$\lg x_{n+1} - \lg x_n = \lg \frac{x_{n+1}}{x_n},$$

откуда

$$\lg \frac{x_{n+1}}{x_n} = \text{const}.$$

$$\frac{x_{n+1}}{x_n} = \text{const}.$$

$$\frac{x_{n+1} - x_n}{x_n} = \text{const}. \tag{40}$$

Такимъ образомъ, если, читая по логарифмическому масштабу, мы придадимъ его числовымъ отмѣткамъ значенія въ 10 разъ большія, то увеличатся также въ 10 разъ числовыя значенія предѣловъ ошибки, а относительная величина ошибки и процентъ точности вычисленія остаются одни и тѣ же.

Теорія построенія діаграммъ сопряженныхъ масштабовъ по методу масштабовъ функцій очень проста. Пусть мы имѣемъ расчетную формулу въ формѣ уравненія логарифмическаго вида

$$f_1(x)\ f_2(y) = f_3(z). \tag{41}$$

Логарифмируя обѣ части этого уравненія, получаемъ

$$\lg f_1(x) + \lg f_2(y) = \lg f_3(z). \tag{41'}$$

Отложимъ функціи $\lg f_1(x)$ и $\lg f_2(y)$ въ видѣ двухъ отдѣльныхъ масштабовъ функцій (черт. 14) *при одномъ и томъ же модулѣ масштаба* λ, на основаніи равенствъ

$$x' = \lambda \lg f_1(x),$$
$$y' = \lambda \lg f_2(y).$$

Выражая функціи $\lg f_1(x)$ и $\lg f_2(y)$ на основаніи этихъ равенствъ и внося въ уравненіе (41'), получаемъ новое уравненіе

$$\frac{x'}{\lambda} - \frac{y'}{\lambda} = \lg f_3(z)$$

или (42)

$$x' + y' = \lambda \lg f_3(z).$$

Послѣднее уравненіе показываетъ, что, если мы функцію $\lg f_3(z)$ построимъ въ видѣ третьяго масштаба функцій *при томъ же модулѣ* λ, то опредѣленіе каждаго частнаго значенія величины z_0, по заданнымъ x_0 и y_0, можетъ быть сдѣлано такимъ образомъ. Нужно взять по масштабу функціи x отрѣзокъ отъ начала масштаба до отмѣтки x_0 и прибавить къ нему длину, соотвѣтствующую y_0 по масштабу y. Откладывая сумму этихъ длинъ по масштабу z отъ начала его, мы получимъ отмѣтку, опредѣляющую соотвѣтственное значеніе z_0.

Изъ предшествующаго ясно, что представленіе формулъ расчета при посредствѣ діаграммъ сопряженныхъ масштабовъ, которыя мы будемъ называть для краткости *діаграммами Венера*, примѣнимъ только къ такимъ формуламъ, которыя представляютъ уравненія логарифмическаго вида или въ отношеніи самихъ перемѣнныхъ, или, по крайней мѣрѣ, въ отношеніи нѣкоторыхъ функцій ихъ, отъ которыхъ возможенъ простой и удобный переходъ къ самимъ перемѣннымъ.

Излагаемый способъ графическаго изображенія формулъ гидравлическаго расчета былъ предложенъ Г. Венеромъ въ статьѣ Ein Betrag zur Berechnung des Rohrwiederstandes in der Praxis (Gesundheits-Ingenieur, 1897), причемъ діаграмма была составлена для формулы Лампе въ метрическихъ мѣрахъ. Въ томъ же 1897 году проф. Н. К. Чижовъ примѣнилъ этотъ способъ къ той же формулѣ Лампе, но въ зависимости отъ условій русской жизни, составилъ свою діаграмму для измѣреній въ футахъ. Послѣдняя діаграмма появилась въ статьѣ подъ заглавіемъ „Механическій способъ вычисленія потери напора". (Строитель, 1897).

Въ видѣ образца діаграммъ этого рода мы прилагаемъ (черт. 15) діаграмму Н. К. Чижова.

Способъ построенія діаграммы состоитъ въ слѣдующемъ. Формула Лампе [1]) примѣняется въ практикѣ въ видѣ

$$i = \frac{n^{1,8}}{\rho^{1,25}}, \tag{43}$$

гдѣ

i —гидравлическій уклонъ,

ρ —гидравлическій радіусъ сѣченія,

v —скорость,

n —коеффиціентъ шероховатости.

Для коеффиціента шероховатости n проф. Н. К. Чижовъ, принимаетъ слѣдующія значенія:

$n_1 = 0,0000675$ —для совершенно новыхъ асфальтированныхъ чугунныхъ трубъ, проводящихъ чистую воду;

$n_2 = 0,00009 - 0,00001$ —для чугунныхъ трубъ, покрытыхъ осадками, (это значеніе особенно подходитъ для расчета городскихъ водопроводовъ);

$n_3 = 0,000095$ —для водосточныхъ трубъ.

Логарифмируя эту формулу, получаемъ

$$\lg i - \lg n = 1,8 \lg v - 1,25 \lg \rho. \tag{44}$$

На произвольной прямой (см. нижній масштабъ діаграммы i—n, черт. 15) нанесемъ $\lg i$ и $\lg n$ въ видѣ масштабовъ функцій, т. е. отложимъ въ произвольномъ масштабѣ дѣленія, пропорціональныя $\lg i$ и $\lg n$, и надъ дѣленіями надпишемъ соотвѣтственныя величины i и n. На другой произвольной прямой нанесемъ подобнымъ же образомъ (см. верхній масштабъ діаграммы, ρ и v) съ одной стороны 1,8 $\lg v$, съ другой стороны 1,25 $\lg \rho$. При этомъ модуль масштаба для данныхъ функцій долженъ быть тотъ же, что и для масштаба $\lg i$ и $\lg n$. Абсолютныя же длины новыхъ двухъ масштабовъ между одинаковыми дѣленіями будутъ разныя, именно въ 1,8 и 1,25 раза больше соотвѣтственныхъ длинъ на масштабѣ $\lg i$ и $\lg n$.

[1]) Подробности объ этой формулѣ въ моей работѣ, цитированной выше.

Отложеніе нужно начинать отъ общей точки, обозначенной числовой отмѣткой 1,0 какъ для v, такъ и для ρ. Это явствуетъ изъ слѣдующаго соображенія. Для случая, когда

$$\lg i_0 - \lg n_0 = 0, \tag{45}$$

уравненіе (44) обращается въ

$$1{,}8 \lg v_0 - 1{,}25 \lg \rho_0 = 0. \tag{46}$$

Если въ то же время

$$\rho = 1{,}0,$$

то

$$1{,}8 \lg v_0 = 0,$$

$$v_0 = 1{,}0.$$

Надписавъ у дѣленій соотвѣтственныя величины ρ и v, мы получимъ двойной логарифмическій масштабъ гидравлическихъ радіусовъ и скоростей.

Двухъ построенныхъ масштабовъ достаточно для опредѣленія любой изъ величинъ i, v и ρ, входящихъ въ формулу Лампе (43), если двѣ изъ нихъ заданы. Но, чтобы ввести въ расчетъ также величину расхода Q, на діаграммѣ построены еще логарифмическіе масштабы расходовъ (въ куб. футахъ) для 20 различныхъ діаметровъ, начиная съ 2″ до 30″. Масштабы эти строятся на линіяхъ, параллельныхъ масштабу скоростей и притомъ такимъ образомъ, чтобы дѣленія масштабовъ расхода, соотвѣтствующія одной и той же скорости при разныхъ діаметрахъ, находились на одной вертикальной линіи съ дѣленіемъ, обозначающимъ эту скорость. Модуль масштаба, удовлетворяющаго такому условію, опредѣляется на основаніи соотношенія

$$\lambda_0 \left(\lg \frac{\pi D_0^2 v_0}{4} - \lg \frac{\pi D_0^2}{4} . 1\right) = 1{,}8 \lambda \lg v_0, \tag{47}$$

гдѣ λ—модуль масштаба $\lg i$ и n,

λ_0—модуль масштаба соотвѣтственнаго расхода Q.

Отсюда

$$\lambda_0 = 1{,}8 \lambda. \tag{47'}$$

Это значитъ, что промежутки между однозначными дѣленіями на масштабѣ расходовъ будутъ такіе же, что и на масштабѣ скоростей.

Нужно замѣтить, что масштабы расходовъ для разныхъ діаметровъ заканчиваются слѣва въ точкахъ (обозначенныхъ на діаграммѣ кружками), которыя находятся на одной вертикали съ дѣленіями, отмѣчающими на масштабѣ ρ величину гидравлическихъ радіусовъ при данныхъ діаметрахъ. Значеніе этого обстоятельства будетъ ясно при описаніи употребленія діаграммы.

Для того, чтобы опредѣлить при данномъ коеффиціентѣ шероховатости n по заданнымъ, напримѣръ, величинамъ гидравлическаго уклона и гидравлическаго радіуса (или діаметра) скорость, нужно взять циркулемъ на масштабѣ i—n разстояніе между дѣленіями, соотвѣтствующими заданнымъ i и n. Такимъ образомъ мы получаемъ длину, отвѣчающую $\lg i - \lg n$. Отложимъ затѣмъ полученную длину по верхнему соединенному масштабу отъ дѣленія, обозначающаго заданное ρ. Тогда другой конецъ циркуля укажетъ намъ дѣленіе, отвѣчающее искомой скорости v.

Совершенно такимъ же образомъ по даннымъ уклону и скорости можетъ быть опредѣленъ гидравлическій радіусъ сѣченія. Опредѣленіе необходимаго уклона по заданнымъ гидравлическому радіусу (или діаметру) и скорости производится аналогичнымъ образомъ, только въ обратномъ порядкѣ.

Когда по извѣстнымъ діаметру и гидравлическому уклону (при опредѣленномъ коэффиціентѣ шероховатости) требуется найти расходъ, то можно было бы сперва опредѣлить скорость и затѣмъ перейти къ расходу. Но операція упрощается тѣмъ, что начала масштаба расходовъ для разныхъ діаметровъ находятся на одной вертикали съ отмѣтками соотвѣтственныхъ гидравлическихъ радіусовъ. Поэтому удобнѣе, взявъ циркулемъ на масштабѣ $i - n$ разстояніе между соотвѣтственными дѣленіями, отложить его отъ начала масштаба расходовъ даннаго діаметра. Тогда другой конецъ циркуля укажетъ намъ прямо искомый расходъ.

Опредѣленіе уклона по извѣстнымъ діаметру и расходу дѣлается такъ же просто въ обратномъ порядкѣ. Опредѣленіе діаметра по заданнымъ расходу и гидравлическому уклону производится посредствомъ послѣдовательныхъ пробъ.

Большое удобство діаграммы Н. К. Чижова состоитъ въ томъ, что она допускаетъ пользоваться любымъ коеффиціентомъ шероховатости.

Всматриваясь въ способъ пользованія діаграммой типа Венера или Н. К. Чижова, не трудно видѣть, что дѣло сводится къ операціямъ въ отношеніи логарифмическихъ масштабовъ, вычерченныхъ на бумагѣ, подобнымъ тѣмъ, которыя примѣняются при пользованіи общеизвѣстными счетными логарифмическими линейками. Нужно сказать, что примѣненіе принципа логарифмической линейки къ гидравлическому расчету въ самой конкретной формѣ явилось значительно ранѣе. Подобныя логарифмическія линейки съ дѣленіями, нанесенными на двухъ неподвижныхъ масштабахъ и на подвижной средней части, изготовляются въ Англіи.

Другой типъ діаграммъ сопряженныхъ масштабовъ, типъ, основанный на принципѣ точекъ прямолинейнаго пересѣченія, принадлежитъ д'Оканю, (именемъ котораго мы и будемъ для краткости называть такія діаграммы). Онъ именно обратилъ вниманіе на нѣкоторыя неудобства діаграммъ изоплетныхъ кривыхъ и прямыхъ и нашелъ, что является болѣе желательнымъ употреблять въ качествѣ элементовъ съ числовыми отмѣтками, для графическаго представленія уравненiй, по возможности, только точки. Онъ предложилъ и методъ, который даетъ возможность достигнуть этой цѣли въ отношеніи нѣкоторыхъ уравненій, именно методъ точекъ прямолинейнаго пересѣченія.

Нужно сказать попутно, что д'Оканю (Maurice d'Ocagne, профессоръ Парижской Ecole des Ponts et Chaussées) принадлежитъ особая заслуга въ дѣлѣ продолженія идейной работы Лаланна и развитія Номографіи. Онъ посвятилъ цѣлый рядъ работъ вопросу о графическомъ представленіи уравненій и въ 1884 году опубликовалъ найденный имъ въ этой области новый общій принципъ, къ которому онъ пришелъ путемъ преобразованія діаграммъ Лаланна и который положенъ въ основу *метода точекъ прямолинейнаго пересѣченія* (méthode des points alignés).

Основы этого метода были изложены впервые въ мемуарѣ д'Оканя Procédé nouveau de calcul graphique (Annales des Ponts et Chaussées 1884). Затѣмъ тотъ же вопросъ былъ подвергнутъ болѣе широкой разработкѣ въ послѣдующей статьѣ д'Оканя, появившейся въ 1890 г., Méthode de calcul graphique fondée sur l'emploi des coordonnées parallèles (Génie civil, 1890) и наконецъ получилъ полное развитіе въ его обширныхъ монографіяхъ Nomographie (1891) и Traité de Nomographie (1899).

Предложенный д'Оканемъ методъ точекъ прямолинейнаго пересѣченія имѣетъ въ основѣ принципъ геометрическаго дуализма. Принципъ этотъ состоитъ въ томъ, что для каждой системы прямыхъ линій существуетъ такая система точекъ, что *тремъ взаимно встрѣчающимся прямымъ* первой системы соотвѣтствуетъ во второй *три точки, лежащія на одной прямой*. Всякое преобразованіе, основанное на этомъ свойствѣ, называется дуалистическимъ.

Предположимъ, что мы примѣнили такое преобразованіе къ діаграммѣ, состоящей изъ трехъ системъ какихъ либо прямыхъ, сохраняя, конечно, при переходѣ отъ одной фигуры къ другой, числовую отмѣтку каждаго элемента. Тогда мы получимъ новую діаграмму (черт. 16), на которой каждой изъ перемѣнныхъ x, y и z будетъ соотвѣтствовать система точекъ съ числовыми отмѣтками, расположенныхъ по линіи, въ общемъ случаѣ, кривой. Эти три системы точекъ съ числовыми отмѣтками будутъ представлять *криволинейныя масштабы*.

Такъ же, какъ на первой діаграммѣ, три прямыя съ числовыми отмѣтками значеній x, y и z, удовлетворяющихъ уравненію, сходились между собою, такъ здѣсь *три* соотвѣтствующія *точки* будутъ лежать на одной *прямой*, *пересѣкающей* всѣ три масштаба. Эта новая діаграмма представляетъ самый общій видъ діаграммы *точекъ прямолинейнаго пересѣченія*. Отсюда способъ употребленія діаграммы такого рода: *прямая, соединяющая точки съ отмѣтками x и y на двухъ криволинейныхъ масштабахъ, встрѣчаетъ третій масштабъ въ точкѣ съ отмѣткой z.*

Въ практикѣ примѣняется, подъ именемъ метода точекъ прямолинейнаго пересѣченія д'Оканя, частный случай выше указанныхъ діаграммъ, когда криволинейные масштабы функцій, благодаря особенностямъ уравненій, подлежащихъ графическому изображенію, обращаются въ прямыя, параллельныя другъ другу.

Такой случай получается тогда, когда уравненія имѣютъ видъ (17) или (20—21). Въ этомъ случаѣ діаграмма имѣетъ видъ *трехъ* (или нѣсколькихъ) *масштабовъ функцій*, расположенныхъ параллельно другъ другу и находящихся въ такой *взаимной связи*, что всякая прямая, пересѣкающая эти масштабы, встрѣчаетъ ихъ въ точкахъ съ такими числовыми значеніями перемѣнныхъ, которыя при одновременной подстановкѣ удовлетворяетъ уравненіе, представляемое діаграммой.

Методу, о которомъ идетъ рѣчь, изобрѣтатель его д'Оканъ, первоначально далъ названіе *метода изоплетныхъ точекъ* (méthode des points isoplèthes) по аналогіи съ методомъ изоплетныхъ прямыхъ Лаланна. Но это названіе было затѣмъ признано авторомъ неудачнымъ (въ самомъ дѣлѣ, точка не можетъ быть изоплетной, такъ какъ по существу представляетъ одно значеніе), и онъ употреблялъ нѣкоторое время новый терминъ—méthode des points cotés (методъ *точекъ* съ числовыми отмѣтками), желая подчеркнуть, что въ его діаграммахъ для отсчета служатъ именно *точки*, снабженныя числовыми отмѣтками, *а не линіи*. Однако тутъ является соображеніе, что можно строить діаграммы, гдѣ также входятъ только точки съ числовыми отмѣтками, но вовсе не обладающія указаннымъ свойствомъ въ отношеніи сѣкущей прямой. Поэтому въ концѣ концовъ д'Оканъ остановился на терминѣ—méthode des points alignés, характеризующемъ относительное положеніе точекъ, читаемыхъ одновременно. Этотъ терминъ мы будемъ переводить выраженіемъ—*методъ точекъ прямолинейнаго пересѣченія*.

Способъ примѣненія даннаго метода къ рѣшенію гидравлическихъ задачъ мы называемъ *способомъ сопряженныхъ масштабовъ*, а служащія для этой цѣли діаграммы—*діаграммами сопряженныхъ масштабовъ* по типу д'Оканя или просто діаграммами д'Оканя.

Методъ точекъ прямолинейнаго пересѣченія примѣнимъ, какъ было указано, для графическаго изображенія уравненій, имѣющихъ форму

$$f_1(x) + f_2(y) = f_3(z). \tag{17}$$

Напомнимъ, что къ нимъ же сводятся уравненія вида

$$f_1(x) \cdot f_2(y) = f_3(z), \tag{20}$$

путемъ преобразованія въ

$$\lg f_1(x) + \lg f_2(y) = \lg f_3(z) \tag{21}$$

Процессъ обращенія уравненія (17) въ форму діаграммы сопряженныхъ масштабовъ можетъ быть доказанъ различными способами. Доказательство, данное д'Оканемъ, ведется при помощи такъ называемыхъ параллельныхъ координатъ. Ввиду необычности примѣненія этой своебразной координатной системы,[1]) мы не будемъ касаться здѣсь этого доказательства, а дадимъ свой болѣе простой выводъ.

Возьмемъ на произвольной прямой (черт. 17) точки A и B и проведемъ черезъ нихъ двѣ параллельныхъ линіи AX и BY. Отложимъ на послѣднихъ $f_1(x)$ и $f_2(y)$ въ видѣ масштабовъ функцій, при модуляхъ λ_1 и λ_2, на основаніи равенствъ

$$\begin{aligned}\lambda_1 f_1(x) &= x', \\ \lambda_2 f_2(x) &= y',\end{aligned} \tag{48}$$

гдѣ x' и y' — длины соотвѣтственныхъ отрѣзковъ на линіяхъ AX и BY. Замѣняя въ уравненіи (17) $f_1(x)$ и $f_2(y)$ согласно (48), получаемъ уравненіе

$$\frac{x'}{\lambda_1} + \frac{y'}{\lambda_2} = f_3(z). \tag{49}$$

Дадимъ $f_3(z)$ постоянное значеніе $f_3(z_0)$.

Тогда уравненіе (49) обратится въ

$$\frac{x'}{\lambda_1} + \frac{y'}{\lambda_2} = f_3(z_0) \tag{49'}$$

Пусть это послѣднее удовлетворяется нѣкоторыми величинами x_0' и y_0', т. е.

$$\frac{x_0'}{\lambda_1} + \frac{y_0'}{\lambda_2} = f_3(z_0). \tag{49''}$$

Величины x_0 и y_0 на чертежѣ 17 опредѣляютъ нѣкоторую прямую $X_0 Y_0$. Эта прямая, въ зависимости отъ измѣненія значеній x и y, мѣняетъ свое положеніе, вращаясь около постоянной точки, положеніе которой легко опредѣляется.

Въ самомъ дѣлѣ, допустимъ, что уравненіе (49') удовлетворяется другой парой величинъ x_1' и y_1', т. е.

$$\frac{x_1'}{\lambda_1} + \frac{y_1'}{\lambda_2} = f_3(z_0), \tag{49'''}$$

причемъ опредѣляется другая прямая $X_1 Y_1$. Назовемъ точку пересѣченія прямыхъ $X_0 Y_0$ и $X_1 Y_1$ черезъ P и опредѣлимъ ея положеніе.

Изъ уравненія (49'') и (49''') слѣдуетъ, что

$$\frac{x_0'}{\lambda_1} + \frac{y_0'}{\lambda_2} = \frac{x_1'}{\lambda_1} + \frac{y_1'}{\lambda_2}, \tag{50}$$

$$\frac{1}{\lambda_1}(x_0' - x_1') = \frac{1}{\lambda_2}(y_1' - y_0'),$$

$$\frac{x_0' - x_1'}{y_1' - y_0'} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \tag{51}$$

[1]) Желающіе познакомиться съ доказательствомъ, даннымъ д'Оканемъ, могутъ найти его въ моей, цитированной выше, работѣ; общія же основанія системы параллельныхъ координатъ изложены въ книгѣ d'Ocagne, Coordonnées parallèles et axiales.

или по чертежу

$$\frac{X_0\,X_1}{Y_0\,Y_1}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \tag{51'}$$

Проведемъ черезъ точку P прямую CZ, параллельную AX и BУ, до пересѣченія съ AB въ точкѣ C, и прямую QR, параллельную AB. Треугольники X_0PX_1 и $У_0PУ_1$ подобны между собою. Поэтому

$$\frac{PQ}{PR}=\frac{X_0X_1}{У_0\,У_1}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \tag{52}$$

или, что то же,

$$\frac{AC}{CB}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \tag{52'}$$

Съ другой стороны подобіе $\triangle$-ковъ X_0PQ и $У_0PR$ даютъ

$$\frac{QX_0}{RУ_0}=\frac{PQ}{PR}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \tag{53}$$

Принимая во вниманіе, что

$$\begin{aligned} QX_0 &= x_0' - CP,\\ RУ_0 &= CP - y_0', \end{aligned} \tag{54}$$

имѣемъ

$$\frac{x_0' - CP}{CP - y_0'}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \tag{53'}$$

откуда

$$CP=\frac{\lambda_2\,x_0'+\lambda_1\,y_0'}{\lambda_1+\lambda_2}. \tag{55}$$

Но уравненіе (49′) можетъ быть представлено въ видѣ

$$\lambda_2\,x_0'+\lambda_1\,y_0'=\lambda_1\,\lambda_2\,f_3\,(z_0). \tag{49^{IV}}$$

Отсюда окончательное значеніе для CP получается въ видѣ

$$CP=\frac{\lambda_1\,\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2}\,f_3\,(z_0). \tag{56}$$

Соотношенія (52′) и (56), при извѣстной длинѣ линіи AB, вполнѣ опредѣляютъ точку P. Соотношеніе (52′) показываетъ, что точка пересѣченія прямыхъ $X_0\,У_0$ и $X_1\,У_1$ находится на неподвижной оси CZ. Соотношеніе (56) доказываетъ съ другой стороны, что разстояніе CP точки P отъ AB, при постоянномъ значеніи $f_3\,(z_0)$, постоянно, и слѣдовательно точка P остается также постоянной, что и требовалось доказать.

Положеніе точки P опредѣляется, если мы проведемъ прямую CZ || AX и BУ на такомъ разстояніи между ними, чтобы было удовлетворено отношеніе

$$\frac{AC}{CB}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \tag{52'}$$

и на этой прямой отъ AB отложимъ длину

$$CP=\frac{\lambda_1\,\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2}f_3\,(z). \tag{56}$$

На основаніи этого, если нанести соотвѣтственно на AX, BУ, CZ $f_1(x)$, $f_2(y)$, $f_3(z)$, входящія въ уравненіе (17), въ видѣ масштабовъ функцій, при модуляхъ λ_1, λ_2 и $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$, то полученныя точки будутъ находиться на одной прямой, пересѣкающей всѣ три масштаба. Изъ этого слѣдуетъ, очевидно, что если даны значенія двухъ изъ упомянутыхъ функцій, то будетъ достаточно провести прямую, соединяющую соотвѣтственныя точки двухъ масштабовъ, для того чтобы прочесть въ пересѣченіи съ третьимъ масштабомъ значеніе третьей функціи.

Теперь скажемъ нѣсколько словъ о практическихъ пріемахъ построенія діаграммы сопряженныхъ масштабовъ. Благодаря свободѣ выбора модулей λ_1 и λ_2 всегда можно взять оба основные масштаба одинаковой длины. Въ случаѣ построенія трехъ сопряженныхъ масштабовъ для уравненія

$$f_1(x) + f_2(y) = f_3(z) \tag{17}$$

прежде всего нужно задаться произвольно длиною масштабовъ. Модули λ_1 и λ_2 получаются по обычнымъ правиламъ построенія масштабовъ [1]) на основаніи формулы

$$\lambda\,[f(x_n) - f(x_1)] = L, \tag{57}$$

гдѣ λ — искомая величина модуля, $f(x_1)$ и $f(x_n)$ — крайнія значенія функціи, L — принятая длина масштаба. Модуль λ_3, на основаніи (56). опредѣляется по формулѣ

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}. \tag{58}$$

Послѣ этого наносимъ на двухъ параллельныхъ осяхъ масштабъ $f_1(x)$, начиная отъ точки A къ x (черт. 18), и масштабъ $f_2(y)$, отъ B къ y. Такъ какъ наклоненіе линій AX и BY къ AB можетъ быть какое угодно, то выбираемъ точки A и B на линіи, перпендикулярной къ направленію AX и BУ. Разстояніе масштабовъ AX и BУ произвольно. Поэтому мы можемъ выбрать его такимъ образомъ, чтобы наименьшій уголъ, составляемый при чтеніи линейкой или указательной чертой транспаранта[2]) съ направленіемъ масштабовъ не былъ слишкомъ малъ и имѣлъ желательную намъ величину (напримѣръ $\frac{\pi}{4}$).

Теперь проведемъ линію CZ, параллельную двумъ другимъ масштабамъ, такимъ образомъ, чтобы

$$\frac{AC}{BC} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

---

[1]) D'Ocagne. Traité de Nomographie, p. 3—6.

[2]) О способахъ чтенія будетъ сказано въ концѣ.

и выбираемъ пару значеній перемѣнныхъ x и y, для которыхъ значенія перемѣнной z получались бы изъ основного уравненія наиболѣе удобнымъ образомъ. Проведя на діаграммѣ соотвѣтственныя линіи и найдя эти послѣднія значенія z, не трудно построить масштабъ функціи $f_3(z)$, въ предѣлахъ прямыхъ AB и XY.

Таковъ теоретическій типъ діаграммы сопряженныхъ масштабовъ. Въ практикѣ можно болѣе или менѣе отступать отъ него. Ясно, напримѣръ, что если вычисленныя значенія модулей λ_1 и λ_2 не выражаются простыми числами, ихъ приходится округлять, что вводитъ неравенство длины масштабовъ. Съ другой стороны форматъ діаграммы можетъ заставить уменьшить расчитанный предѣльный уголъ наклоненія индекса транспаранта къ линіямъ масштабовъ. Случается, что на практикѣ предѣльныя значенія той или другой перемѣнной относятся только къ части масштаба другой перемѣнной. Тогда масштабъ (z) можетъ быть соотвѣтственно уменьшенъ.

Діаграммы сопряженныхъ масштабовъ, построенныя по методу точекъ прямолинейнаго пересѣченія (діаграммы д'Оканя), примѣняются только къ формуламъ логарифмическаго вида. Графическому представленію по этому способу до настоящаго времени подвергались формулы Фламана и Леви-Валло. Для формулы Фламана французскій инженеръ Бертранъ построилъ діаграмму сопряженныхъ масштабовъ въ видѣ системы девяти масштабовъ (Bechmann. Salubrité urbaine, II, Assainissement). Даріэсъ (Dariès. Calcul des conduites d'eau) упростилъ эту діаграмму, сведя ее къ обычному типу съ четырьмя масштабами (расходовъ, уклоновъ, діаметровъ и скоростей). Обѣ упомянутыя діаграммы построены для метрическихъ мѣръ. Проф. М. М. Черепашинскій въ своемъ курсѣ водопроводовъ приводитъ еще діаграмму типа д'Оканя для формулы Фламана, заимствованную изъ американскихъ источниковъ, которая построена для англійскихъ (и русскихъ) мѣръ. Наконецъ Даріэсомъ (Dariès. Application de la Nomographie au calcul des conduites d'eau d'après la formule de M. Lévy. Nouv. Ann. de la Constr., 1897), построена діаграмма того же типа для формулы Леви-Валло.

Въ видѣ примѣра мы остановимся на діаграммѣ для формулы Фламана, построенной Даріэсомъ.

Формула проф. Фламана[1]) обыкновенно примѣняется въ видѣ

$$D^{5/4}\, i = a v^{7/4}, \tag{58}$$

или

$$D^5 i^4 = a^4 v^7. \tag{58'}$$

Для коэффиціента a въ примѣненіи къ трубамъ, слегка покрытымъ осадками, каковы обыкновенно послѣ нѣсколькихъ лѣтъ службы трубы водопроводовъ, Фламанъ даетъ значеніе

$$a = 0{,}00092.$$

[1]) Подробности въ моей работѣ „Формулы логарифмическаго вида для расчета водопроводовъ“.

Формула Фламана, въ какомъ бы видѣ она ни была взята, представляетъ частный случай уравненія вида

$$f_1(x) \cdot f_2(y) = f_3(z) \qquad (20)$$

и потому можетъ быть представлена въ видѣ діаграммы сопряженныхъ масштабовъ, по методу точекъ прямолинейнаго пересѣченія.

Для представленія этой формулы въ видѣ діаграммы съ масштабами діаметровъ, гидравлическихъ уклоновъ и расходовъ, нужно преобразовать формулу

$$D^5 i^4 = a^4 v^7, \qquad (58')$$

на основаніи соотношенія

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}. \qquad (59)$$

Тогда получается

$$D^{19} i^4 = \left(\frac{4}{\pi}\right)^7 a^4 Q^7,$$

или, рѣшая относительно D,

$$D = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{\frac{7}{19}} \cdot a^{\frac{4}{19}} \frac{Q^{\frac{7}{19}}}{i^{\frac{4}{19}}}, \qquad (60)$$

что, при коеффиціентѣ a для трубъ, бывшихъ въ службѣ, обращается въ

$$D = 0{,}251 \frac{Q^{\frac{7}{19}}}{i^{\frac{4}{19}}}. \qquad (60')$$

Примѣняя логарифмированіе къ формулѣ (60′), получаемъ:

$$\lg D = \lg 0{,}251 + \frac{7}{19} \lg Q - \frac{4}{19} \lg i. \qquad (61)$$

Для представленія этого уравненія въ видѣ діаграммы, возьмемъ двѣ параллельныя оси Q и J (черт. 19), находящіяся на произвольно выбранномъ разстояніи s другъ отъ друга и примемъ первую изъ нихъ за масштабъ расходовъ, а вторую за масштабъ уклоновъ. Затѣмъ наносимъ соотвѣтственно на каждой изъ нихъ, при помощи логарифмической линейки, масштабы функцій Q и i.

Для выбора модуля отложенія примемъ въ соображеніе слѣдующее. Если бы мы приняли для обоихъ масштабовъ безъ измѣненія модуль λ логарифмической линейки, то намъ пришлось бы, для отложенія функцій $\frac{7}{19} \lg Q$ и $\frac{4}{19} \lg i$ или множить всѣ $\lg$ на $\frac{7}{19}$ и $\frac{4}{19}$, или измѣнять масштабъ логарифмической линейки въ отношеніи $\frac{7}{19}$ и $\frac{4}{13}$. Чтобы не дѣлать этого, удобнѣе принять модули

$$\text{для масштаба } Q - \lambda_1 = \frac{19}{7} \lambda$$

$$\text{и для масштаба } i - \lambda_2 = \frac{19}{4} \lambda$$

(или кратные ихъ, въ зависимости отъ размѣровъ діаграммы и взаимнаго расположенія масштабовъ). Тогда намъ придется откладывать по масштабамъ Q и i, для выраженія функцій $\frac{3}{8} \lg Q$ и $\frac{3}{16} \lg i$, величины $\lg Q$ и $\lg i$ въ масштабѣ логарифмической линейки.

Такъ какъ функція $\frac{4}{19} \lg i$ имѣетъ отрицательный знакъ, а $\frac{7}{19} \lg Q$ положительный, то увеличеніе числовыхъ значеній дѣленій на масштабахъ Q и J должно итти въ разныя стороны. Это нужно имѣть въ виду при выборѣ начальныхъ точекъ, отъ которыхъ откладывать дѣленія. Въ данномъ случаѣ удобнѣе помѣстить примѣрно по срединѣ діаграммы дѣленія 0 и 0′, соотвѣтствующія нѣкоторымъ среднимъ значеніямъ Q и i и затѣмъ отъ нихъ вести дѣленія въ обѣ стороны.

Построивъ такимъ образомъ масштабы расходовъ и уклоновъ, нужно, на основаніи соотношеній (52) и (58), опредѣлить положеніе, модуль и дѣленія масштаба діаметровъ D.

Такъ какъ, по предыдущему, модули масштабовъ Q и i

$$\lambda_1 = \frac{19}{7} \lambda,$$

$$\lambda_2 = \frac{19}{4} \lambda,$$

то, обозначая разстояніе отъ оси Q до оси D черезъ x, мы должны имѣть, по (52)

$$\frac{x}{s - x} = \frac{19}{7} : \frac{19}{4} = 4 : 7, \tag{62}$$

откуда

$$x = \frac{4}{11} s. \tag{62′}$$

Модуль масштаба функціи ($\lg D - \lg 0{,}251$) опредѣлится, на основаніи (58)

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{19}{11} \lambda, \tag{63}$$

гдѣ λ, по прежнему, модуль логарифмической линейки.

Для нанесенія дѣленій на масштабѣ діаметровъ, соединяемъ выбранныя ранѣе точки 0 и 0′ (или какія нибудь другія) масштабовъ Q и i. Пересѣченіе 00′ съ масштабомъ D дастъ точку 0″, отмѣтка которой, соотвѣтствующая значеніямъ Q и i въ точкахъ 0 и 0′, опредѣляется расчетомъ. Построивъ затѣмъ логарифмическій масштабъ при модулѣ λ_3 и приложивъ его соотвѣтственнымъ дѣленіемъ къ точкѣ 0″, размѣчаемъ другія дѣленія масштаба діаметровъ, продолжая его въ обѣ стороны, насколько нужно.

Если въ видахъ удобства, выбраны другіе модули (кратные λ_1 и λ_2), то положеніе оси D должно быть соотвѣтственнымъ образомъ измѣнено. Напримѣръ при масштабѣ расходовъ въ 3 раза большемъ, чѣмъ масштабъ уклоновъ, изъ уравненія (52) получаемъ:

$$\frac{x}{s-x}=\frac{19.3}{7}:\frac{19}{4}=12:7, \tag{64}$$

откуда

$$x=\frac{12}{19}s.$$

Обыкновенно на діаграммахъ гидравлическихъ формулъ, построенныхъ по методу точекъ прямолинейнаго пересѣченія, проводится еще ось, служащая масштабомъ для опредѣленія скоростей v. Для опредѣленія положенія и дѣленій масштаба скоростей на основаніи положенія масштабовъ Q и D можно было бы поступить такимъ же образомъ, исходя изъ отношенія

$$v=\frac{4\,Q}{\pi\,D^2},$$

логарифмируя это выраженіе и представляя полученное уравненіе въ видѣ системы сопряженныхъ масштабовъ, въ которой масштабы Q и D совпадаютъ съ построенными ранѣе. Но прибѣгать къ этому не приходится, такъ какъ можно опредѣлить искомыя положенія и дѣленія чисто графическимъ путемъ. Для этого стоитъ только принять во вниманіе, что скорость въ 1,00 м. развивается въ трубопроводѣ діаметромъ 0,30 м. при расходѣ 70,7 литр., а въ трубопроводѣ діаметра 0,60 м., при расходѣ въ 282,7 литр. На основаніи этого мы можемъ провести соотвѣтственныя пересѣкающія прямыя и найти такимъ образомъ точку оси v, помѣчаемую 1,00 метр. Повторяя ту же операцію съ данными $Q=7{,}07$ литр., $D=0{,}30$ м. и $Q=28{,}27$ литр., $D=0{,}60$ м., получаемъ точку, соотвѣтствующую скорости 0,10 м. Эти двѣ точки должны находиться на линіи, параллельной другимъ масштабамъ. Остается только градуировать разстояніе между 0,10 м. и 1,00 м. и продолжить дѣленія въ обѣ стороны.

Черт. 20 представляетъ діаграмму сопряженныхъ масштабовъ для графическаго расчета трубопроводовъ круглаго сѣченія по формулѣ Фламана, построенную Даріэсомъ. Она состоитъ изъ четырехъ масштабовъ, идущихъ въ слѣдующемъ порядкѣ, считая слѣва: масштабъ расходовъ (въ метрахъ въ секунду), масштабъ діаметровъ (въ метрахъ), масштабъ потерь напора (въ видѣ десятичныхъ дробей, опредѣляющихъ отношеніе высоты потери напора къ длинѣ трубопровода) и масштабъ скорости (въ метрахъ въ секунду). Масштабъ расходовъ включаетъ расходы, начиная съ 0,5 метра до 1000 литр. въ секунду, причемъ числа идутъ увеличиваясь снизу вверхъ. Масштабъ діаметровъ охватываетъ діаметры, начиная съ 0,01 метра до 1,00 метра, причемъ числа увеличиваются также снизу вверхъ. Масштабъ уклоновъ (потерь напора) содержитъ уклоны, начиная съ 1 : 1000000 до 1 : 1 причемъ числа идутъ увеличиваясь сверху внизъ. Наконецъ, масштабъ скоростей заключаетъ скорости въ предѣлахъ отъ 0,05 метр. до 10,00 метровъ.

Эта діаграмма построена слѣдующимъ образомъ. Разстояніе между масштабомъ расхода и масштабомъ гидравлическихъ уклоновъ выбрано съ такимъ расчетомъ, что логарифмы расходовъ откладываются въ масштабѣ въ 3 раза большемъ, нежели логарифмы уклоновъ. Въ этомъ случаѣ, если обозначимъ разстояніе между масштабами расходовъ и уклоновъ черезъ l, а разстояніе между масштабомъ расходовъ и масштабомъ діаметровъ черезъ x, то должно быть соблюдено соотношеніе:

$$\frac{x}{l-x} = \frac{3.19}{7} : \frac{19}{4} = 12 : 7, \tag{65}$$

откуда

$$x = \frac{12}{19}\, l.$$

Величина x принята равной 70 мм. Поэтому

$$l = \frac{95.19}{12} = 110{,}8 \text{ мм.}$$

Модуль масштаба гидравлическихъ уклоновъ взятъ такимъ образомъ, что единицѣ логарифмовъ соотвѣтствуетъ 20 мм. Масштабъ расходовъ, какъ сказано, въ 3 раза крупнѣе, т. е. 60 мм. за единицу логарифмовъ. Исходя изъ такого соотношенія, на размѣщенныхъ въ вышеуказанномъ разстояніи линіяхъ отложены логарифмы чиселъ: для расходовъ отъ 1 до 1000, а для уклоновъ отъ 1 до 0,000001. Такимъ образомъ получены масштабы расходовъ и гидравлическихъ уклоновъ. Для полученія масштаба діаметровъ, выбрано (на основаніи таблицы для формулы Фламана) такое соотношеніе Q и i, чтобы при немъ D было равно 1,00 м., и точки, соотвѣтствующія этимъ величинамъ Q и i соединены прямою. Пересѣченіе ея съ линіей масштаба діаметровъ даетъ точку, помѣченную 1,00. Такимъ же образомъ найдена точка для 0,10 м. Разстояніе между этими точками раздѣлено пропорціонально дѣленіямъ логарифмической линейки, и дѣленія продолжены въ обѣ стороны. Такимъ образомъ полученъ масштабъ діаметровъ. Масштабъ скоростей полученъ подобнымъ же образомъ.

Способъ употребленія діаграммы для формулы Фламана, представленной на черт. 20, вытекаетъ естественно изъ предыдущаго. Соотвѣтственныя величины четырехъ элементовъ, характеризующихъ теченіе, расхода, діаметра, гидравлическаго уклона и скорости, находятся на одной пересѣкающей масштабъ прямой, которую опредѣляютъ двѣ заданныя изъ этихъ величинъ. Двѣ другія неизвѣстныя читаются въ точкахъ встрѣчи сѣкущей линіи съ соотвѣтствующими масштабами. На практикѣ избѣгаютъ проводить сѣкущія линіи на самомъ чертежѣ, что повлекло бы быстрое загрязненіе и порчу его. Вмѣсто этого гораздо проще, скорѣе и удобнѣе употреблять или натянутую нить, или прозрачную полосу изъ бумаги, целлулоида и т п., на которой предварительно прочерчена прямая линія (называемую транспарантомъ). При этомъ можно передвигать эту полосу или при помощи пальцевъ, или, что лучше, при помощи прикрѣпленныхъ на концахъ двухъ штифтовъ съ остріями. Въ послѣднемъ случаѣ удобно, поставивъ одно остріе на извѣстное дѣленіе, вращать прямую около оси острія, безъ опасности скольженія или перемѣщенія.

Тѣ графическіе способы расчета трубопроводовъ, которые могутъ называться номографическими, исчерпываются вышеизложенными. Но существуютъ графическіе методы и пріемы, примѣняемые также къ расчету водопроводной сѣти, другого типа, существенно отличнаго. Я указалъ въ началѣ этой работы коренную разницу между этими двумя методами графическаго расчета. Діаграммы номографическія представляютъ то или другое математическое соотношеніе для всѣхъ возможныхъ значеній входящихъ элементовъ въ опредѣленныхъ предѣлахъ. Другой методъ графическаго расчета состоитъ въ томъ, что числовой расчетъ замѣняется вычерчиваніемъ діаграммы (эпюры) въ примѣненіи къ даннымъ каждаго частнаго случая, такъ что каждый разъ для новаго состава данныхъ приходится составлять новую эпюру. Такой методъ можно называть графическимъ расчетомъ въ собственномъ значеніи слова. Я называю его, въ отличіе отъ номографическихъ способовъ расчета трубопроводовъ, методомъ *идіографическимъ*, а относящіяся къ нему діаграммы—*идіографическими діаграммами.*

Примѣромъ примѣненія такого идіографическаго метода къ расчету водопроводовъ относится попытка графическаго расчета простѣйшихъ элементовъ водопроводной сѣти, принадлежащая М. С. Ясюковичу („Графическій методъ расчета сѣти водопроводныхъ трубъ“).

Я не буду останавливаться въ настоящей работѣ на опредѣленныхъ выше идіографическихъ методахъ расчета, предполагая посвятить этому интересному вопросу другую работу. Скажу только, что вполнѣ возможнымъ является примѣненіе этого метода къ расчету отдѣльныхъ трубопроводовъ, т. е. къ рѣшенію той единственной задачи, которая рѣшается непосредственно путемъ методовъ номографическихъ. Къ одному изъ такихъ способовъ пришлось прійти, между прочимъ, мнѣ, и, нужно думать, этотъ способъ не единственный. Но роль идіографическихъ методовъ гидравлическаго расчета гораздо важнѣе. Они даютъ возможность, по существу недоступную для номографическихъ методовъ расчета болѣе или менѣе сложныхъ комбинацій трубопроводовъ. Есть основаніе думать поэтому, что эти именно методы, будучи поставлены въ связь съ принципами графическаго интегрированія, могутъ дать путь къ разрѣшенію труднаго вопроса о расчетѣ цѣлой сѣти водопроводныхъ трубъ, менѣе условнаго, нежели примѣняемый въ настоящее время. Мнѣ кажется вообще, что въ дѣлѣ гидравлическаго расчета водопроводовъ очередными вопросами являются именно разработка идіографическихъ методовъ расчета трубопроводовъ, съ одной стороны, а съ другой—графическій расчетъ цѣльныхъ сѣтей или по крайней мѣрѣ элементовъ ихъ, т. е. комбинацій отдѣльныхъ трубопроводовъ, черезъ посредство ли указанныхъ или, можетъ быть, иныхъ методовъ.

Что касается собственно номографическихъ способовъ расчета водопроводовъ, о которыхъ была рѣчь въ этой работѣ, то изъ предшествующаго видно, что число способовъ графическаго изображенія гидравлическихъ формулъ и уравненій довольно велико; въ особенности широко разработаны они въ примѣненіи къ трубопроводамъ круглаго сѣченія. Всѣ они представляютъ приложенія различныхъ принциповъ, входящихъ въ область Номографіи и выработанныхъ Декартомъ, Пуше, Лаланномъ и д'Оканемъ. Руководящей цѣлью приложенія методовъ Номографіи въ указанныхъ способахъ гидравлическаго расчета и мотивомъ послѣдовательной смѣны и большаго или меньшаго распространенія различныхъ способовъ, т. е. различныхъ типовъ діаграммъ, являлись (помимо, конечно, точности тѣхъ формулъ, которыя подвергались графическому представленію) простота и удобство практическаго примѣненія діаграммъ и проистекающее отъ этого сбереженіе труда и времени. Въ этомъ отношеніи можно сказать, что номографическій способъ гидравлическаго расчета въ настоящее время, съ введеніемъ въ употребленіе діаграммъ сопряженныхъ масштабовъ и логарифмографическихъ таблицъ, достигъ такого успѣха, дальше котораго итти трудно.

Для освѣщенія этого вопроса, опредѣляющаго raison d'être всѣхъ графическихъ методовъ расчета, скажемъ нѣсколько словъ о преимуществахъ такого расчета надъ расчетомъ числовымъ, даже облегченномъ при посредствѣ таблицъ, и сравнительномъ достоинствѣ отдѣльныхъ способовъ графическаго расчета.

Цѣнность всякихъ средствъ, ускоряющихъ и облегчающихъ веденіе многочисленныхъ и сложныхъ вычисленій, связанныхъ съ техническими расчетами, является общепризнанной. Всѣ пособія, направленныя къ этой цѣли въ области гидравлическаго расчета, стремятся совершенно устранить потребность въ производствѣ какихъ либо выкладокъ и достигнуть того, чтобы весь расчетъ сѣти трубъ возможно было вести, имѣя подъ рукой лишь это пособіе и бланкъ для записыванія получаемыхъ результатовъ. Такими пособіями служатъ разнаго рода таблицы, числовыя или графическія.

Числовыя таблицы, допуская возможность имѣть лишь двѣ входящихъ перемѣнныхъ величины, по двумъ координатамъ, заставляютъ разбивать расчетную формулу, обыкновенно заключающую большее количество перемѣнныхъ, на составныя части, составлять для каждой такой части отдѣльную таблицу и пользоваться нѣсколькими таблицами совмѣстно. Такимъ образомъ увеличивается и число таблицъ, и время работы, и возможность ошибки при пользованіи ими. Въ графическихъ таблицахъ на одномъ и томъ же мѣстѣ помѣщаются линіи для всѣхъ перемѣнныхъ, въ видѣ одной или нѣсколькихъ системъ. При этомъ, даже въ случаѣ перехода отъ одной системы къ другой, операція производится весьма легко, безъ запоминанія сложныхъ чиселъ, а лишь простымъ перемѣщеніемъ пальца, линейки или транспаранта.

Числовыя таблицы даютъ при расчетѣ рядъ чиселъ, мало говорящихъ уму, и кромѣ того не допускаютъ увѣренности въ ихъ безошибочности, если принять во вниманіе трудность корректуры цифровыхъ таблицъ всѣхъ сортовъ. Для графической таблицы, дающей результаты въ закономѣрномъ порядкѣ, къ которому быстро привыкаетъ глазъ, ошибка ограничивается лишь предѣлами точности отсчета (если не считать возможности ошибки при записываніи полученнаго результата). Грубой же ошибки при правильномъ пользованіи діаграммой получиться не можетъ.

Числовыя таблицы, предлагая прямой отвѣтъ лишь для чиселъ, надписанныхъ по координатамъ и неизбѣжно разнящихся другъ отъ друга на большія или меньшія величины, требуютъ для значеній промежуточныхъ или интерполированія (при крупныхъ промежуткахъ не всегда точнаго) или веденія лишь приблизительнаго расчета, что при формулахъ, разбитыхъ на нѣсколько частей, нежелательно. Графическая таблица, давая непрерывный рядъ значеній, олицетворяющій зависимость между перемѣнными величинами, предлагаетъ непосредственный отвѣтъ для какихъ угодно заданныхъ величинъ.

Только что перечисленныя достоинства свойственны всѣмъ вообще графическимъ таблицамъ. Но, какъ было видно въ предыдущемъ, графическихъ таблицъ существуетъ два типа. Въ однихъ для построенія линій, выражающихъ уравненія расчета, производится отложеніе по осямъ координатъ самихъ перемѣнныхъ (діаграммы изоплетныхъ кривыхъ и прямыхъ), въ другихъ же по осямъ, такъ или иначе расположеннымъ, откладываются логарифмы перемѣнныхъ (логарифмо-графическія таблицы и діаграммы сопряженныхъ масштабовъ). Нужно сказать, что эти послѣдніе болѣе новые виды діаграммъ, *принимая* логарифмическій характеръ дѣленій, тѣмъ самымъ обезпечиваютъ новыя преимущества, отличающія ихъ отъ діаграммъ съ нормальной градуировкой осей. Преимущества эти заключаются, главнымъ *образомъ*, въ слѣдующемъ.

Благодаря закону измѣненія логарифмовъ послѣдовательныхъ чиселъ, охватъ таблицы, т. е. предѣлы входящихъ въ нее значеній, можетъ быть весьма широкъ, при достаточной точности раздѣленія. Дѣйствительно, чтобы въ нормальный масштабъ вмѣстить величины отъ 0,00001 до 1, при условіи возможности ихъ отсчета, потребовался бы или громадный размѣръ чертежа, или очень сильно разнящіяся отмѣтки дѣленій, или дѣленія, неуловимыя простымъ глазомъ. Въ діаграммахъ логарифмическаго типа для той же цѣли требуются крайне ограниченные размѣры чертежа, при вполнѣ достаточной ясности и точности. Въ этомъ заключается драгоцѣнное качество логарифмическихъ діаграммъ. Далѣе, процентъ точности вычисленій при отсчетѣ по діаграммамъ съ логарифмическимъ подраздѣленіемъ, какъ было доказано выше, всегда одинъ и тотъ же. При дѣйствіяхъ съ малыми числами точность абсолютная больше, при дѣйствіяхъ съ большими она меньше, но величина возможной ошибки въ отношеніи къ отсчету остается одинаковой.

Если сравнивать два наиболѣе современные вида діаграммъ номографическаго расчета, именно способъ логарифмо-графическихъ таблицъ и способъ сопряженныхъ масштабовъ, то нужно сказать прежде всего, что оба эти вида отличаются такими общими достоинствами и доводятъ гидравлическій расчетъ до такой простоты, что трудно проводить серьезную разницу между ними. Однако можно отмѣтить въ способѣ логарифмо-графическихъ таблицъ нѣкоторые недостатки, которые избѣгнуты въ способѣ сопряженныхъ масштабовъ.

Въ самомъ дѣлѣ, способъ пользованія логарифмо-графическими таблицами сводится каждый разъ къ тому, чтобы взять точку встрѣчи двухъ линій и прочесть отмѣтку прямой, проходящей черезъ эту точку. Такъ какъ отмѣтки, по необходимости, пишутся или по концамъ линій, или во всякомъ случаѣ на нѣкоторомъ, обыкновенно значительномъ разстояніи одна отъ другой, то приходится, начиная ли отъ отмѣтки и разыскивая точку встрѣчи или наоборотъ, слѣдить за линіей на извѣстномъ протяженіи. Примѣняя эту операцію къ тремъ линіямъ при каждомъ чтеніи, всегда является опасность, при малѣйшей невнимательности, перейти съ данной линіи на сосѣднюю и такимъ образомъ допустить ошибку въ отсчетѣ. Въ этомъ отношеніи пользованіе діаграммой сопряженныхъ масштабовъ, гдѣ искомая точка и ея отсчетъ указывается пересѣченіемъ линейки или линіи транспаранта съ соотвѣтственнымъ масштабомъ, представляется нѣсколько проще. Далѣе, если значенія перемѣнныхъ, съ которыми приходится имѣть дѣло, не тѣ, которымъ соотвѣтствуютъ линіи, дѣйствительно проведенныя на чертежѣ, при употребленіи логарифмо-графической таблицы, приходится дѣлать мысленно интерполяцію между этими линіями. Эта операція при всей ея легкости, всетаки не такъ проста, какъ если нужно памѣтить на глазъ промежуточную точку между дѣленіями, нанесенными на одинъ изъ масштабовъ діаграммъ д'Оканя.

Количество и взаимное переплетеніе линій въ логарифмо-графическихъ таблицахъ, не представляютъ, конечно, серьезнаго неудобства, такъ какъ глазъ быстро привыкаетъ къ этому. Однако это обстоятельство, а также необходимое при работѣ довольно значительное вниманіе могутъ, въ концѣ концовъ, утомлять глазъ, и тѣмъ скорѣе, чѣмъ больше системъ линій заключаетъ таблица. Въ діаграммѣ сопряженныхъ масштабовъ при обычномъ составѣ ея не можетъ быть и рѣчи о помѣхѣ одной системы масштабовъ другой; даже при нѣсколькихъ системахъ масштабовъ не можетъ быть рѣчи о затемнѣніи, что вполнѣ возможно для логарифмо-графической таблицы. Нужно думать, что благодаря этому, пользованіе діаграммой сопряженныхъ масштабовъ также менѣе утомительно.

Здѣсь кстати нужно подчеркнуть въ отношеніи обоихъ видовъ діаграммъ, что главное ихъ преимущество заключается въ простотѣ. Поэтому слѣдуетъ избѣгать при составленіи и пользованіи діаграммами всего, что можетъ быть излишнимъ и что можетъ затруднять чтеніе. Кромѣ того необходимо вычерчивать ихъ въ достаточно большомъ масштабѣ, иначе приближеніе можетъ быть недостаточнымъ.

Предшествующее не мѣшаетъ намъ, конечно, считать расчетъ при помощи логарифмо-графическихъ таблицъ весьма удобнымъ и цѣннымъ. Мы можемъ сказать, что оба новѣйшіе способа номографическаго расчета, какъ логарифмо-графическія таблицы, такъ и діаграммы сопряженныхъ масштабовъ, достигаютъ въ совершенствѣ цѣли, которая ставится всѣми вообще методами, направленными къ упрощенію гидравлическаго расчета, и доводитъ процессъ расчета, можно сказать, до идеальной простоты и скорости.

Изъ этого ясно, что въ настоящее время едва ли есть практическая надобность въ разработкѣ новыхъ способовъ графическаго расчета отдѣльныхъ трубопроводовъ, и спеціалисты водопроводной гидравлики могутъ направить свою работу на другія области. Въ отношеніи же труда надъ существующими номографическими способами расчета, можно пожелать, пожалуй, только дальнѣйшей разработки ихъ въ примѣненіи къ различнымъ формамъ сѣченія (кромѣ круглаго), примѣняемымъ въ практикѣ, и къ разнымъ степенямъ наполненія. По за то вполнѣ естественнымъ является пожеланіе, чтобы эти графическіе способы обратили на себя должное вниманіе спеціалистовъ и получили болѣе широкую извѣстность и примѣненіе, какъ крайне цѣнное средство для расчета, сокращающее въ лучшихъ случаяхъ, можно сказать, до минимума необходимый трудъ и время, безъ всякаго ущерба для практической точности, при условіи, конечно, надлежащаго выбора расчетныхъ гидравлическихъ формулъ, представляемыхъ діаграммами.

1910 г.

ЛИТЕРАТУРА ПО ДАННОМУ ВОПРОСУ.

Акуловъ. Служба старыхъ водопроводныхъ трубъ и примѣненія графическаго метода къ рѣшенію гидравлическихъ задачъ (Труды V Водопр. Съѣзда, 1901).

D'Aubrive et Villerupt. L'album des abaques pour le calcul des conduites d'eau. 1891.

Baumeister. Städtische Strassenwesen und Städtereinigung. 1887.

Bechmann. Salubrité urbaine. II. Assainissement. 1899.

Wehner. Ein Betrag zur Berechnung des Rohrwiederstandes in der Praxis. (Gesundheits-Ingenieur, 1897).

Врублевскій. Графическій способъ расчета водостоковъ (Изв. Общ. Гражд. Инженеровъ, 1907).

Hobrecht. Die Kanalisation von Berlin. 1882.

Горбачевъ П. Ф. О расчетѣ скоростей теченія и отводоспособности въ водопроводахъ и водостокахъ. 1904.

Dariès. Calcul des conduites d'eau. 1900.

Кашкаровъ Н. А. Расчетъ трубопроводовъ графическимъ способомъ Бертрана. 1907.

Coffin. The graphical solution of hydraulic problems. 1900.

Collignon. Cours de mechanique. II. Hydraulique.

Lalanne. Mémoire sur les tables graphiques et sur la géometrie anamorphose appliquée à diverses questions qui se rattachent à l'art de l'ingénieur (Annales des Ponts et Chaussées, 1846).

Lampe. Untersuchungen über die Bewegung des Wassers in Röhren (Civil-Ing., 1873, Bd. XIX).

Van-Muyden. Abaque logarithmique pour le calcul des conduites d'eau sous pression. 1905.

Николинъ Я. И. Формулы логарифмическаго вида для расчета водопроводовъ. 1910.

Николинъ Я. И. Графическіе методы расчета водоснабженія и канализаціи. Вып. I. Теорія и примѣненія способа сопряженныхъ масштабовъ. 1910.

D'Ocagne. Coordonnées parallèles et axiales. 1885.

D'Ocagne. Nomographie. 1891.

D'Ocagne. Traité de Nomographie. 1899.

D'Ocagne. Exposé synthétique des principes fondamenteaux de la Nomographie. 1903.

Саткевичъ В. А. Расчетъ водопроводной сѣти трубъ при помощи логарифмо-графической таблицы (Строитель, 1898).

Schilling. Ueber die Nomographie de M. d'Ocagne.

E. B. and G. M. Taylor's diagrams of the discharge of pipes in accordance with Kutter's formula. 1891.

Thiem. Ueber graphische Durchmesserbestimmung bei Wasserleitung (Journ. für Gasbeleucht. und Wasserversorg., 1885).

Flamant. Hydraulique. 1900.

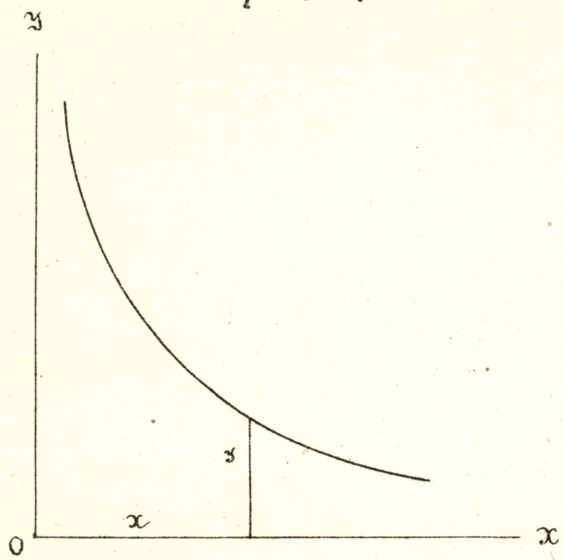
Черепашинскій М. М. Водоснабженіе городовъ. 1905.

Чижовъ Н. К. Механическій способъ вычисленія потери напора (Строитель, 1897).

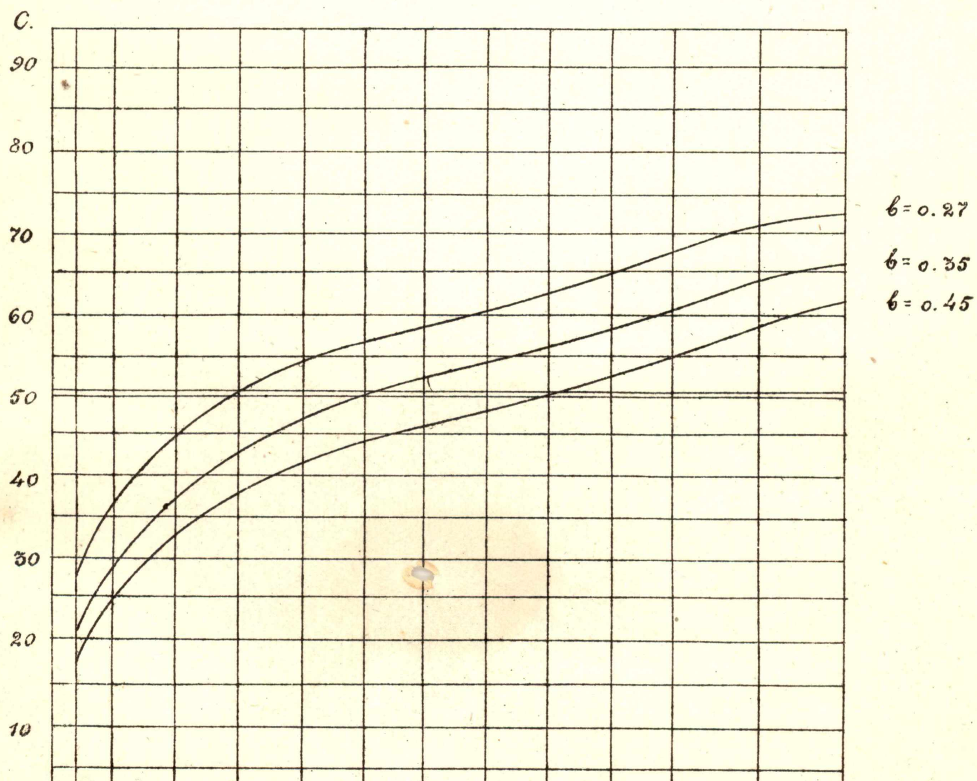
Ясюковичъ М. Расчетъ водостоковъ съ помощью логарифмо-графическихъ таблицъ. 1906.

Ясюковичъ М. Графическій методъ расчета сѣти водопроводныхъ трубъ. 1905.

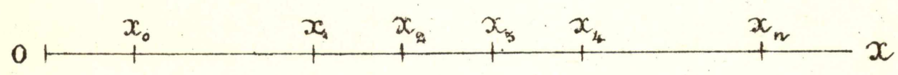
Черт. 1.


y
y
x
0
x

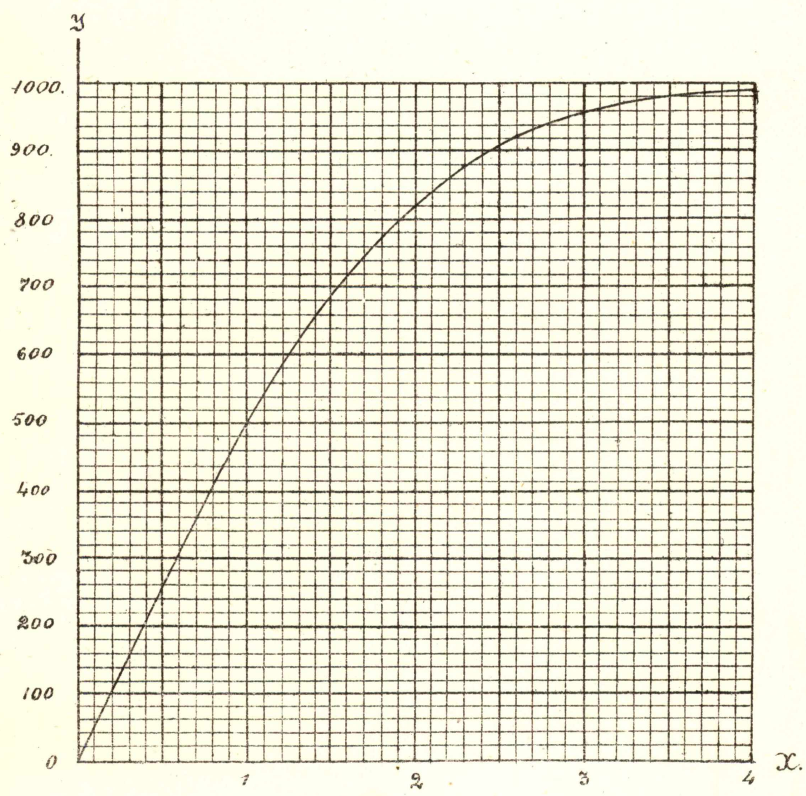
Черт. 2.


C.
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0.01
0.025
0.05
0.075
0.10
0.125
0.15
0.175
0.20
0.25
0.30
0.40
0.50
b = 0.27
b = 0.35
b = 0.45

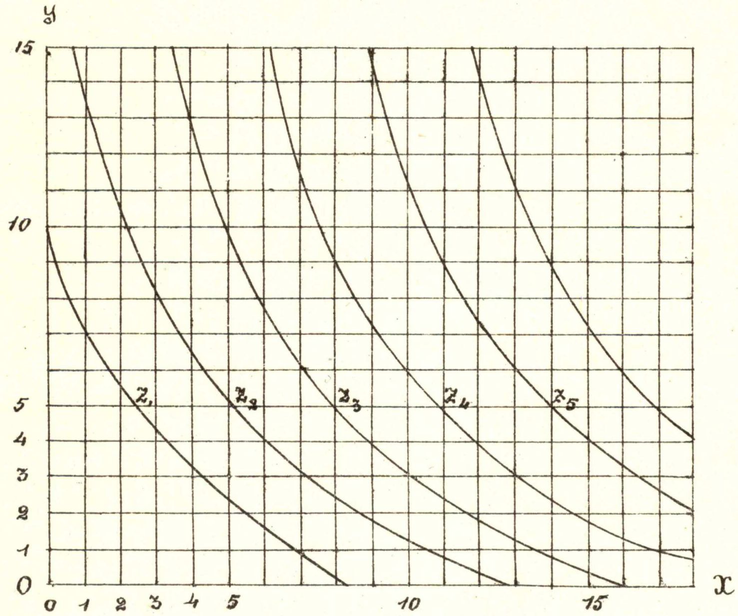
Черт. 3.


0
x_0
x_1
x_2
x_3
x_4
x_n
x

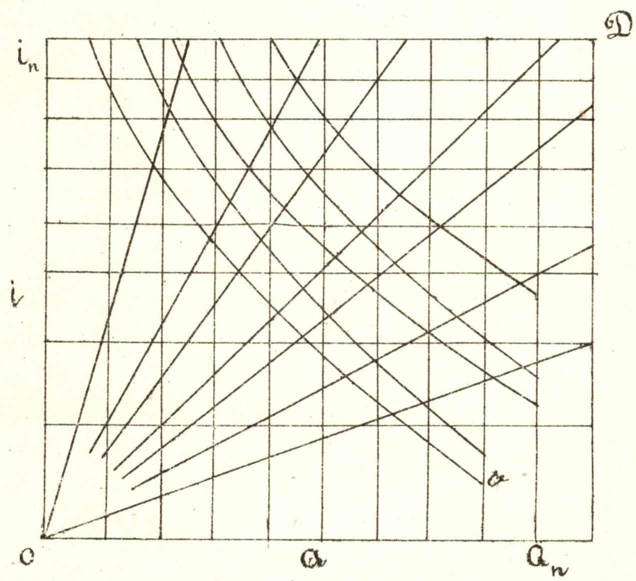
Черт. 4.


y
1000.
900.
800
700
600
500
400
300
200
100
0
1
2
3
4
x.

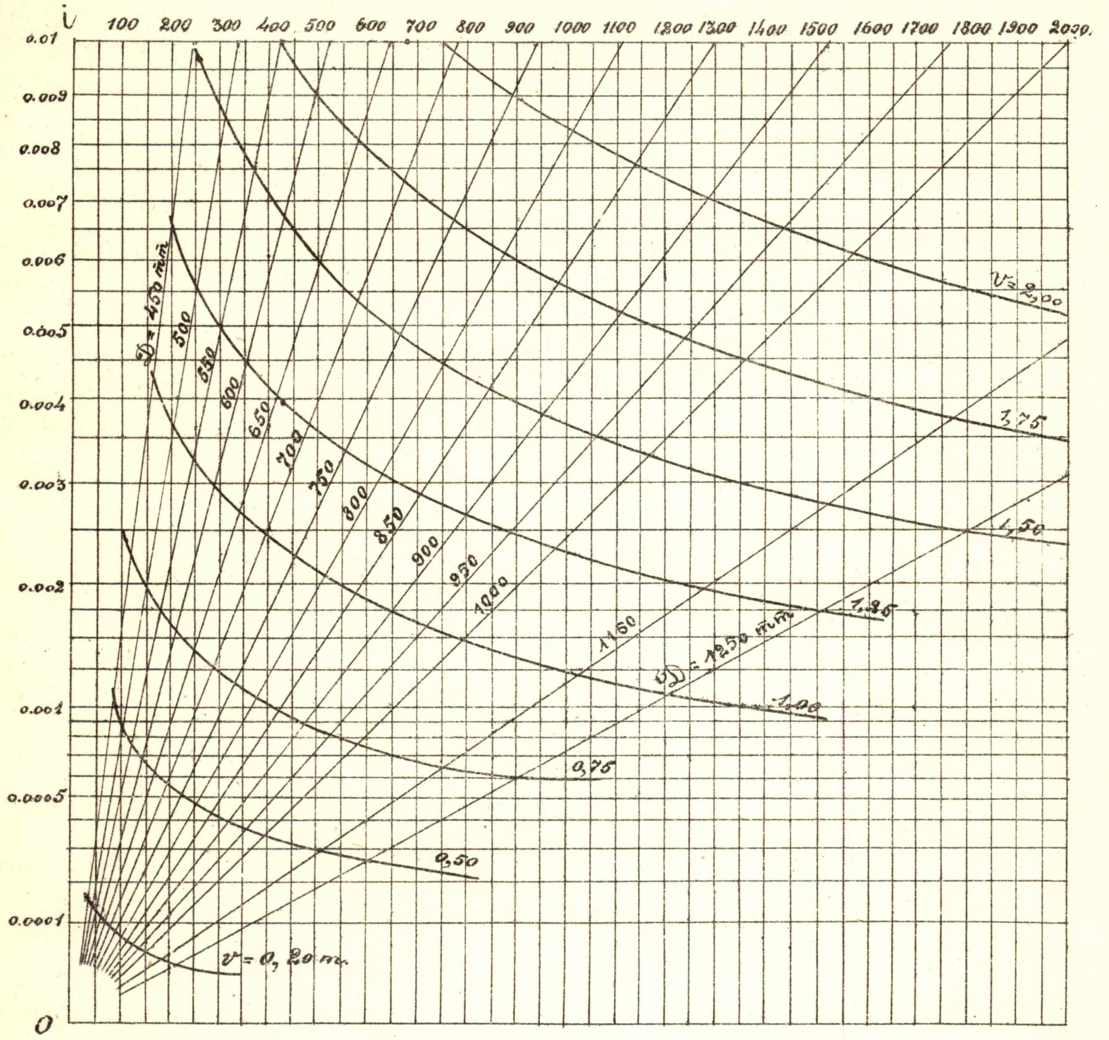
Черт. 5.



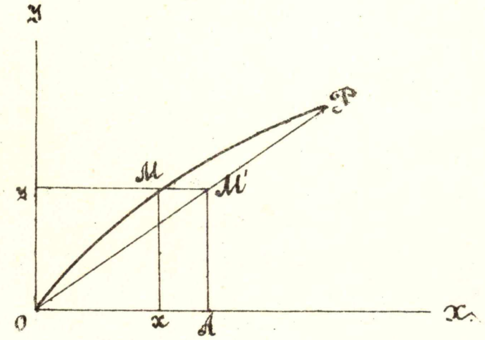
Черт. 6.



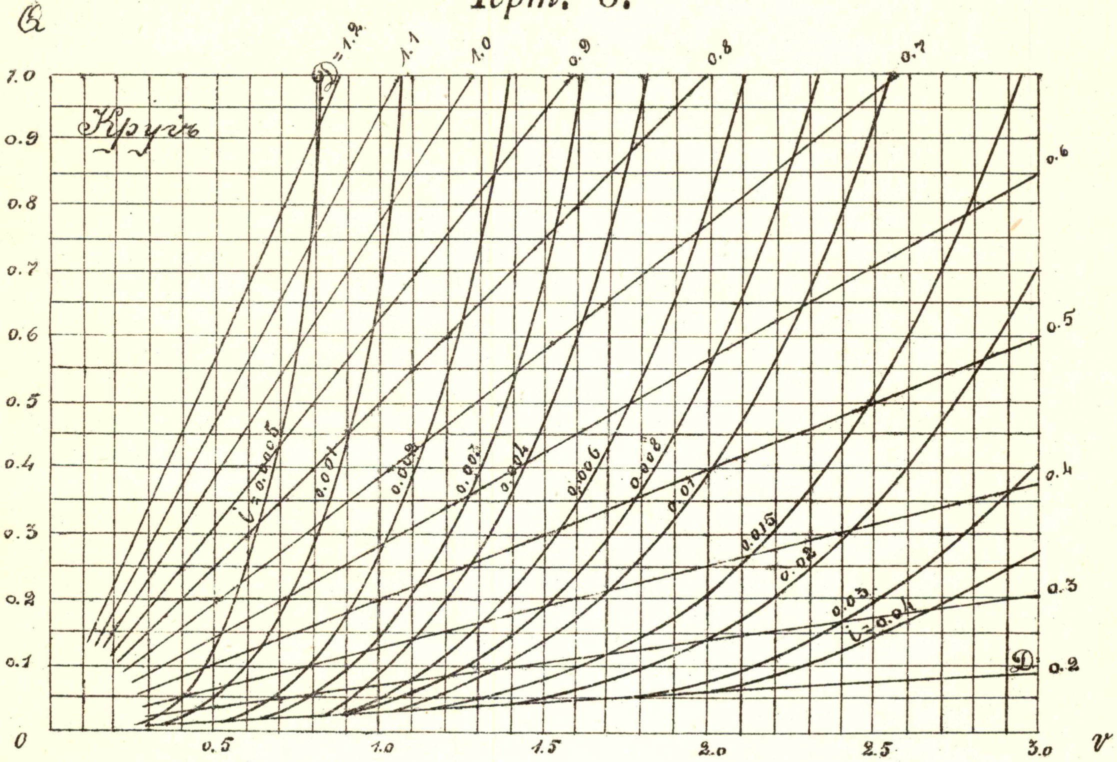
Черт. 7.



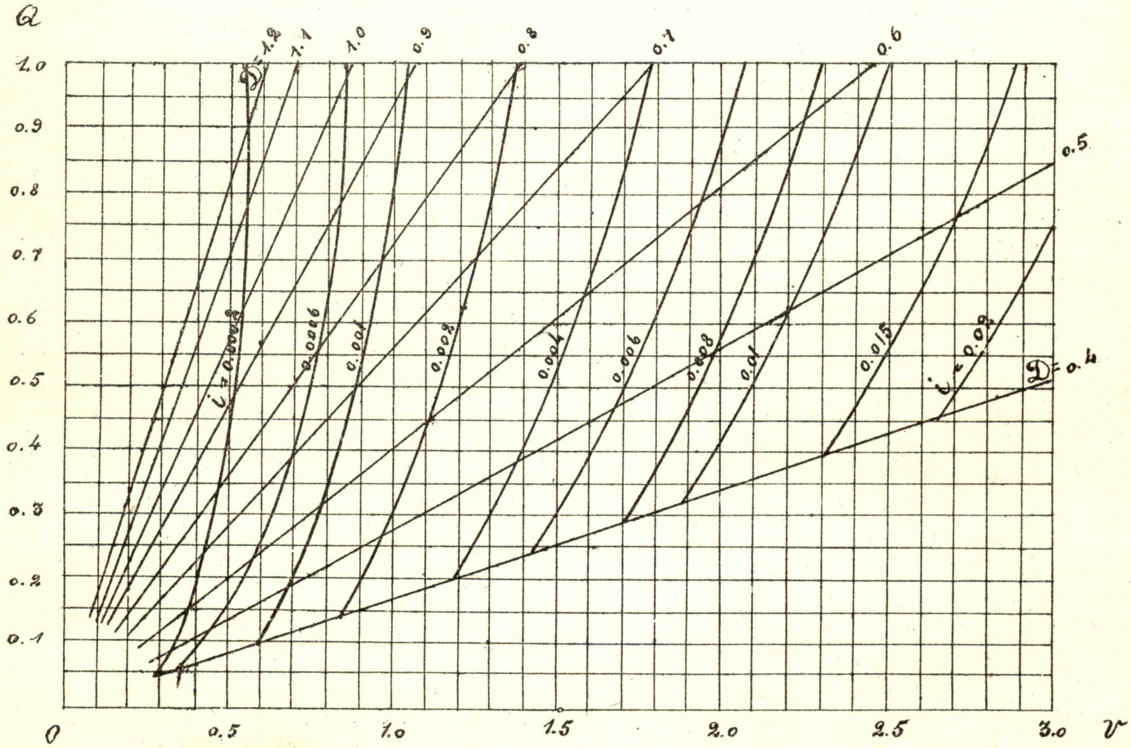
Черт. 10.



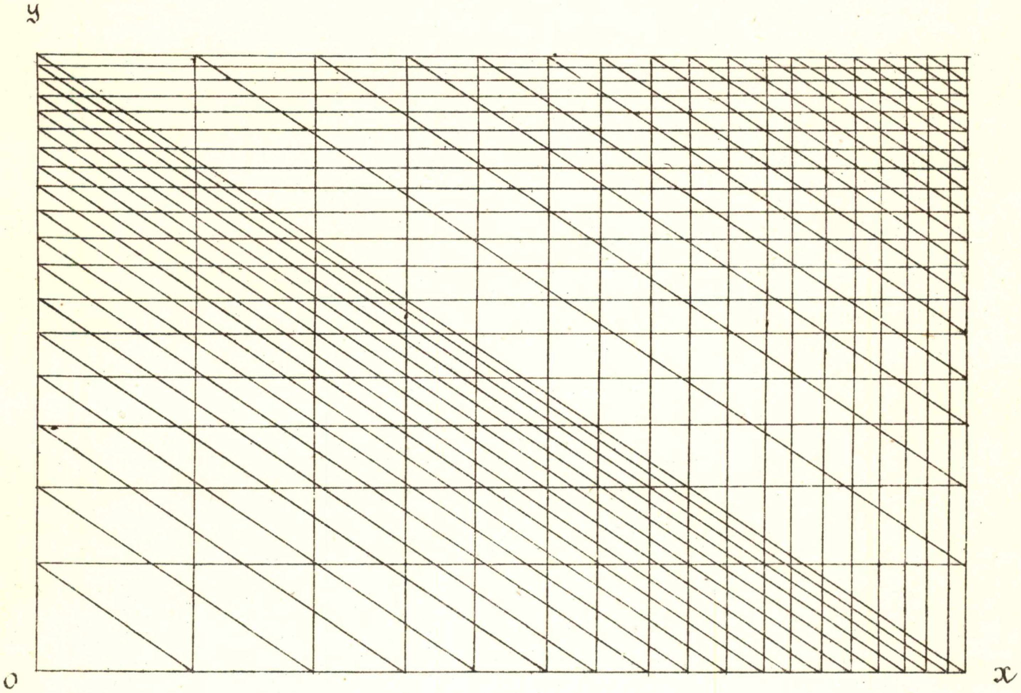
Черт. 8.


Q
Кругъ
D = 1.2
1.1
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
D: 0.2
i = 0.0005
0.001
0.002
0.003
0.004
0.006
0.008
0.01
0.015
0.02
0.03
i = 0.04
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
v

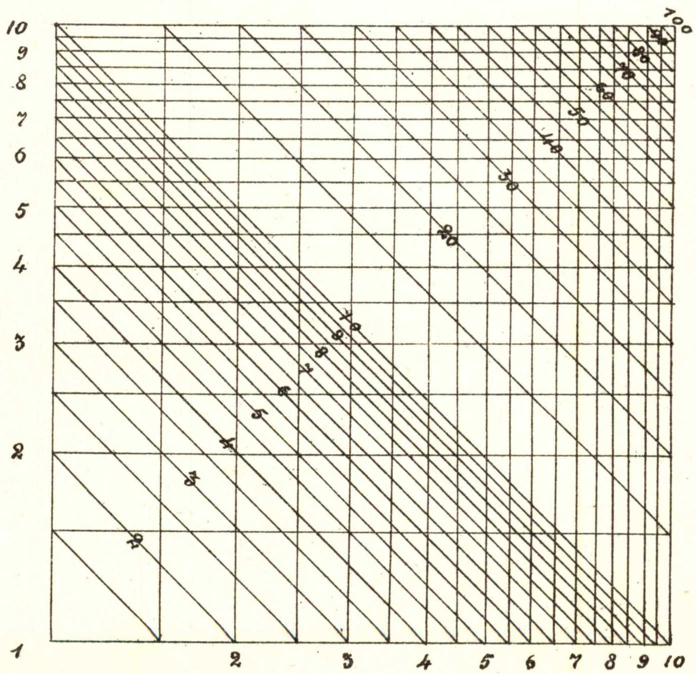
Черт. 9.

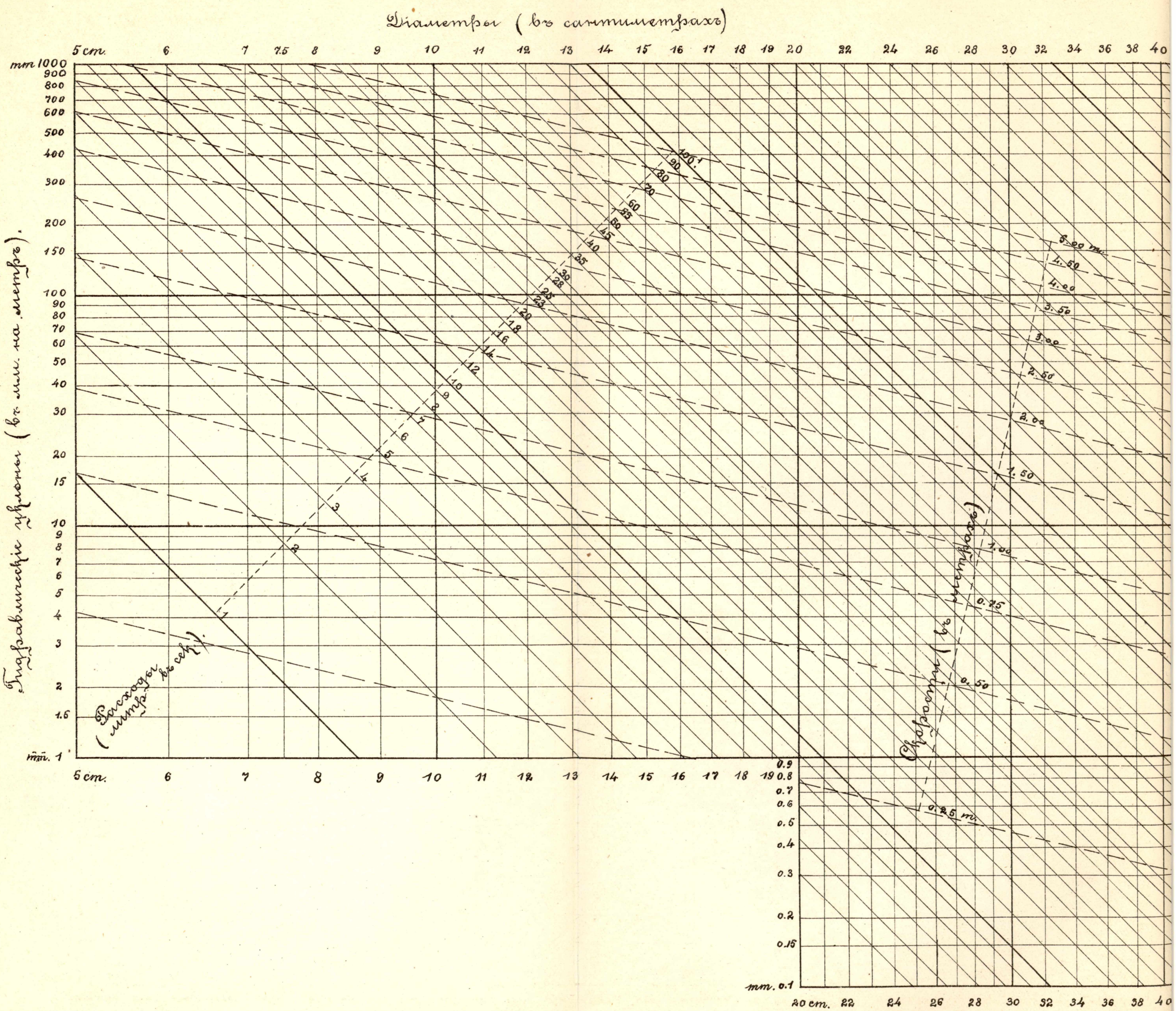

Q
D = 1.2
1.1
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
D = 0.4
i = 0.0005
0.0006
0.001
0.002
0.004
0.006
0.008
0.01
0.015
i = 0.02
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
v

Черт. 11.



Черт. 12.

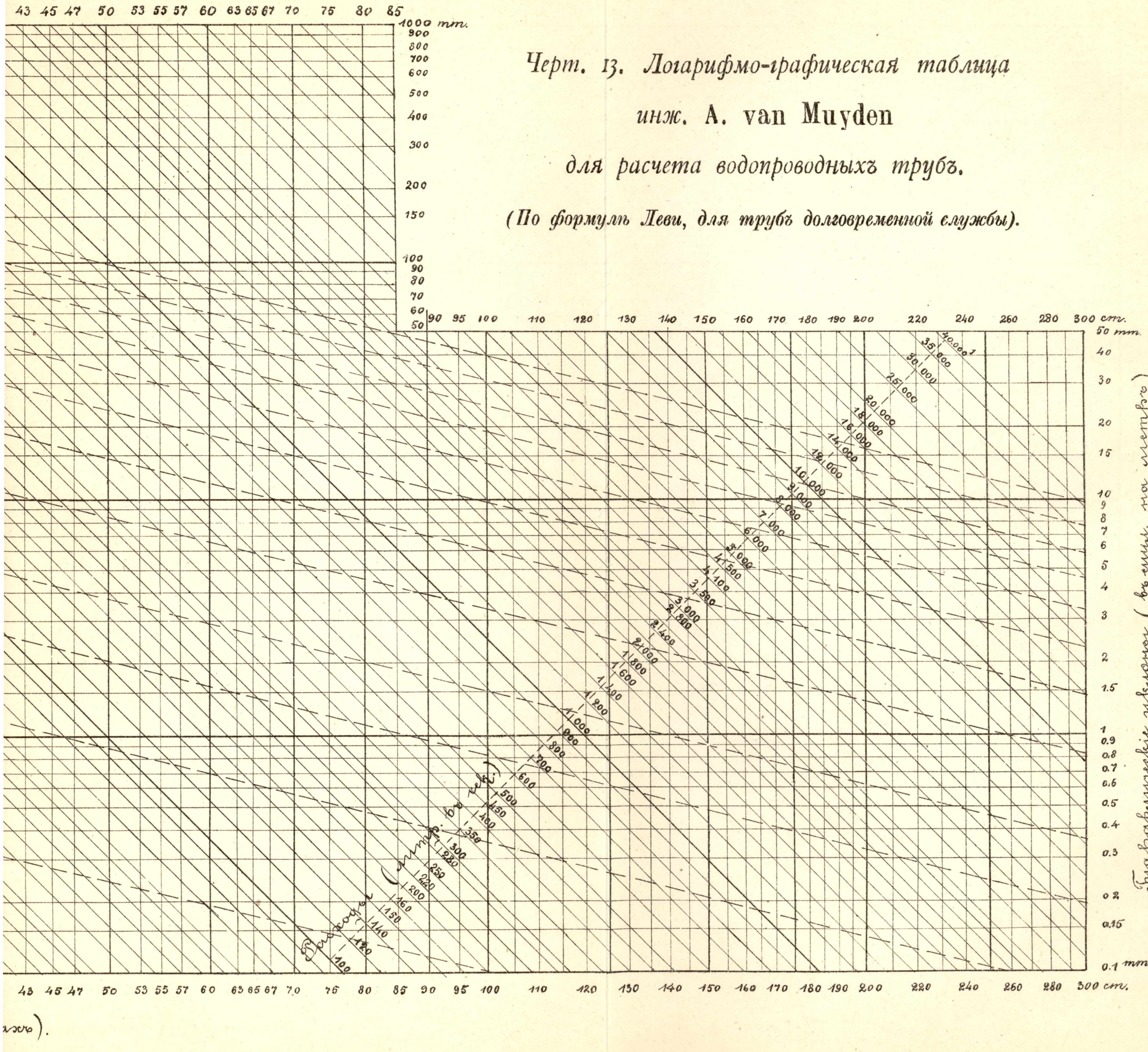




Діаметры (въ сантиметрахъ)
Гидравлическіе уклоны (въ мм. на метръ).
Расходы (литръ въ сек.)
Скорости (въ метрахъ)
Діаметры (въ сантиметр

Черт. 13. Логарифмо-графическая таблица инж. A. van Muyden для расчета водопроводныхъ трубъ.

(По формулѣ Леви, для трубъ долговременной службы).



Черт. 15. Діаграмма проф. Н. К. Чижова для расчета водопроводныхъ трубъ (формула Лампе).

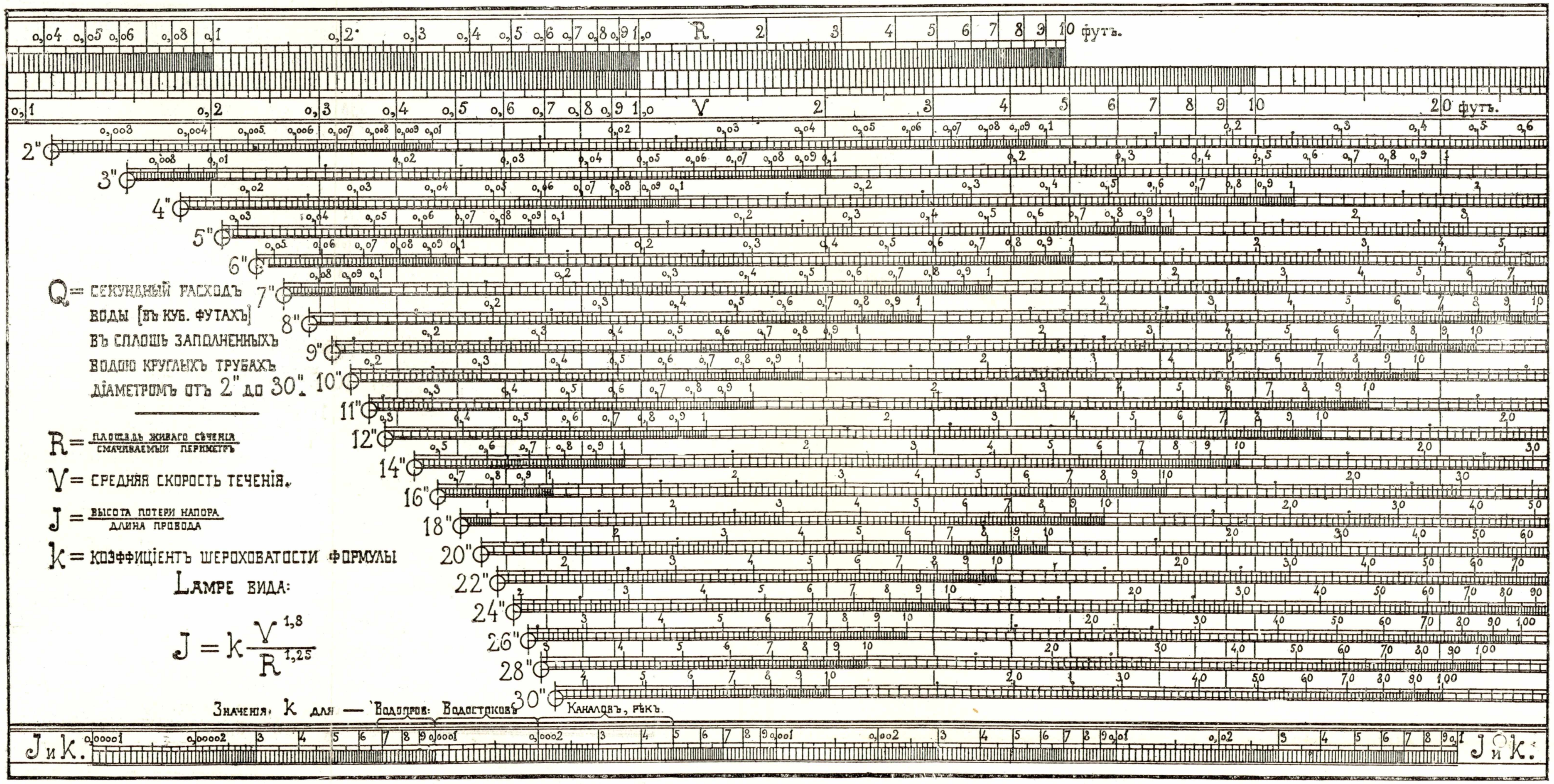
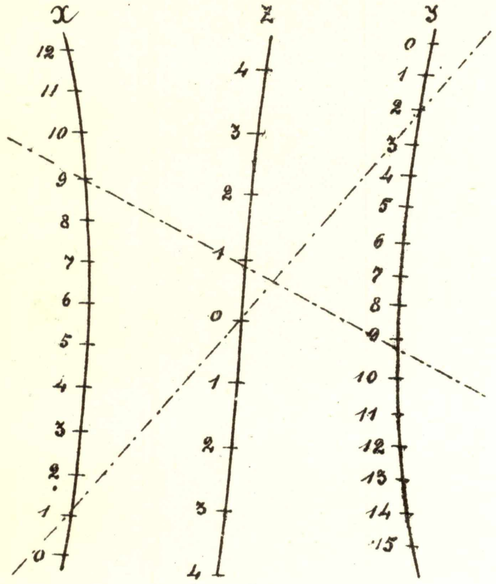
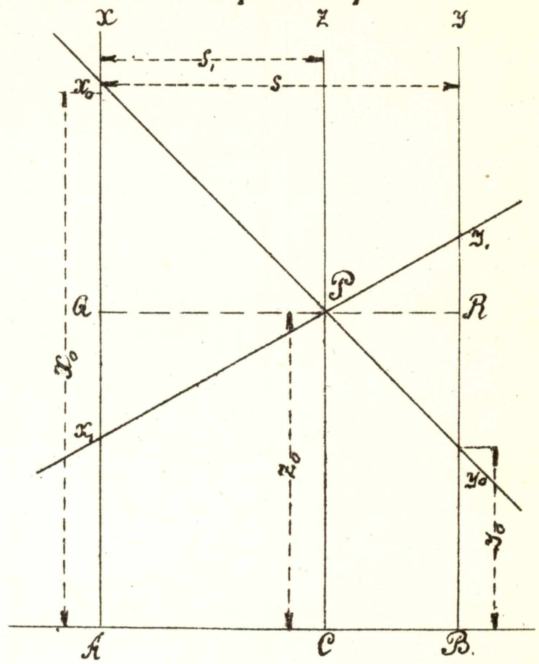


Таблица VIII.

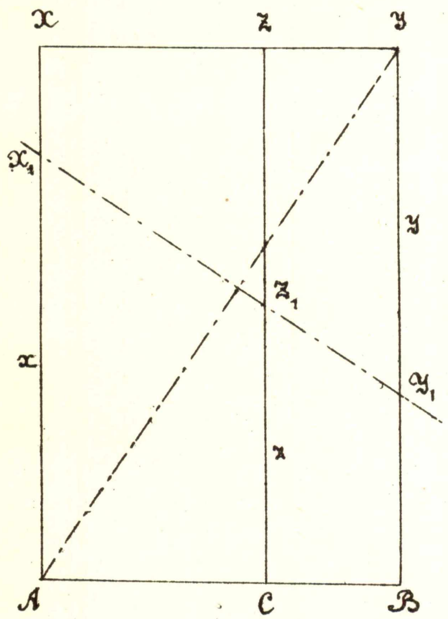
Черт. 16.



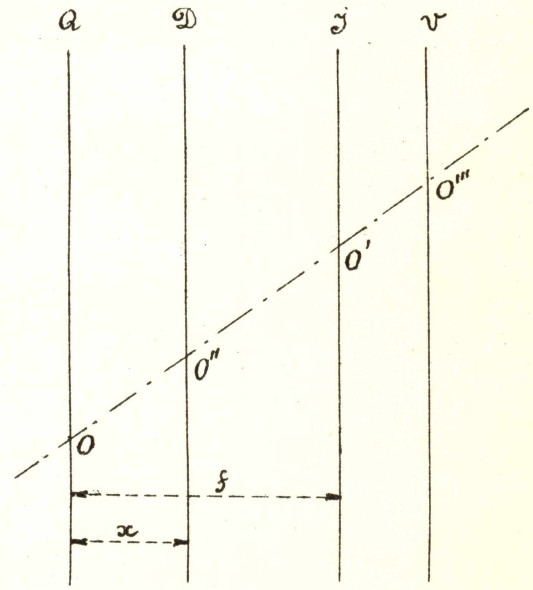
Черт. 17.



Черт. 18.



Черт. 19.



Черт. 20. Діаграмма Даріэса (сокращенная Бертрана) для расчета водопроводныхъ трубъ (формула Фламана).