

Ж-2

ТС-127

Инж. В. Д. ЖУРИН.

Препо. Инж.-мелиоративного ф-та С. А. Г. У.

*с. 111  
1925*

# Гидравлические расчеты

с помощью расходной и  
скоростной характеристик.



ИЗДАНИЕ  
Туркводхоза.  
Ташкент.  
1924.

ТС-127

532

Инж. В. Д. ЖУРИН.

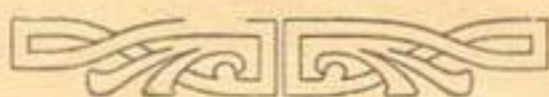
Препод. Инж.-мелиоративного ф-та С. А. Г. У.



Машинопись  
1925

# Гидравлические расчеты

с помощью расходной и  
скоростной характеристик.



ИЗДАНИЕ  
Туркводхоза.  
Ташкент.  
1924.

Перепечатка из № 2—1924 г. журнала „Вестник Ирригации“.

PL N 10

ЖИДКОСТИ.

Введение.

В настоящее время чувствуется значительный под'ем ирригационных работ, а в связи с этим, во всяких схемах, предположениях, постройках и эксплуатации приходится производить много гидравлических расчетов (в особенности расчеты каналов), поэтому сейчас вопросы расчетной гидротехники приобретают понятный, живой и практический интерес.

Для удобства пользования статья содержит достаточно подробно разработанные конкретные примеры в цифрах и, кроме того, снабжена таблицами и графиками. \*\*)

\*\*) В основу статьи положен доклад автора, сделанный 22 марта 1922 г. в кругу преподавателей б. Тех. Фак-та Т.Г.У. под председательством проф. А. В. Угарова.

п. 1. При расчете установившегося равномерного движения в трубах или каналах выражение расхода может быть представлено следующей формулой:

$$Q = \omega C \sqrt{R i} \quad . . . . . (1)$$

- где  $\omega$  — площадь живого сечения потока  
 $R$  — гидравлический или подводный радиус, равный отношению площади живого сечения ( $\omega$ ) к смоченному периметру ( $\chi$ )  
 $C$  — коэффициент, зависящий от степени шероховатости ложа потока, от гидравлического радиуса, и по некоторым авторам—от пьезометрического уклона ( $i$ ) и даже от средней скорости ( $u$ )  
 $i$  — пьезометрический уклон; в открытых руслах это продольный уклон свободной поверхности; в напорных трубах—это падение пьезометрического напора на единицу длины трубы.

Для открытых русел, приведенная формула расхода является обычной; для напорных круглых труб, если сопротивление движению жидкости в трубе считать пропорциональным квадрату скорости и если принять во внимание, что

$$\omega = 0.25 \pi d^2, \quad \text{где } d \text{ — диаметр,}$$

$$\text{и } R = 0.25 d,$$

то формула (1) принимает такой вид:

$$Q = 0.125 \pi d^2 C \sqrt{d i} = 0.393 C d^2 \sqrt{d i} \quad . . . . . (1a)$$

Если же сопротивление считать пропорциональным дробной степени скорости (напр., по формулам Линдлея, Фламана, Унвинга и других), то формула (1) внешне изменяется еще более. Например по Фламанду <sup>1)</sup> средняя скорость

$$u = \sqrt[7]{\frac{d^5 i^4}{a^4}}$$

следовательно  $Q = \approx 0.785 d^2 \sqrt[7]{\frac{d^5 i^4}{a^4}} \quad . . . . . (16)$

В настоящей статье, имея в виду, главным образом, приложение к расчету открытых русел, сохраним при исследовании выражение расхода формулой (1); из дальнейшего будет видно, что излагаемый ход суждений легко может быть применен и для формул подобных (16).

Обратим внимание на множителей правой части уравнения (1).

Величины  $\omega$  и  $R$  суть функции поперечных размеров потока; величина  $i$ , не имеющая измерений (как отношение двух линейных величин), не зависит от поперечных размеров.

п. 2. Коэффициент  $C$  одними авторами дается постоянным, другими—зависящим от одних факторов, третьими—от других факторов и т. д. Формул для вычисления коэффициента  $C$  существует несколько. Одна часть авторов стремится в структуре формулы отразить сущность влияния различных факторов на потери от трения; другая часть удовлетворяется составлением формул, дающих результаты, которые согласуются с данными практики лишь при изменении входящих в формулы величин в некоторых пределах. Последние формулы по виду, обычно, проще первых и потому удобнее в приложениях. Из наиболее употребительных формул для  $C$  в настоящее время к первым относятся ф. Гангиле и

<sup>1)</sup> А. Flamant, Hydraulique (1909 г.) p. 152, § (12).

Куттера и ф. Базена (1897 г.), а к последним—можно отнести Ф. Маннинга. Не отказываясь от пользования в приложениях формулами последнего класса и, даже рекомендуя их, в теоретическом анализе естественно удерживать формулы первого класса. Из двух вышеназванных,—вследствие громоздкости и некоторых теоретических недостатков формулы Гангиле и Куттера <sup>1)</sup>,—мы останавливаемся на формуле Базена, которая для метрического размера имеет вид:

$$C = \frac{87}{1 + \gamma/\sqrt{R}} \dots \dots \dots (2)$$

Здесь С является функцией гидравлического радиуса R и коэффициента шероховатости (γ). Формула (2) применима как для открытых русел, так и для труб. Оговоримся, что для труб часто применяют другие формулы, однако, большинство их дает  $C = \frac{u}{\sqrt{R i}}$  в функции лишь от чистоты (шероховатости) трубы и ее диаметра d.

Например, по Дарси

$$i = \frac{\sigma \lambda}{d} \frac{u^2}{2g} \quad \text{или} \quad u^2 = \frac{2gd i}{\sigma \lambda} \quad \dots \dots \dots (3)$$

где u — средняя скорость.

σ — степень загрязнения. Для чистых труб σ = 1, для старых или грязных — σ от 1,1 до 2.

λ — 0,02  $(1 + \frac{1}{40d})$  есть коэффициент сопротивления.

g — ускорение силы тяжести = 9,81 м/сек.<sup>2</sup>, остальные обозначения по предыдущему.

Подставляя в уравнение  $C^2 = \frac{u^2}{R i}$

$u^2$  из уравнения (3) и  $R = \frac{d}{4}$ , получим:

$$C^2 = \frac{8g}{\sigma \lambda} = \frac{8g}{\sigma 0.02 (1 + \frac{1}{40d})} \dots \dots \dots (4)$$

т. е. С есть функция чистоты или шероховатости трубы и ее диаметра.

$$\text{По Маннингу} \quad \text{в)} \quad C = \frac{1}{n} R^{1/6} \dots \dots \dots (5)$$

(n — Куттеровский коэффициент шероховатости), величина С также является функцией коэффициента шероховатости и поперечных размеров потока.

**п. 3.** Таким образом, и для труб, и для каналов

$$Q = \omega C \sqrt{R} \sqrt{i} = K \sqrt{i}$$

$$\text{где} \quad K = \omega C \sqrt{R} \dots \dots \dots (6)$$

есть функции поперечных размеров потока и шероховатости его ложа.

$$\text{Формально} \quad K = \frac{Q}{\sqrt{i}}$$

<sup>1)</sup> См. Астров. Гидравлика, стр. 341, Unwin: A treatise on Hydraulic p. 235, или Мемуар Базена 1897 г. (Annals des Ponts et chaussées).

<sup>2)</sup> Б. А. Бахметев, „Гидравлика“ стр. 99.

<sup>3)</sup> А. Flamant, „Hydraulique“ p. 192.

Физическое значение  $K$  видно из рассмотрения размерности частей последнего равенства. Очевидно,  $K$  есть расход (объем в секунду) через поперечный профиль ( $\omega$ ) потока для данного коэффициента шероховатости при пьезометрическом уклоне ( $i$ ), равном единице.

Величина  $K$  характеризует влияние формы поперечного сечения потока жидкости и шероховатости его ложа на  $Q$ . А так как в равномерном движении, для которого написано соотношение (1), форма поперечного сечения потока не изменяется по длине, то величина  $K$  вполне характеризует влияние формы потока жидкости на расход.

Поэтому  $K = \omega C \sqrt{R}$  можно назвать расходной характеристикой формы потока жидкости.

В дальнейшем изложении мы сохраним за  $K$  короткое название „расходной характеристики“.

п. 4. Подобно понятию о  $K$  введем понятие скоростной характеристики формы потока жидкости или кратко: „скоростной характеристики“, обозначая ее буквой  $S$ .

Аналогично расходной характеристике

$$S = \frac{u}{\sqrt{i}} = C \sqrt{R} = \frac{K}{\omega} \quad \dots \dots \dots (7)$$

Очевидно,  $S$  — есть скорость в потоке, поперечные размеры которого характеризуются величиной  $R$ , а шероховатость коэффициентом  $\gamma$ , при пьезометрическом уклоне  $i$  равном единице.

п. 5. Для труб аналитическое выражение скоростной и расходной характеристик ( $S$  и  $K$ ) непосредственно через независимые аргументы — диаметр ( $d$ ) и коэффициент шероховатости (чистоту трубы) получается довольно просто. Например, оценивая потери по ф. Дарси, имеем: (4)

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\sigma \lambda}}; \quad \omega = \frac{\pi d^2}{4}; \quad R = \frac{d}{4},$$

следовательно:

$$S = C \sqrt{R} = \sqrt{\frac{2gd}{\sigma 0.02 (1 + \frac{1}{40d})}} = \approx \sqrt{\frac{198d}{\sigma (40d + 1)}} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$K = \omega S = 0.785 d^2 \sqrt{\frac{198d}{\sigma (40d + 1)}} = \approx \sqrt{\frac{155 d^3}{\sigma (40d + 1)}} \quad \dots \dots \dots (9)$$

Отметим, кстати, что при расчетах труб иногда удобнее пользоваться квадратами  $S$  и  $K$ .

$$S^2 = \approx \frac{39,24 d^2}{\sigma (40d + 1)} \times 10^3 \text{ (мет/сек)}^2 \quad \dots \dots \dots (8a)$$

$$K^2 = \frac{24,18 d^6}{\sigma (40d + 1)} \times 10^3 \text{ (мет}^3\text{/сек)}^2 \quad \dots \dots \dots (9a)$$

При малых диаметрах, часто расходы выражают в литрах (1 литр. = 0.001 м.<sup>3</sup> в сек.), а диаметры в дециметрах (0.1 м.),

тогда

$$S^2 = \frac{39,24 d^2}{\sigma (4d + 1)} \times 10^3 \text{ (дец/сек)}^2 = \frac{392,4 d^2}{\sigma (4d + 1)} \text{ (м/с)} \quad \dots \dots \dots (8b)$$

$$K^2 = \frac{24,18 d^6}{\sigma (4d + 1)} \times 10^3 \text{ (литр/сек)}^2 \quad \dots \dots \dots (9b)$$

Так как диаметры берутся не произвольные, а лишь имеющиеся в определенном сортаменте, то для любого сортамента *раз и навсегда* можно составить табличку значений  $S$  и  $K$ . По формулам (8-9 б) составлена нижеприводимая таблица.

Таблица скоростных и расходных характеристик для труб по ф. Дарси с учетом загрязнения по Зонне.

| Д диаметр  |                | Ч И С Т Ы Е Т Р У Б Ы |                  |                                  |                                  | Г Р Я З Н Ы Е Т Р У Б Ы |                  |                                  |                                  |
|------------|----------------|-----------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Дюй-<br>мы | Деци-<br>метры | S                     | K                | $K^2$                            | $\frac{1000}{K^2}$               | S                       | K                | $K^2$                            | $\frac{1000}{K^2}$               |
|            |                | мет./сек.             | лит./сек.        | (л/с) <sup>2</sup>               | (с/л) <sup>2</sup>               | мет./сек.               | лит./сек.        | (л/с) <sup>2</sup>               | (с/л) <sup>2</sup>               |
| 4          | 1,00           | 8,88                  | 69,7             | 4.860                            | 0,206                            | 6,30                    | 49,5             | 2.450                            | 0,408                            |
| 5          | 1,25           | 10,1                  | 124              | 15.400                           | 0,065                            | 7,21                    | 88,5             | 7.830                            | 0,128                            |
| 6          | 1,50           | 11,2                  | 199              | 39.400                           | 0,025                            | 8,14                    | 144              | 20.700                           | 0,048                            |
| 7          | 1,75           | 12,3                  | 295              | 86.800                           | 0,012                            | 9,01                    | 217              | 47.100                           | 0,021                            |
| 8          | 2,00           | 13,2                  | 415              | 172.000                          | 0,006                            | 9,85                    | 310              | 96.100                           | 0,012                            |
| 10         | 2,50           | 14,9                  | 731              | 535.000                          | 0,002                            | 11,3                    | 554              | 307.000                          | 0,003                            |
| 12         | 3,00           | 16,5                  | 1160             | 1.360.000                        | 0,00074                          | 12,7                    | 896              | 803.000                          | 0,00125                          |
| 16         | 4,00           | 19,2                  | 2420             | 5.850.000                        | 0,00017                          | 15,3                    | 1920             | 3.690.000                        | 0,00027                          |
| 20         | 5,00           | 21,6                  | 4240             | 18.000.000                       | 0,00006                          | 17,9                    | 3500             | 12.300.000                       | 0,00008                          |
|            | метры          |                       | кб.<br>мет./сек. | (м <sup>3</sup> /с) <sup>2</sup> | (с/м <sup>3</sup> ) <sup>2</sup> |                         | кб.<br>мет./сек. | (м <sup>3</sup> /с) <sup>2</sup> | (с/м <sup>3</sup> ) <sup>2</sup> |
| 24         | 0,6            | 23,8                  | 6,72             | 45,2                             | 229,12                           | 20,3                    | 5,74             | 33,0                             | 30,30                            |
| 28         | 0,7            | 25,7                  | 9,89             | 97,8                             | 10,22                            | 22,7                    | 8,75             | 76,6                             | 13,05                            |
| 32         | 0,8            | 27,6                  | 13,9             | 193                              | 5,18                             | 25,1                    | 12,6             | 159                              | 6,29                             |
| 36         | 0,9            | 29,3                  | 18,7             | 350                              | 2,86                             | 27,4                    | 17,4             | 303                              | 3,30                             |
| 40         | 1,0            | 30,6                  | 24,0             | 576                              | 1,74                             | 29,1                    | 22,9             | 524                              | 1,91                             |
| 48         | 1,2            | 34,0                  | 38,4             | 1470                             | 0,68                             | 32,9                    | 37,3             | 1390                             | 0,72                             |

Покажем на простом примере способ пользования этой таблицей.

Пусть требуется на секундный расход 300 литров подобрать диаметр прямой чистой трубы длиной  $L = 620$  метров, соединяющей 2 водоема с разностью горизонтов  $H = 0,80$  метр.

Решение. Пренебрегая потерями на вход и выход (и вообще местными потерями) считаем, что в установившемся равномерном движении весь напор  $H$  поглотится трением, тогда

$$i = \frac{L}{H} = \frac{8}{6200} = 0,00129$$

$$K = \frac{Q}{V \cdot i} = \frac{300}{0,036} = 8,340 \text{ литр./сек} = 8,34 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По таблице видим, что нужно брать  $d = 0,7$  м. при этом в трубе будет расход  $Q = K \sqrt{i} = 9,89 \times 0,036 = 0,356 \text{ м}^3/\text{с}$  а скорость  $u = S \sqrt{i} = 25,7 \times 0,036 = 0,93 \text{ м/с}$ .

Очевидно, подобные таблички легко составить и для других формул оценки сопротивлений на трение.

п. 6. Учитывая потери по формуле Маннинга (ф. 5), весьма удобной в приложениях, имеем:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} = C_0 R^{0,165}$$

Обычно принимают:

для чистых труб  $n = 0,011$ ;  $\frac{1}{n} = C_0 = 91$

для нормальных (средних по чистоте)  $n = 0,0125$ ;  $C_0 = 80$

для грязных  $n = 0,014$ ;  $C_0 = 70$

но так как  $R = \frac{d}{4}$ , то  $C = \frac{1}{n \sqrt[6]{4}} \sqrt[6]{d} = 0,794 C_0 d^{0,165}$

или  $C = C_d d^{0,165}$

$$S = C \sqrt{R} = 0,794 C_0 R^{2/3} = 0,794 \frac{C_0}{\sqrt[3]{16}} d^{0.67} = S_0 d^{0.67} \dots (10)$$

$$K = \omega S = 0.785 S_0 d^{2.67} = K_0 d^{2.67} \dots (11)$$

Величины  $S_0$  и  $K_0$  имеют вполне определенное физическое значение: это суть скоростная и расходная характеристики трубы с диаметром  $= 1$  метру при заданной чистоте трубы. Вычислив коэффициенты  $C_1 = C d^{0.165}$ ,  $S_0$  и  $K_0$ , получим (для метрового размера).

| №<br>№ | ДЛЯ ТРУБ           | n      | $C_1 = \frac{C}{d^{0.165}}$ | $S_0$ | $S_0^2$ | $K_0$ | $K_0^2$ |
|--------|--------------------|--------|-----------------------------|-------|---------|-------|---------|
| 1      | Чистых . . . . .   | 0.011  | 72,23                       | 36,12 | 1305    | 28,35 | 804     |
| 2      | Нормальных . . . . | 0.0125 | 63,50                       | 31,75 | 1008    | 24,92 | 621     |
| 3      | Грязных . . . . .  | 0,0143 | 55,56                       | 27,78 | 772     | 21,81 | 476     |

По сгруппированным здесь величинам легко составить нижеследующую расчетную таблицу (см. стр. 9). Выражения для характеристик  $S$  и  $K$  по Маннингу (ф. 10, 11) дают возможность просто составить исчерпывающую номограмму для расчета труб (См. номограмму № 1).

п. 7. Пользуясь приведенными таблицами или номограммой, свободно решаются основные типы задач на трубопроводы с постоянным диаметром.

| Тип задачи | Д А Н О                | НАЙТИ | РЕШЕНИЕ                                                             |
|------------|------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------|
| I.         | $d, i$ (или $h_w, L$ ) | $Q$   | По таблице для данного $d$ находим $K$ , затем:<br>$Q = K \sqrt{i}$ |
| II. а)     | $d, Q$                 | $i$   | $i = Q^2 / K^2$                                                     |
| III. б)    | $d, Q, L$              | $h_w$ | $h_w = L Q^2 / K^2$                                                 |
| а)         | $Q, i$                 | $d$   | $K^2 = Q^2 / i = L Q / h_w$                                         |
| б)         | $Q, h_w, L$            | $d$   | затем по таблице для полученного $K$ находим $d$                    |

Также легко решаются и вопросы расчета последовательного и параллельного соединения труб, расчет узлов и сетей. Однако, за недостатком места мы не будем останавливаться на этом, отсылая интересующихся к нашим лекциям по гидравлике.

п. 8. Приведем лишь беглое решение вопроса об экономическом расчете напорной линии.

В наиболее общем и наиболее частом случае водоснабжения, воду, прежде раздачи по трубам распределительной сети, приходится где-то захватывать и нагнетать насосами в напорные резервуары. Трубопровод от насосов до напорного резервуара называется нагнетательным или напорным. Расчет напорной линии представляет интересную гидравлическую задачу.

Пусть (см. черт. № 2) геометрическая высота подачи  $H_p$ , длина трубопровода  $L$ , диаметр  $D$  и расход  $Q$ .

ТАБЛИЦА СКОРОСТНЫХ И РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО ФОР. МАННИНГА.

| ДИАМЕТР                |                      | НОРМАЛЬНЫЕ $C_0 = 80$ |                  |                      |                      | Ч И С Т Ы Е $C_0 = 91$ |                  |                          |                      | Г Р Я З Н Ы Е $C_0 = 70$                                                       |           |                      |                      |
|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Диаметр<br>в<br>метрах | Длина<br>в<br>метрах | S                     | К                | $K^2 : 1000$         | $\frac{1000}{K^2}$   | S                      | К                | $K^2 : 1000$             | $\frac{1000}{K^2}$   | S                                                                              | К         | $K^2 : 1000$         | $\frac{1000}{K^2}$   |
|                        |                      | мет./сек.             | лит./сек.        | (л./с.) <sup>2</sup> | (с./л.) <sup>2</sup> | мет./сек.              | лит./сек.        | (мет./сек.) <sup>2</sup> | (с./л.) <sup>2</sup> | мет./сек.                                                                      | лит./сек. | (л./с.) <sup>2</sup> | (с./л.) <sup>2</sup> |
| 4                      | 1,00                 | 6,826                 | 53,6             | 2,83                 | 0,353                | 7,771                  | 61,0             | 3,72                     | 0,269                | 5,973                                                                          | 46,9      | 2,2                  | 0,455                |
| 5                      | 1,25                 | 7,930                 | 97,4             | 9,49                 | 0,105                | 9,030                  | 111              | 12,3                     | 0,0813               | 6,945                                                                          | 85,2      | 7,26                 | 0,138                |
| 6                      | 1,50                 | 8,954                 | 158              | 25                   | 0,0400               | 10,186                 | 180              | 32,4                     | 0,0309               | 7,834                                                                          | 138       | 19,0                 | 0,0526               |
| 7                      | 1,75                 | 9,938                 | 239              | 57                   | 0,0175               | 11,342                 | 273              | 74,5                     | 0,0134               | 8,695                                                                          | 209       | 44                   | 0,0224               |
| 8                      | 2,00                 | 10,859                | 341              | 116                  | 0,0086               | 12,353                 | 388              | 151                      | 0,0066               | 9,501                                                                          | 299       | 89                   | 0,0112               |
| 10                     | 2,50                 | 12,605                | 619              | 383                  | 0,0026               | 13,401                 | 658              | 433                      | 0,0023               | 11,029                                                                         | 541       | 293                  | 0,0034               |
| 12                     | 3,0                  | 14,224                | 1010             | 1020                 | 0,00098              | 16,218                 | 1150             | 1320                     | 0,00076              | 12,445                                                                         | 880       | 774                  | 0,0013               |
| 16                     | 4,0                  | 17,240                | 2170             | 4710                 | 0,00021              | 19,613                 | 2470             | 6100                     | 0,00016              | 15,085                                                                         | 1900      | 3610                 | 0,00028              |
| 20                     | 5,0                  | 20,003                | 3930             | 15400                | 0,00006              | 22,756                 | 4470             | 20000                    | 0,00005              | 17,501                                                                         | 3440      | 11800                | 0,00008              |
| метры                  |                      | кб.<br>мет./сек.      | кб.<br>мет./сек. | $K^2 (м.^3/с.)^2$    | $K^2 (с./кб. м.)^2$  | кб.<br>мет./сек.       | кб.<br>мет./сек. | $(кб. м./с.)^2 K^2$      | $(с./кб. м.)^2$      | кб. мет./сек. (кб. м./с.) <sup>2</sup> K <sup>2</sup> (с./кб. м.) <sup>2</sup> |           |                      |                      |
| 24                     | 0,6                  | 22,574                | 6,38             | 40,7                 | 24,6                 | 25,717                 | 7,27             | 52,9                     | 18,9                 | 19,744                                                                         | 5,58      | 31,1                 | 32,2                 |
| 28                     | 0,7                  | 25,019                | 9,63             | 92,7                 | 10,8                 | 28,535                 | 11,0             | 121                      | 8,3                  | 21,883                                                                         | 8,42      | 70,9                 | 14,1                 |
| 32                     | 0,8                  | 27,369                | 13,8             | 190                  | 5,3                  | 31,172                 | 15,7             | 246                      | 4,1                  | 23,938                                                                         | 12,0      | 144                  | 6,9                  |
| 36                     | 0,9                  | 29,591                | 1818             | 353                  | 2,8                  | 33,664                 | 21,4             | 458                      | 2,2                  | 25,882                                                                         | 16,5      | 272                  | 3,7                  |
| 40                     | 1,0                  | 31,750                | 24,9             | 620                  | 1,6                  | 36,120                 | 28,4             | 807                      | 1,2                  | 27,78                                                                          | 21,8      | 475                  | 2,1                  |
| 48                     | 1,2                  | 35,846                | 40,5             | 1640                 | 0,610                | 38,287                 | 43,3             | 1875                     | 0,533                | 31,364                                                                         | 35,5      | 1260                 | 0,794                |

Очевидно, для поднятия и прогона по трубе расхода  $Q$  насос должен развить такой напор, который преодолет все потери, т. е. насос должен поднимать заданный расход  $Q$  на высоту  $(H_p + h_w)$

Дополнительная  $(k H_p)$  высота качания  $h_w$ , как известно, связана с размерами трубопровода соотношением  $h_w = Q^2 \frac{L}{K^2}$  а величина  $K^2$ , примерно, пропорциональна  $D^5$ . Следовательно с увеличением диаметра  $D$  потери  $h_w$  быстро уменьшаются и вместе с этим уменьшается потребный расход энергии на приведение в движение насоса. Так что с этой точки зрения чем больше диаметр, тем выгоднее (дешевле) стоимость качки. Но с другой стороны увеличение диаметра (а след., веса) трубы влечет повышение начальной стоимости устройства. Так что с этой точки зрения малые диаметры выгоднее больших. Таким образом, между этими двумя противоположными тенденциями приходится выбирать „некоторое экономическое наивыгоднейшее“ решение.

Стоимость  $(p)$  погонной единицы трубы приблизительно можно считать пропорциональной диаметру  $D$ . Следовательно начальная (строительная) стоимость трубопровода длиной  $L$  будет:

$$P = p D L$$

*Примечание.* Это, вернее, лишь часть строительной стоимости, зависящая от диаметра; кроме „ $P$ “ в полную стоимость войдет плата за земляные работы (котлован. и проч.) и различные вспомогательные устройства, как контрольные колодцы, задвижки и т. п.; но все это можно считать одинаковым для труб разного диаметра, т. е. не зависящим от  $D$ , а потому, как видно будет из дальнейшего, расходы, не зависящие от  $D$ , на решение оказывать влияние не будут.

Пусть  $\delta$  обозначает ежегодную долю погашения первоначальной стоимости (амортизация, % на занятый капитал и проч.); тогда ежегодный расход  $\mathcal{E}_1$ , зависящий от диаметра и начальной стоимости, будет:  $\mathcal{E}_1 = \delta p D L$ . Ежегодная стоимость  $\mathcal{E}_2$  качки на преодоление потерь  $h_w$  составит таким образом:

Потребная теоретическая мощность для работы насоса (при подеме расхода  $Q$  на их высоту  $h_w$ )

$$N = \gamma \frac{Q h_w}{75} \text{ (лошадиных сил)}$$

Где  $Q$  — секундный расход воды в кубических метрах,  $h_w$  — потери в метрах и  $\gamma$  — вес одного куб. метра воды в килограммах (1000).

Индикаторная мощность  $N_i = N/\eta$ , где  $\eta$  — коэффициент полезного действия

$$N_i = \gamma \frac{Q h_w}{75 \eta}$$

Если насос работает в год  $n$  часов и стоимость одной лошадиной силы в час =  $r$ , то

$$\mathcal{E}_2 = an N_i = \gamma \frac{an}{\eta} \frac{Q h_w}{75} = \gamma \frac{an}{\eta} \frac{Q^3 L}{75 K^2}$$

Общий ежегодный (эксплуатационный) расход ( $\mathcal{E}$ ) выразится формулой

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = \delta p D L + \gamma \frac{an}{\eta} \frac{Q^3 L}{75 K^2}$$

или на единицу длины трубы

$$\frac{\mathcal{E}}{L} = \mathcal{E}_0 = \delta p D + \gamma \frac{an}{\eta} \frac{Q^3}{75 K^2}$$

Выразив ( $K^2$ ), в зависимости от расчетной формулы, в функции от  $D$ , получим  $\Xi_0 = f(D)$ . Очевидно, для нахождения минимума  $\Xi_0$  достаточно решить относительно  $D$  уравнение

$$\frac{d \Xi_0}{d D} = \frac{d f(D)}{d D} = 0.$$

По Маннингу  $K^2 = K_0^2 D^{5.34}$ , тогда

$$\Xi_0 = \hat{\epsilon} p D + \gamma \frac{a n}{\eta} \frac{Q^3}{75 K_0^2 D^{5.34}}$$

след.

$$\frac{d \Xi_0}{d D} = 0 = \hat{\epsilon} p - \frac{5.34}{75} \gamma \frac{a n}{\eta} \frac{Q^3}{K^2 D^{6.34}}$$

откуда

$$D^{6.34} = \frac{5.34}{75} \gamma \frac{a n}{\hat{\epsilon} p \eta} \frac{Q^3}{K_0^2}$$

Принимая при  $Q$  и  $D$  в метрах  $\gamma = 1000$  кгр.;  $\eta = 0.75$  и  $K_0^2$  (для нормальных бывших в деле труб)  $= 621$ , получим:

$$D^{6.34} = \frac{5340}{75 \times 0.75 \times 621} \frac{a n}{\hat{\epsilon} p} Q^3 = \approx 0.153 \frac{a n}{\hat{\epsilon} p} Q^3.$$

Окончательно

$$D = \sqrt[6.34]{0.153 \frac{a}{\hat{\epsilon} p} Q^3 n} = \sqrt[6.34]{\frac{0.153 a}{\hat{\epsilon} p}} \sqrt[6.34]{Q^3 n} \dots (*)$$

Если принять, в среднем,  $\hat{\epsilon} = 10 \%$ , то первый корень можно представить так:

$$R_1 = \sqrt[6.34]{1.53 \frac{a}{p}},$$

т. е.  $R_1$  зависит исключительно от отношения стоимости 1 лош. силы часа ( $a$ ) к стоимости погонного метра трубы с диаметром  $= 1$  мт. Причем, так как это отношение входит под корень большой степени (6,34-ой), то влияние изменений ( $\frac{a}{p}$ ) на окончательный результат невелико.

Действительно, пределы изменения « $p$ » можно считать от 40 до 80 рублей; пределы же ( $a$ ) от 0,04 до 0,08 р. Таким образом, отношение  $\frac{a}{p}$  изменяется от  $\frac{1}{500}$  до  $\frac{1}{2000}$ ; соответственно этим значениям  $R_1$  получает величины 0,41 и 0,322, т. е. в среднем  $R_1 = \approx 0.36$ ; чему соответствует отношение  $\frac{a}{p} = 1:1000$ . После введения вместо  $R_1$  среднего значения, получим для диаметра формулу

$$D = 0.36 Q^{0.46} n^{0.158}$$

$$\text{или для первого приближения } D = 0.36 \sqrt{Q} \sqrt[3]{n}$$

Часто можно бывает ограничиться этим приближением.

Если же необходимо просчитать подробнее, то для диаметров ближайших к найденному приближенно, вычисляют ( $\mathcal{E}_0$ ) и получают минимум.

Форма таблицы для вычислений.

| D | K <sup>2</sup> | $\mathcal{E}_1 = \delta p \cdot D$ | $\mathcal{E}_2$ | $\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$ | Примечание: для конкретных условий задачи<br>$\delta p = \text{const}$<br>$\gamma \frac{a n}{75 n} Q^3 = \text{const}$ |
|---|----------------|------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                |                                    |                 |                                                 |                                                                                                                        |

Или, пользуясь логарифмами, производят вычисления по ф. (\*).

Примечание: При более точном решении нужно сразу составлять  $\mathcal{E}_0$ , учитывая по сортаменту вес труб, а след. и их стоимость. Тогда форма таблички для подсчетов будет другая.

Приближенный подбор диаметра можно еще произвести по средней скорости. Действительно

$$u = \frac{4 Q}{\pi D^2} = \frac{4}{\pi (0.36)^2 \sqrt[3]{n}} = \frac{1.27}{0.13 \sqrt[3]{n}}$$

$$\text{Откуда } u = \approx \frac{10}{\sqrt[3]{n}} \text{ (экономическая скорость).}$$

При непрерывной работе в год (6760 часов) экономическая скорость  $u = \approx 0,50$  м/с. Отметим, между прочим, что Фляман при несколько ином ходе решения (и для французского соотношения цен) получил  $u = 0,55$  м/сек.\*)

Пр и м е р: Насосная станция работает 20 часов в сутки, при чем в течение 12-ти часов подает 17.500 вед. в час, а в течение 8 час. по 30.000 ведер в час. Коэффициент полезного действия машинной установки  $= \eta = 0.75$ ; стоимость одной лошадиной силы  $x$  в час  $a = 0.05$  р. стоимость 1 п. метр. трубы диаметром в 1 метр  $= 80$  руб. (или 2 рубля за пуд чугуна); амортизация составляет  $\delta = 10\%$  строительной стоимости. Обычно еще дается геометрическая высота качания и длина трубопровода, но, как видно, эти величины не влияют на выбор диаметра, поэтому их не приводим).

Р е ш е н и е: Назовем  $Q_1$  секундный расход в кубич. метрах при подаче 17.500 ведер в час, а  $Q_2$  расход при подаче 30.000 ведер в час.; — через  $n_1$  число часов работы станции в год с расходом  $Q_1$  (очевидно  $n_1 = 365 \times 12 = 4380$ ) и через  $n_2$  число часов работы станции в год с расходом  $Q_2$  ( $n_2 = 365 \times 8 = 2920$ ). Потеря напора на 1 м. трубы с диаметром  $D$  будет  $h_{w1} = i \frac{Q_1^2}{K^2}$ ; мощность в лош. силах, необходимая для преодоления напора  $h_{w1}$  —:

$$N_1 = \gamma \frac{h_w Q}{75 \eta} = \frac{1000}{75 \eta} h_w Q = \frac{13,33}{\eta} \frac{Q^3}{K^2}$$

Годовая стоимость нагнетания на высоту  $h_{w1}$  расхода  $Q_1$  выразится формулой

$$\mathcal{E}'_2 = \frac{13,33}{\eta} a n_1 \frac{Q_1^3}{K^2} = 17,8 a n_1 \frac{Q_1^3}{K^2}$$

Аналогично годовая стоимость нагнетания на высоту  $h_{w2}$  расхода  $Q_2$  будет  $\mathcal{E}''_2 = 17,8 a n_2 \frac{Q_2^3}{K^2}$

Ежегодный эксплуатационный расход на преодоление «потерь» составит:

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}'_2 + \mathcal{E}''_2 = 17,8 \frac{a}{K^2} [Q_1^3 n_1 + Q_2^3 n_2]$$

Ежегодная амортизация и проч. на один пог. метр трубы  $\mathcal{E}_1 = \delta p \cdot D$ . Таким образом, общий ежегодный эксплуатационный расход (на 1 пог. мет. трубы)

$$\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = \delta p \cdot D + 17,8 \frac{a}{K^2} [Q_1^3 n_1 + Q_2^3 n_2]$$

Выражаем ( $K^2$ ) через диаметр  $D$  по ф. Маннинга для нормальных труб  $K^2 = 621 D^{5,34}$ . Подставляем ( $K^2$ ) в последнее выражение и решаем относительно  $D$  ур-ие

$$\frac{d \mathcal{E}_0}{d D} = 0 = \delta p - 5,34 \frac{17,8 a}{K_0^{2,34} D^{6,34}} [Q_1^3 n_1 + Q_2^3 n_2] - \delta p - \frac{95 a}{K_0^{2,34} D^{6,34}} [Q_1^3 n_1 + Q_2^3 n_2]$$

откуда

$$D^{6,34} = \frac{95 a}{\delta p K_0^{2,34}} [Q_1^3 n_1 + Q_2^3 n_2] = \frac{95 a}{\delta p} [i_{01} Q_1 n_1 + i_{02} Q_2 n_2]$$

где  $i_{01}$  есть пьезометрический уклон (или потеря на 1 м. трубы) при прогоне заданного расхода  $Q_1$  через трубу с диам.  $D = 1$  метр.

\*) Flamant p. 180.

далее:  $D = \sqrt[6.34]{\frac{95a}{\delta K^2 p}} \sqrt[6.34]{Q_1^3 n_1 + Q_2^3 n_2} = \sqrt[6.34]{1.53 \frac{5}{8000}} \sqrt[6.34]{Q_1^3 n_1 + Q_2^3 n_2}$

Вычисления  $\sqrt[6.34]{\frac{1.53}{160}} = \sqrt[6.34]{\frac{15.3}{16000}} \approx \frac{1.54}{4.62} = 0.333$

$Q_1 = \frac{17500}{3600} 12.3 = 59.8 \text{ метров/с} \approx 0.060 \text{ кб. мет. в сек.}$

$Q_2 = \frac{30000}{3600} 12.3 = 102.3 \text{ лит/сек.} \approx 0.100 \text{ кб. мет. в сек.}$

$$\left. \begin{aligned} Q_1^3 n_1 &= \frac{6^3}{100^3} 4380 = 0.966 \\ Q_2^3 n_2 &= \frac{1}{1000} 2920 = 2.920 \end{aligned} \right\} Q_1^3 n_1 + Q_2^3 n_2 = 3.886$$

$\sqrt[6.34]{3.89} = 1.24$ . Таким обр.  $D = 0.33 \times 1.24 \approx 0.40 \text{ мет}$

Для приближенного решения можно было бы ограничиться лишь вычислением корня из суммы  $[Q_1^3 n_1 + Q_2^3 n_2]$  и помножить результат на 0.36 (получится  $D = 0.446 \text{ м.}$ ). Если взять  $D = 0.4 \text{ м.} = 4 \text{ дециметра}$ , то при  $Q_1$  (60 лит.) будет скорость

$u_1 = \frac{60}{12.6} = 4.77 \text{ дец./с.} \approx 0.48 \text{ мет/сек.}$

и при  $Q_2$  (102 л.).  $u_2 = \frac{102}{126} = 8.1 \text{ ,,} \approx 0.81 \text{ ,,}$

Приведем еще решение этой же задачи подбором. Вопрос сводится к вычислению выражения

$$\begin{aligned} \Theta_0 &= \delta p D + 17.8 a \left( \frac{Q_1^{\frac{1}{2}}}{K_1} Q_1 n_1 + \frac{Q_2^{\frac{1}{2}}}{K_2} Q_2 n_2 \right) = \\ &= \delta p D + 17.8 a (h_{w1} Q_1 n_1 + h_{w2} Q_2 n_2). \end{aligned}$$

Вычислим постоянные коэффициенты.

$\delta p = 0.1 \times 80 = 8$      $17.8 a = 17.8 \times 0.05 = 0.890$

$Q_1 n_1 = 0.06 \times 4380 = 262.8 \approx 263$

$Q_2 n_2 = 0.1 \times 2920 = 292.0$

$Q^{\frac{1}{2}} = 60^{\frac{1}{2}} = 3600$  (в литрах<sup>2</sup>, т. к. по таблицам "К" в литрах)

$Q^{\frac{1}{2}} = 100^{\frac{1}{2}} = 10000$ , тогда

$$\begin{aligned} \Theta_0 &= 8D + 0.89 \left[ \frac{3600}{K^2} 263 + \frac{1000}{K^2} 292 \right] = \\ &= 8D + \frac{3600}{K^2} 234 + \frac{1000}{K^2} 260. \end{aligned}$$

Вычисления группируем в табличке

| D мет. | $K^2 \left( \frac{\text{лит.}}{\text{с}} \right)$ | $h_{w1} = \frac{3600}{K^2}$ мет. | $h_{w2} = \frac{1000}{K^2}$ мет. | 8 D руб. | 234 $h_{w1}$ руб. | 260 $h_{w2}$ руб. | $\Theta_0$ руб. |
|--------|---------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 0.30   | 1000000                                           | 0.003600                         | 0.010000                         | 2.40     | 0.84              | 2.60              | 5.84            |
| 0.40   | 4620000                                           | 0.000780                         | 0.002160                         | 3.20     | 0.18              | 0.56              | 3.94            |
| 0.50   | 14900000                                          | 0.000242                         | 0.000672                         | 4.00     | 0.06              | 0.17              | 4.23            |
| 0.60   | 40300000                                          | 0.000                            | —                                | 4.80     | —                 | —                 | 5.0             |

Табличка показывает, что минимум эксплуатационных расходов получается при  $D = 0.40$ . См. черт. № 3)

п. 9. Обратимся теперь к открытым руслам. Разберем лишь случай правильных трапецеидальных каналов. Сохраняя прежние обозначения и иллюстрируя их чертежем ( № 4 ), имеем:

$$\omega = bh + mh^2 = h^2 (\beta + m) = h^2 \omega_e \quad \dots \dots \dots (12)$$

где  $\beta = b/h$ ;  $\omega_e$  — площадь подобная  $\omega$  при  $h = 1$  мт.

$$\chi = \text{смоченный периметр } b + 2h \sqrt{1 + m^2} = \\ = h (\beta + 2\sqrt{1 + m^2}) = h (\beta + 2r) = h \chi_e$$

где  $r = \sqrt{1 + m^2}$

$\chi_e$  — смоченный периметр площади подобной заданной — при  $h = 1$  метру.

$$R = \frac{\omega}{\chi} = h \frac{\omega_e}{\chi_e} = h R_e \quad \dots \dots \dots (13)$$

$R_e$  — гидравлический радиус сечения подобному данному при  $h = 1$  метру.

$$C = (\text{по Базену}) = \frac{87 \sqrt{R}}{\sqrt{R} + \chi} = \frac{87 \sqrt{h}}{\sqrt{h} + \chi/\sqrt{R_e}} \\ = \frac{87 R}{\sqrt{R} + \chi} = \frac{87 h R_e}{\sqrt{h} \sqrt{R_e} + \chi} \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$K = \omega C \sqrt{R} = \frac{87 h^3 \omega_e R_e}{\sqrt{h} \sqrt{R_e} + \chi} \quad \dots \dots \dots (15)$$

Из написанных равенств видно, что аналитическое выражение скоростной и расходной характеристик для каналов, значительно более громоздко и сложно по виду сравнительно с трубами, где для определенной степени чистоты трубы  $S$  и  $K$  получились в функции от одного диаметра. Это и понятно, так как в трапецеидальном русле форма потока определяется тремя независимыми переменными: шириной по дну „ $b$ “ наклоном боковых откосов „ $m$ “ и глубиной „ $h$ “. Удобство введения в расчеты величин  $S$  и  $K$  настолько значительно, что несмотря на громоздкость, стоило бы составить ряд таблиц для  $S$  и  $K$ . Однако, лучше сделать какие-либо графики для быстрого определения характеристик.

п. 10. Нами построен ряд номограмм, дающих все необходимое для расчетов с той же полнотой, как и номограммы для расчета труб <sup>1)</sup>. Для удобства переходов от одних величин к другим составлена общая сводная номограмма немножко сложная по виду, но простая по сути работы с ней (см. чер. № 5).

Не вдаваясь в описание построения сводной номограммы, поясним способ пользования ею.

Номограмма имеет 10 основных шкал:

$h, b, \beta, \omega, R, S, K, i_q, i_u, Q, U.$

и 3 вспомогательных шкалы с сетками  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3.$

Все основные шкалы градуированы в пределах практически встречающихся изменений соответствующих величин.

При работе с номограммой необходимо помнить, что соответственно основным уравнениям нижеследующие тройки переменных величин лежат на одной прямой.

|                        |                    |                                      |
|------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| а) $h, b, \beta$       | соответств. ур-нию | $\beta = b/h$                        |
| б) $h, \Phi_1, \omega$ | „ „                | $\omega = h^2 \omega_e = h^2 \Phi_1$ |
| в) $h, \Phi_2, R$      | „ „                | $R = h R_e = h \Phi_2$               |
| г) $S, \omega, K$      | „ „                | $K = \omega S$                       |
| д) $K, i_q, Q$         | „ „                | $Q = K \sqrt{i_q}$                   |
| е) $S, i_u, U$         | „ „                | $U = S \sqrt{i_u}$                   |

<sup>1)</sup> См. номограммы в конце.

Пример 1. (Прямая задача). Дано:  $b$ ,  $m$ ,  $h$ ,  $\gamma$ ,  $i$ . Требуется определить расход  $Q$  и среднюю скорость  $U$ .

1. Соединяем  $h$  и  $b$  прямой на продолжении которой читаем  $\beta$ , (Запоминаем и записываем).
2. На сетке  $\phi_1$  поднимаемся по кривой полученного  $\beta$  до пересечения с вертикалью за данного „ $m$ “, от точки пересечения выходим по горизонтали (влево) на шкалу  $\omega_e$  (или  $\beta$ ).
3. Соединяем последнюю точку с заданным  $h$  и читаем на шкале  $\omega$  площадь  $\omega$  (отмечаем и записываем).
4. На сетке  $\phi_2$  идем по вертикали заданного  $m$  до пересечения с кривой  $\beta$  ( $\beta$  получено в № 1); от этой точки по горизонтали выходим на опору  $R_e$ .
5. Соединяем заданное  $h$  с  $R_e$  и на продолжении читаем  $R$ .
6. На сетке  $\phi_3$  по полученному  $R$  и заданному  $\gamma$  находим (двигаясь от пересечения по горизонтали к  $S$ ) значение  $S$ .
7. Соединяя  $S$  с  $\omega$ , полученной в № 3, получаем  $K$ .
8. Соединяя  $K$  и заданное  $i_q$ , читаем  $Q$ .
9. Соединяя  $S$  и  $i_u$  получаем  $U$ .

Таким образом искомые величины найдены.

Пример 2. (обратная задача). Дано  $Q$ ,  $i$ ,  $m$ ,  $\gamma$  и допускаемая скорость  $U$ .

Требуется определить размеры канала.

1. По данным  $U$  и  $i$  находим  $S$  (проводя прямую через  $u$  и  $i$ ).
2. По сетке  $\phi_3$ , имея  $S$  и заданное  $\gamma$  находим  $R$ .
3. Затем, задаваясь  $\beta$  при данном  $m$  соединяем прямой полученное  $R$  и точку шкалы  $R_e$ , соответствующую точке пересечения  $m$  и кр.  $\beta$  на сетке  $\phi_2$ , после чего читаем „ $h$ “.

С другой стороны:

- а) по данным  $Q$  и  $i_q$  находим  $K$ ,
- б) по  $K$  и  $S$  находим  $\omega$ ,
- в) по  $\omega$ ,  $m$  и  $\beta$  (см. № 3) определяем  $h$ .

$h$  по № 3 и № В должно быть одинаковым; если это не так, то нужно изменять  $\beta$  до тех пор, пока не достигнем  $h_a = h_b$ . В этом подборе и заключается решение задачи.

Небольшая практика работы с номограммой дает полную ориентировку в способах пользования графиком \*).

Всем, кому приходилось сталкиваться с массовым расчетом каналов (расчет сети) будут понятны преимущества и удобства работы со сводной номограммой и, тем самым, — ценность такого графика.

**п. II.** Точность сводной номограммы не меньше, чем в диаграммах Бектея (Buckley, Irr. pocket book p. 121—123) или графиках В. А. Васильева (1914 г.). Благодаря логарифмическим масштабам всех осей, относительная точность не зависит от порядка величины переменной.

Величину погрешности можно определить из таких соображений. Погрешности бывают двух родов: а) не зависящие от работающего с графиком (как-то, неточность при черчении, изменении площади бумаги чертежа и т. п.) б) погрешности от неточных установок линеек и неточных отсчетов. Первые — при тщательном исполнении сравнительно невелики, поэтому остановимся лишь на вторых. В целях их уменьшения приходится рекомендовать проведение прямых линий, делать накладыванием на график полоски из прозрачного вещества (напр., целюлойдной линейки, куска стекла, кальки и т. п.) с прочерченной на нижней стороне этой полоски тонкой прямой линией. Допустим, что суммарная погрешность от установки прямой и от отсчета будет 0,2 мм. при каждом приеме (обычно считают ее 0,1 мм) и пусть все погрешности будут одного знака; тогда 8 приемов (наибольшее число приемов  $Q$  в прямой задаче п. 10) дадут погрешность в 1,6 мм., что при масштабе  $Q = 4$  см даст (наибольшую величину отклонения) вместо 10 (или 100, 1000 и т. п.) 9,2 или 10,4, т. е. относительная ошибка получается ок. 8%. Если к этому еще прибавить 2—3% на погрешности первого рода, то в результате возможное наибольшее расхождение чисел, полученных вычислением и по номограмме не превзойдет 11%. Конечно, эта цифра — большая и может несколько напугать новичков в гидротехнике; опытным же лицам нет надобности доказывать, что если бы общая погрешность (в максимуме) достигала даже 10%, то и тогда номограмма имела бы основание существовать. Более точных результатов не имеет смысла добиваться потому, что величины  $h$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $\gamma$  берутся с относительной погрешностью не менее 0.01. Если же предположить, что эти величины имеют одинаковую относительную погрешность, равную 0.01, то формула расхода даст относительную погрешность ок. 10—11%.

\*) Приводимая схема номограммы прилагается для иллюстрации, а не в качестве расчетного графика.

п. 12. Проф. Б. А. Бахметев, строя логарифмические анаморфозы кривых  $K = f(b, m, h, \gamma)$  для определенных  $b, m, \gamma$  в координатах  $(K)$  и  $(h)$ , (т. е.  $\lg K$  и  $\lg h$ ), подметил интересное соотношение, что расходная характеристика  $K$ , при постоянных  $b, m, \gamma$ , т. е. при заданном сечении русла и его шероховатости, пропорциональна одной и той же степени ( $p$ ) наполнения или глубины ( $h$ ) в канале, т. е.

$$K = K_c h^p \quad \dots \dots \dots (16)$$

Очевидно,  $K_c$  есть расходная характеристика рассматриваемого профиля русла при  $h = 1$  метр., следовательно

$$K_c = f(b, m, \gamma)$$

$p$  — есть некоторая (неизвестная) функция от независимых переменных.

Значения  $K_c$  легко вычисляются для каждого отдельного случая (могут быть составлены численные таблицы, или могут быть получены по вышеописанной сводной номограмме); величину же показателя ( $p$ ) рекомендовалось получить построением упомянутой логарифмической анаморфозы (для каждого данного профиля русла).

Представление характеристик  $S$  и  $K$  формулами показательного вида, подобно ф. 16, чрезвычайно удобно в приложениях. Такие формулы легко поддаются логарифмированию, графическому изображению и оказываются весьма ценными в некоторых исследованиях. Поэтому вопрос о приведении выражения характеристик  $S$  и  $K$  к показательному виду заслуживает подробного освещения.

п. 13. Начнем с простого. По Маннингу  $C = \frac{1}{n} R^{1/6} = C_0 R^{0.17}$ ; но по ф. (13)  $R = R_e h$ , где  $R_e$  есть гидравлический радиус сечения канала, подобного данному при  $h = 1$ . То есть, если данный канал характеризуется величинами  $h, b, m, \gamma$  то подобный канал имеет:

$$h_e = 1; b_e = b/h = \beta; m_e = m; \gamma_e = \gamma$$

Таким образом  $C = C_0 R_e^{0.17} h^{0.17}$ , а следовательно,

$$S = C \sqrt{R} = C_0 R_e^{0.67} h^{0.67} = S_e h^{0.67} \quad \dots \dots \dots (17)$$

По ф.ф. 12, 15 и 17 получим

$$K = \omega S = \omega_e S_e h^{2.67} = K_e h^{2.67} \quad \dots \dots \dots (18)$$

В последних формулах  $S_e$  и  $K_e$  суть характеристики для канала, подобного данному при  $h = 1$  метр.

Формула 18 по виду похожа на ф. 16, но между ними имеется существенная разница в том, что при изменениях  $h$  в заданном профиле канала и шероховатости ( $b, m, \gamma$ ) —  $K_c = \text{const.}$  и не зависит от  $h$ , тогда как  $K_e = f(\beta, m, \gamma) = f\left(\frac{b}{h}, m, \gamma\right)$  т. е. не остается постоянным, а является функцией от  $\beta = \frac{b}{h}$  и тем самым от  $h$ . Для быстрого определения  $S_e$  и  $K_e$  легко построить графики по формулам

$$S_e = C_0 R_e^{0.67} = C_0 \left( \frac{\beta + m}{\beta + 2r} \right)^{0.67}$$

$$K_e = C_0 \omega_e R_e^{2.67} = C_0 \frac{(\beta + m)^{1.67}}{(\beta + 2r)^{0.67}}$$

или составить таблицы. Несмотря на некоторое неудобство, связанное с оперированием переменными характеристиками  $S_e, K_e$ , формулы 17, 18 могут оказать большие услуги в практических приложениях и даже позволяют решать в общем виде ряд таких задач, которые до сих пор решались подбором (ощупью).

п. 14. В качестве одного из примеров решения подобного рода зададим схему отыскания уклона  $i_k$  ирригационной магистрали при условии получения наименьшего объема канала.

Как известно, задача ставится так (см. черт. № 6) даны: уклон реки  $i_0$ ; отметка горизонта воды в реке в точ. С и в канале в точ. В, или превышение  $H_0$ ; расход в канале  $Q$ ; коэффициент шероховатости  $\gamma$ .

Требуется определить — какой нужно дать уклон  $i_k$  каналу с тем, чтобы объем земляных работ был наименьший.

Обозначим  $L$  — длину канала,  $\omega$  — площадь живого сечения и  $W_0$  — об'ем. Очевидно, при минимуме  $W_0$  произведение  $L\omega = W$  будет также наименьшим.

Из чертежа и по предыдущим формулам имеем:

$$L = \frac{H_0}{i_0 - i_k}$$

$$\omega = \frac{K}{S} = h^2 \omega_e = h^3 \frac{K_e}{S_e}$$

$$i_k = \frac{Q^2}{K^2} = \frac{Q^2}{K_e^2 h^{5.34}}$$

откуда

$$W = L \omega = \frac{H_0 K^2}{i_0 K^2 - Q^2} \times \frac{K}{S} = \frac{H_0 K^3}{(i_0 K^2 - Q^2) S}$$

или

$$W = \frac{H_0 K_e h^{8.01}}{(i_0 K_e^2 h^{5.34} - Q^2) S_e h^{0.67}} = \frac{H_0 K_e^3 h^{7.34}}{(i_0 K_e^2 h^{5.34} - Q^2) S_e}, \quad (*)$$

т. е.  $w = \varphi (H_0, i_0, Q, \beta, h, m, \gamma)$ . Но так как все величины, кроме  $\beta$  и  $h$ , заданы, то  $w = f(\beta, h)$ . Задавая по каким-либо соображениям  $\beta$ , величины  $S_e$  и  $K_e$  будут определенными (постоянными), тогда вопрос сводится к решению относительно  $h$  уравнения  $\frac{\partial w}{\partial h} = 0$ .

Можно решить задачу и в общем виде, считая величины  $h, m, \beta$  за независимые переменные.

Действительно, имея в виду, что

$$S_e = C_0 \left( \frac{\beta + m}{\beta + 2r} \right)^{0.67}$$

и

$$K_e = S_e (\beta + m),$$

уравнение (\*) (после алгебраических преобразований) можно привести к виду

$$W = \frac{C_0^3 H_0 h^{7.34} (\beta + m)^{4.34}}{C_0^2 i_0 h^{5.34} (\beta + m)^{3.34} - Q^2 (\beta + 2r)^{1.34}}$$

Затем, деля числителя и знаменателя на  $Q^2$  и обозначая

$$\frac{C_0^2 i_0}{Q^2} \quad \text{через } «a»,$$

получим

$$F = \frac{W}{C_0^2 H_0 : Q^2} = \frac{h^{7.34} (\beta + m)^{4.34}}{a h^{5.34} (\beta + m)^{3.34} - (\beta + 2r)^{1.34}}$$

Для отыскания минимума (F) остается решить систему уравнений

$$\frac{\partial F}{\partial h} = 0; \frac{\partial F}{\partial m} = 0; \frac{\partial F}{\partial \beta} = 0.$$

Не загромождая изложение математическими выкладками, приведем основные ответы.

А. Боковой откос «m» получается постоянным и равным  $(1 : \sqrt{3})$ ,

$$\text{т. е. } m = \frac{1}{\sqrt{3}} (= \operatorname{ctg} \varphi)$$

Следовательно, в изложенной постановке, наивыгоднейший угол ( $\varphi$ ) наклона бокового откоса к горизонту получается равным  $60^\circ$  (примерно  $2/3 : 1$ ).

Б. Относительная ширина « $\beta$ » получается также постоянной

$$\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15.$$

Легко видеть, что получился гидравлически наивыгоднейший профиль; действительно, при этих ответах:

$$\omega_e = \beta + m = \sqrt{3}; \quad \chi_e = \beta + 2m = 2\sqrt{3}; \quad \text{след. } R_e = \frac{1}{2}$$

и потому  $R = hR_e = \frac{1}{2}h$  (а это и есть свойство гидравлически наивыгоднейшего профиля).

В. Глубина «h» через данные условия задачи выражается следующей формулой:

$$h = 1,23 \left[ \frac{Q}{C_0 \sqrt{i_0}} \right]^{0,375}$$

Г. Ширина по дну «b» получается по формуле

$$b = \beta \times h = 1,42 \left[ \frac{Q}{C_0 \sqrt{i_0}} \right]^{0,375}$$

Д. Площадь живого сечения « $\omega$ »

$$\omega = \omega_e h^2 = 2,62 \left[ \frac{Q}{C_0 \sqrt{i_0}} \right]^{0,75}$$

Е. Скоростная характеристика «S»

$$S = S_e h^{0,67} = C_0 R_e^{0,67} h^{0,67} = 0,725 C_0 \left[ \frac{Q}{C_0 \sqrt{i_0}} \right]^{0,25}$$

Ж. Расходная характеристика «K»

$$K = S\omega = 1,90 \frac{Q}{\sqrt{i_0}}$$

З. Уклон канала « $i_k$ »

$$i_k = \frac{Q^2}{K^2} = 0,278 i_0$$

п. 15. Если брать выражение для S по Базену, то характеристики S и K не получаются так просто, в показательном виде, как это мы имели в п. 13. Однако, формулу Базена с достаточной точностью можно представить в таком виде:

$$C = \frac{87 \sqrt{R}}{\sqrt{R} + \gamma} - C_0 R^z \quad (19)$$

где  $C_0$  и  $z$  суть функции коэффициента шероховатости. В самом деле, построив логарифмические анаморфозы (см. чер. № 7) кривых

$$C = \phi(R, \gamma = \text{const})$$

в координатах  $y = \lg C$  и  $x = \lg R$ , видим, что эти кривые весьма мало отличаются от прямых. Заменяя кривые прямыми, будем иметь для последних уравнения в общем виде  $y = a + z x$ . А так как у нас  $y = \lg C$ ,  $x = \lg R$ , то, полагая  $a = \lg C_0$ , получим:

$$\lg C = \lg C_0 + z \lg R$$

или

$$C = C_0 R^z$$

при чем для каждого  $\gamma$  по чертежу получаются постоянные коэффициенты  $C_0$  и  $z$ \*) Проследив изменение  $C_0$  и  $z$  в зависимости от  $\gamma$ , путем построения отдельных графиков (№ 7-а), мы нашли для них следующие приближенные выражения:

$$C_0 = \frac{86,5}{1 + \gamma}$$

$$z = 0.245 \gamma^{0.68}$$

После этого легко получить  $S$  и  $K$  в показательном виде подобно ф. 17 и 18. Действительно по ф. ф. = 12, 13, 14 и 15!

$$S = C R^{0.5} = C_0 R^{0.5+z} = C_0 R^{0.5+z} h^{0.5+z} = S_e h^{0.5+z}$$

$$K = \omega S = h^2 \omega_e S_e h^{0.5+z} = K_e h^{2.5+z}$$

или обозначая  $2.5 + z = q$

$$S = S_e h^{q-2} \quad (20)$$

$$K = K_e h^q \quad (21)$$

где

$$S_e = C_0 \left( \frac{\beta + m}{\beta + 2r} \right)^{q-2}$$

$$K_e = C_0 \frac{(\beta + m)^{q-1}}{(\beta + 2r)^{q-2}}$$

Изменения и величины коэффициентов, зависящих от  $\gamma$ , видим из следующей таблицы:

| $\gamma$ | $C_0$ | $z$   | $q$   | $q-2 = z+0.5$ | $t = \frac{1}{q-2}$ | Примечания |
|----------|-------|-------|-------|---------------|---------------------|------------|
| 0,06     | 81,7  | 0,031 | 2,531 | 0,531         | 1,88                |            |
| 0,16     | 74,5  | 0,072 | 2,572 | 0,572         | 1,75                |            |
| 0,30     | 66,5  | 0,121 | 2,621 | 0,621         | 1,61                |            |
| 0,46     | 59,1  | 0,152 | 2,652 | 0,652         | 1,51                |            |
| 0,85     | 46,6  | 0,234 | 2,734 | 0,734         | 1,36                |            |
| 1,00     | 42,8  | 0,254 | 2,754 | 0,754         | 1,32                |            |
| 1,30     | 37,4  | 0,286 | 2,786 | 0,786         | 1,27                |            |
| 1,75     | 31,3  | 0,320 | 2,820 | 0,820         | 1,22                |            |

п. 16. Приведем еще пример решения в общем виде задачи, которая также до сих пор решалась подбором. Дадим схему экономического расчета утилизационного канала в случае полного использования питающей речки (чер. № 8).

В основных чертах постановка и решение задачи таковы. Даны: расход  $Q$ ; наклон боковых откосов  $m$ ; коэффициент шероховатости  $\gamma$ ; средняя стоимость единицы объема выемки канала „а“; проценты ежегодного погашения затраченного капитала, амортизации, выплата %% на занятый капитал и проч., всего  $\delta$

\*) Ур-ние (19) позволяет представить среднюю скорость (и) формулой логарифмируемого типа, что дает возможность построить соответствующую номограмму (см. ном. к п. 15).

от первоначальной стоимости; продажная стоимость одной лошадиной силы в год „с“ руб. Затем, обычно, дается длина канала  $L$ , напор брутто  $H_0$  всей силовой установки и речной уклон  $i_0$  (последние данные не играют роли в решении). Требуется определить размеры канала (т. е.  $h$  и  $\beta$ ) так, чтобы ежегодные эксплуатационные расходы были минимальными.

Пусть уклон канала  $i$ , тогда потеря напора  $h_w = i L$ ; потерянная мощность  $N_w = 10 Q h_w = 10 Q L i$ , — ее стоимость в год  $\mathcal{E}_w = c 10 Q L i$  . . . (x)  
Объем работ  $w = L \omega$ ; их стоимость =  $a L \omega$ ; ежегодный расход на капитализацию, амортизацию и проч.

$$\mathcal{E}_z = z a L \omega \quad . . . . . (xx)$$

В результате, ежегодный эксплуатационный расход выразится [ф.ф. (x) и (xx)],

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_w + \mathcal{E}_z = L (10 c Q i + z a \omega)$$

или на единицу длины канала

$$\mathcal{E}_0 = \mathcal{E} : L = 10 c Q i + z a \omega$$

не

$$\omega = h^2 \omega_e$$

$$i = \frac{Q^2}{K^2} = \frac{Q^2}{K_e^2 h^{2q}}$$

следовательно

$$\mathcal{E}_0 = \frac{10 c Q^3}{K_e^2 h^{2q}} + z a \omega_e h^2$$

Теперь остается только решить относительно  $h$  и  $\beta$  систему уравнений.

$$\frac{\partial \mathcal{E}_0}{\partial h} = 0; \quad \frac{\partial \mathcal{E}_0}{\partial \beta} = 0.$$

Можно и эту задачу решить в общем виде аналогично п. 14.

Действительно, считая  $\beta$ ,  $m$ ,  $h$  независимыми переменными и пользуясь соотношениями (19—21), можно „ $\mathcal{E}_0$ “ представить формулой:

$$\mathcal{E}_0 = \frac{10 c Q^3}{C_0^2} \frac{(\beta + 2r)^{2q-4}}{(\beta + m)^{2q-2} h^{2q}} + z a (\beta + m) h^2$$

Обозначим  $\frac{10 c Q^3}{z a C_0^2} = p$ , и будем искать минимум функции

$$F = \frac{\mathcal{E}_0}{z a} = p h^{2q} (\beta + m)^{2-2q} (\beta + 2r)^{2q-4} + h^2 (\beta + m).$$

Затем, решаем (относит.  $\beta$ ,  $m$ ,  $h$ ) систему уравнений,

$$\frac{\partial F}{\partial h} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial m} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial \beta} = 0.$$

Основные ответы выражаются следующими формулами:

$m = \frac{1}{\sqrt{3}}$ ;  $\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}$ ; (совершенно так же как и в п. 14, получили условия гидравлически наивыгоднейшего профиля)

$$h = \left\{ 0.12 \times 4^q \frac{c q Q^3}{z a C_0^2} \right\}^{\frac{1}{2q+2}}$$

$$b = \beta h = \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ 0.12 \times 4^q \frac{c q Q^3}{z a C_0^2} \right\}^{\frac{1}{2q+2}}$$

Величины „ $q$ “, для ф. Базена, берутся по табличке п. 15.

п. 17. Любопытные результаты получаются, применяя понятие о скоростной характеристике к вопросу о расчете незаиляемых каналов.

Как известно, в ирригационной практике, популярной формулой для проверки незаиляемости каналов служит эмпирическое соотношение Кеннеди, которое для футового размера имеет вид\*)

$$V_K = 0.84 h^{0.64} \quad (22)$$

где  $V_K$  — критическая скорость (футы в сек.)

$h$  — глубина (в футах)

Для незаиляемости требуется соблюдение условия, чтобы средняя скорость в канале ( $U$ ) была больше или равна  $V_K$

$$U \geq V_K$$

Та же формула для метрового размера будет

$$V_K = 0.545 h^{0.64} \quad (22a)$$

Формула (22) выведена из наблюдений над Бари-Доабской системой в Индии. В приложении к другим системам, отличающимся по характеру наносов от Бари-Доабской, различными авторами предлагаются иные числовые значения множителя перед  $h$ . Так что в общем виде можно написать:

$$V_K = a h^{0.64} = a h^\alpha \quad (22b)$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от качества наносов.

Уже после установления эмпирической связи (22) было предложено много рассуждений, доказывающих правильность ее построения. Предыдущие наши положения о скоростной характеристике также дают некоторое подтверждение правильности структуры ф. (22). Действительно, мы имели

$$U = S \sqrt{i} = S_e \sqrt{i} h^{q-2} \quad (23)$$

или, обозначая  $S_e \sqrt{i} = a$  и  $q-2=\alpha$ , получим выражение (22b). Из предыдущего видно, что  $(q-2)$ , а следовательно и  $\alpha$  есть функция шероховатости, если „ $C$ “ брать по Базену; если же „ $C$ “ брать по Маннингу, то  $\alpha=0,67$ , что весьма близко к величине, полученной Кеннеди (0.64).

Значение коэффициента ( $a$ ) в общем случае может быть любым, но для незаиляемых каналов, может быть ( $a$ ), должно как то зависеть от характера влекомых наносов.

Такая зависимость, пока аналитически не установлена, поэтому понятно, что практической гидротехнике в деле назначения величины ( $a$ ) приходится идти эмпирическим путем.

Сопоставление формул 22 и 23 позволяет просто находить сечения незаиляемых каналов при любых уклонах ( $i$ ).

$$U = S_e \sqrt{i} h^{q-2} \geq V_K = a h^\alpha$$

Предполагая  $q-2 = \alpha$  видим, что для незаиляемых каналов должно быть соблюдено соотношение \*\*)

$$S_e \sqrt{i} \geq a$$

или

$$S_e = C_0 R_e^{z+0.5} \geq \frac{a}{\sqrt{i}}$$

\*) Buckley Irrig.p. b. p 117.

\*\*) Если среднюю скорость вычислять по ф. Маннинга, то:  $u = C_0 R_e^{0.67} h^{0.67} \sqrt{i} \approx V_K = a h^{0.64}$  откуда (считая  $h^{0.03} \approx 0.1$ ),  $R_e^{0.67} = \left( \frac{\beta+m}{\beta+2r} \right)^{0.67} \geq \frac{a}{C_0 \sqrt{i}}$  или  $\frac{\beta+m}{\beta+2r} \geq \frac{a^{1.5}}{C_0^{1.5} i^{0.75}}$ . Последнее неравенство даст возможность найти „ $\beta_K$ “ (незаиляемое).

Следовательно

$$R_e = \frac{\beta + m}{\beta + 2r} \geq \left( \frac{a}{C_0 \sqrt{i}} \right)^t$$

Последнее неравенство дает указание, что незаияемые каналы могут быть подобраны далеко не при всяких комбинациях численных значений „a“, „C<sub>0</sub>“ и „i“. Действительно, т. к. R<sub>e</sub> (гидр. рад. „единичного“ профиля при h=1 м.) не может быть больше единицы, то при

$$\left( \frac{a}{C_0 \sqrt{i}} \right)^t > 1 \text{ незаияемых каналов подобрать нельзя.}$$

Из предыдущего неравенства получаем:

$$\beta \geq \beta_k = \frac{m-2 \left( \frac{a}{C_0 \sqrt{i}} \right)^t}{\left( \frac{a}{C_0 \sqrt{i}} \right)^t - 1} = \frac{m (C_0 \sqrt{i})^t - 2a^t r}{a^t - (C_0 \sqrt{i})^t} \quad \dots (24)$$

В последних выражениях C<sub>0</sub>, Z + 0.5 и t в функции от γ следует брать по табличке—п. 15, если считать „C“ по Базену.

При „C“ по Маннингу C<sub>0</sub> =  $\frac{1}{n}$  (n=Куттеровский коэффициент), а t=1.5.

Обратим внимание на то, что здесь (a) должно быть взято из ф. Кеннеди с коэффициентами для метрового размера. Затем отметим, что соотношение (24) получено в предположении α=Z+0.5=q-2... , в действительности показатель, данный Кеннеди (0.64), не равен Z+0.5, но близок к этой величине. Нам казалось естественным сделать предположение такого равенства, поскольку правильны наши рассуждения о представлении скоростной характеристики ф. (20)

Для массовых расчетов каналов легко составить график

$$\beta_k = \phi (i, m = \text{const}, \gamma = \text{const}).$$

Нами построена номограмма для отыскания β<sub>k</sub> при любых независимых аргументах (i, m, γ).

**п. 18.** Если строить логарифмические анаморфозы уравнения 15 в координатах x=lg h и y=lg K для постоянных β, m, γ, то получаются почти прямые линии; это наводит на мысль выразить в показательном виде расходную характеристику в общей форме, не прибегая к предварительному изображению Базеновского коэффициента „C“ в показательном виде.

Аналитически сделать его довольно просто, даже без замены кривых прямыми. (См. чер. № 9).

В самом деле, если имеем уравнение кривой y=f(x), то уравнение касательной в т. (x, y) будет

$$(\eta - y) = \frac{dy}{dx} (\xi - x),$$

где η и ξ текущие координаты касательной. При ξ=0, касательная сделает на оси y-ов отрезок

$$\eta_0 = y - \frac{dy}{dx} x = f(x) - \frac{dy}{dx} x, \quad \dots (*)$$

$$\text{следовательно, } y = f(x) = \eta_0 + \frac{dy}{dx} x$$

но так как у нас  
x=lg h; y=lg k,

то обозначив  $\frac{dy}{dx} = q$  и  $\eta_0 = \lg N$ ,

получим:  $\lg k = \lg N + q \lg h$

Откуда  $K = N h^q$  . . . . . (25)

В этом уравнении (в общем случае)  $N$  и  $q$  суть функции  $h$ .

Покажем получение  $N$  и  $q$  для расходной характеристики в общем виде.

Логарифмируем уравнение 15.

$$\lg K = \lg (87 \omega_e \sqrt{R_e}) + 3 \lg h - \lg (\sqrt{h} + \gamma / \sqrt{R_e})$$

Вводим координаты  $y = \lg K$ ;  $x = \lg h$  и отмеча, что при основании логарифм.  $= 10$ ;  $\sqrt{h} = 10^{0.5x}$ , получаем уравнение кривых анаморфозы:

$$y = \lg (87 \omega_e \sqrt{R_e}) + 3x - \lg (10^{0.5x} + \frac{\gamma}{\sqrt{R_e}})$$

Угловый коэффициент касательной в точке  $(x, y)$  будет

$$q = \frac{dy}{dx} = 3 - \frac{1}{2} \times \frac{10^{0.5x}}{10^{0.5x} + \gamma / \sqrt{R_e}} = 3 - \frac{1}{2} \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{h} + \gamma / \sqrt{R_e}} \quad (26)$$

Как видно,  $q$  изменяется от 2,5 до 3 (см. табл. п. 15).

Находим  $\eta_0 = \lg N$ . По уравнению (\*)

$$\begin{aligned} \eta_0 = y - qx &= \lg (87 \omega_e \sqrt{R_e}) + 3x - \lg (10^{0.5x} \times \gamma / \sqrt{R_e}) - \\ &- 3x + \frac{0.5x 10^{0.5x}}{10^{0.5x} \times \gamma / \sqrt{R_e}} = \lg \frac{87 \omega_e \sqrt{R_e}}{\sqrt{h} + \gamma / \sqrt{R_e}} + \frac{0.5 \sqrt{h}}{\sqrt{h} + \gamma / \sqrt{R_e}} \lg h \end{aligned}$$

но из ф. 26.

$$\frac{0.5 \sqrt{h}}{\sqrt{h} + \gamma / \sqrt{R_e}} = 3 - q$$

следовательно

$$\eta_0 = \lg N = \lg \frac{87 \omega_e \sqrt{R_e}}{\sqrt{h} + \gamma / \sqrt{R_e}} + \lg h^{3-q}$$

откуда

$$N = \frac{87 \omega_e \sqrt{R_e}}{\sqrt{h} + \gamma / \sqrt{R_e}} h^{3-q} \quad (27)$$

Формулы 26 и 27 получились довольно громоздкими и поэтому в практических приложениях не рекомендуются, хотя для быстрого нахождения  $N$  и  $q$  можно бы построить достаточно удобные монограммы в частности монограмма для  $q$  нами уже построена (см. черт. № 10); но обе формулы интересны в том отношении, что они аналитически дают пределы колебаний, величины и характер изменений переменных коэффициентов в выражениях вида (ф. 25).

По ф. (27) можно видеть, какова будет ошибка, если в выражении (25) вместо  $N$  взять  $K_e$ .

Для этого составим отношение  $\varphi = N/K_e$

$$\begin{aligned} N &= \frac{87 \omega_e \sqrt{R_e}}{\sqrt{h} + \gamma / \sqrt{R_e}} h^{3-q} \approx \frac{87 \omega_e \sqrt{R_e}}{\sqrt{h} + \gamma / \sqrt{R_e}} h^{0.33} \\ K_e &= \frac{87 \omega_e \sqrt{R_e}}{1 + \gamma / \sqrt{R_e}} \end{aligned}$$

Глубины  $h$  колеблются в зависимости от уклона  $i$

$$\text{Имеем } K_c = \frac{87 (b+m)^2}{(b+2r)(\sqrt{R_c} + \gamma)} = \frac{87 \times 1.32^2}{3.14(\sqrt{\frac{1.32}{3.14}} + 1.3)} = 24.7 \text{ м}^3 / \text{с.}$$

$$[\text{Отметим } D_c = \frac{B_c^2}{\chi_c (\sqrt{R_c} + \gamma)} = \frac{1.74}{6.12} = 0.284.]$$

Для определения „ $p$ “ возьмем среднее наполнение

$$h = 0.12 \text{ саж.} = 0.25 \text{ мет.}$$

$$\text{тогда } D = \frac{(b+mh)^2}{\chi(\sqrt{R} + \gamma)} = \frac{(0.32+0.25)^2}{(0.32+2.82 \times 0.25)(0.37+1.3)} = \approx 0.189$$

$$\text{так как } \sqrt{R} = \sqrt{h} \sqrt{B/\chi} = 0.5 \sqrt{\frac{0.57}{1.03}} = 0.37$$

Теперь вычисляем  $p$ .

$$p-2 = \frac{\lg 0.19 - \lg 0.28}{\lg 0.25} = \frac{1.278 - 1.445}{1.398} = \approx 0.28$$

таким образом:  $p = 2.28 (\approx 2.30)$ .

Для выяснения пределов колебания „ $p$ “ произведем вычисления для крайних практических пределов наполнения

$$h_1 = 0.15 \text{ м.}$$

$$h_2 = 0.40 \text{ м.}$$

Вычисления группируем в табличке.

Таблица вычислений „ $p$ “

| $h$  | $B$  | $\chi$ | $R = h \frac{B}{\chi}$ | $D$   | $D/D_0$ | $\lg D/D_0$ | $\lg h$ | $p-2$ | $p$  |
|------|------|--------|------------------------|-------|---------|-------------|---------|-------|------|
| 0,15 | 0,47 | 0,77   | 0,09                   | 0,18  | 0,62    | 1,792       | 1,176   | 0,252 | 2,25 |
| 0,25 | 0,57 | 1,03   | 0,135                  | 0,189 | 0,67    | 1,833       | 1,398   | 0,28  | 2,28 |
| 0,40 | 0,72 | 1,53   | 0,19                   | 0,193 | 0,69    | 1,838       | 1,602   | 0,410 | 2,41 |

Принимаем в среднем  $p = 2,30$

Тогда:

$$Q = K \sqrt{i} = \sqrt{i} K_c h^{2.30}$$

В этом уравнении переменные только  $(h)$  и  $(i)$ .

Отделим их.

$$\sqrt{i} h^{2.30} = \frac{Q}{K_c} = \sqrt{J_c}$$

Очевидно,  $J_c$  есть уклон свободной поверхности потока, который нужно дать ему, чтобы в заданном профиле  $(b \text{ и } \gamma)$  проходил заданный расход  $(Q)$  при наполнении  $h = 1$  мет.

Лсгарифмируем:

$$0,5 \lg i + 2,3 \lg h = 0,5 \lg J_c$$

Получилась формула, которую весьма просто и удобно представить в параллельных координатах (См. чер. № 12).

Опора  $J_c$  меняется с изменением расхода  $Q$ , поэтому шкалу  $J_c$  следует градуировать на различные расходы.

Номограмма дает возможность для любого расхода  $(Q)$  и уклона  $(i)$ , простым наложением линейки на график, определить искомую глубину.

Выше мы приняли показатель  $p = 2,30$ , тогда как он изменяется от 2,25 до 2,41. Посмотрим, как это отразится на результат. Вычислим относительную ошибку ( $\delta$ ) для  $h = 0,40$  м. Называя  $K_\phi$  расходную характеристику при среднем  $p$  (2,30) а  $K_\partial$  — расходную характеристику при  $p = 2,41$ , имеем:

$$\delta = \frac{K_\partial - K_\phi}{K_\partial} = \frac{K_c \left( h^{2,41} - h^{2,30} \right)}{K_c h^{2,41}} =$$

$$= \frac{0,11 - 0,12}{0,11} = - \frac{1}{11} = 0\text{к.} - 0,09$$

т. е. при вычислении по среднему показателю крайнее отклонение результата выражается 9% в сторону преышения, что находится в пределах точности вычисления непосредственно по формуле (см. п. 11). В данном конкретном случае это тем более допустимо, потому, что рассчитывать точно такой маленький канал, как ороситель, где каждый случайный комок земли нарушает характер движения, очевидно, совершенно не имеет смысла.

В более крупных каналах может быть следует уже принимать во внимание изменение « $p$ ». Для такого случая можно построить номограмму, подобную вышеуказанной, но имеющей около опоры сетку с координатами ( $p$ ) и ( $i_0$ ) и кривыми на сетке  $J_c = \phi$  ( $Q = \text{const}$ ). На том же графике легко построить шкалу средних скоростей, пользуясь соотношением  $u = \sqrt{i} s = \sqrt{i} s_c h^s$  где  $s$  определится по формуле (30). Пользование графиком настолько просто, что не нуждается в пояснениях.

п. 21. Выражение  $K = K_c h^p$  позволяет дать чрезвычайно интересный общий прием вычисления вида свободной поверхности водоток<sup>2</sup> при неравномерном движении в открытом русле любого профиля. Прием этот предложен проф. Б. А. Бахметевым. Напомним, что старыми приемами затронутая задача была решена только для двух частных случаев: а) для бесконечно широкого прямоугольного русла (решением Бресса) и б) для параболического русла (решение Толкмитта). Предварительно необходимо отметить, что при увеличении ширины по дну (б) при прочих равных условиях, изменения показателя ( $p$ ) в зависимости от переменного наполнения ( $h$ ), становятся все более и более плавными. Благодаря этому, с достаточной точностью можно считать « $p$ » постоянным для каждого поперечного профиля русла.

Отметив это обстоятельство, обратимся к основному уравнению установившегося неравномерного медленно изменяющегося движения.

Как известно, в общем случае, оно может быть представлено так:\*),

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i_0 - \frac{Q^2}{C^2 R \omega^2} \left( 1 - \frac{\alpha R C^2}{g \omega} \frac{\partial \omega}{\partial s} \right)}{1 - \frac{\alpha Q^2 l}{g \omega^3}}$$

В этом уравнении

$s$  — расстояние от точки, принятой за начало до данного сечения,

$i_0$  — уклон дна канала,

$l$  — ширина живого сечения по верху,

$\alpha$  — коэффициент Кориолиса.

Остальные буквы имеют значения, объясненные выше (п. п. 1 и 9).

\*) См. Б. А. Бахметев „О неравномерном движении жидкости в открытом русле“, стр. 28.

Если русло призматическое (т. е. поперечный профиль русла вдоль потока не изменяется), то  $\frac{\partial \omega}{\partial s} = 0$  и уравнение принимает вид:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i_0 - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2 l}{g \omega^3}} \quad \dots \dots \dots (31)$$

Назовем „нормальной глубиной“ —  $h_0$ , ту глубину, при которой в рассматриваемом профиле канала пройдет заданный расход  $Q$  в условиях равномерного режима. Следовательно, при глубине  $h_0$  поверхностный уклон равен донному  $= i_0$ . Тогда, обозначая расходную характеристику при глубине  $h_0$  через  $K_0$ , по ф. ф. 6 и 16 можно написать

$$Q = \sqrt{i_0} K_0 = \sqrt{i_0} K_c h_0^p$$

или  $Q^2 = i_0 K_c^2 h_0^{2p} \quad \dots \dots \dots (32)$

С другой стороны по определению  $K$  (ф. 15)

$$\omega^2 C^2 R = K^2 = K_c^2 h^{2p} \quad \dots \dots \dots (33)$$

при чем  $h$  — есть глубина в рассматриваемом сечении продольного профиля при неравномерном режиме (согласно уравнения 31).

Преобразуем еще второй член знаменателя уравнения 31.

$$\alpha \frac{Q^2 l C^2 R}{g \omega^3 C^2 R} = \alpha \frac{i_0 K_c^2 h_0^{2p} C^2 R l}{K_c^2 h^{2p} g \omega} = \alpha i_0 \frac{C^2 l}{g \lambda} \left( \frac{h_0}{h} \right)^{2p} = \lambda \left( \frac{h_0}{h} \right)^{2p} \quad \dots \dots (34)$$

здесь через  $\lambda$  обозначено  $\alpha i_0 \frac{C^2 l}{g \lambda}$

Подставляя теперь ф.ф. 32, 33 и 34 в уравнение 31, получим:

$$\frac{dh}{ds} = i_0 \frac{1 - \left( \frac{h_0}{h} \right)^{2p}}{1 - \lambda \left( \frac{h_0}{h} \right)^{2p}} = i_0 \frac{h^{2p} - h_0^{2p}}{h^{2p} - \lambda h_0^{2p}}$$

Отделим переменные  $h$  и  $s$  в разные части равенства

$$i_0 ds = \frac{h^{2p} - h_0^{2p}}{h^{2p} - \lambda h_0^{2p}} dh = \frac{\left( \frac{h}{h_0} \right)^{2p} - 1}{\left( \frac{h}{h_0} \right)^{2p} - \lambda} d \left( \frac{h}{h_0} \right)$$

Обозначим:  $2p = n$ ;  $\frac{h}{h_0} = \eta$  следовательно  $dh = h_0 d\eta$ ,

тогда  $i_0 ds = \frac{\eta^n - 1}{\eta^n - \lambda} h_0 d\eta$

После чего окончательно получаем

$$\frac{i_0}{h_0} ds = d\eta - (1 - \lambda) \frac{d\eta}{(-\eta^n + 1)} \quad \dots \dots \dots (35)$$

или то же уравнение в конечной форме:

$$\frac{i_0}{h_0} (S_2 - S_1) = \eta_2 - \eta_1 - (1 - \lambda) \int_1^2 \frac{d\eta}{(1 - \eta^n)} \quad \dots \dots \dots (36)$$

Называя:  $S - S_1 = L$  (длина)

и обозначая  $\int_1^2 \frac{d\eta}{1 - \eta^n} = F(\eta)$ ,

получим формулу для вычисления линии свободной поверхности:

$$L = \frac{h_0}{i_0} \left[ \eta_2 - \eta_1 - (1 - \lambda) (F(\eta_2) - F(\eta_1)) \right] \dots \dots \dots (37)$$

Обратим внимание на то, что при выводе уравнений (35 и 37) мы не за-  
давались определенной формой русла, как это делали Бресс, Толкмитт и дру-  
гие; благодаря этому, полученные выражения представляют общее решение за-  
дачи об определении кривой свободной поверхности в неравномерном движении,  
пригодное для русел *любой формы*. Различие в форме русел и их шероховато-  
сти сказывается лишь в величине показателя  $n = 2p$  (определение „ $p$ “ см. п. 19).  
Как видно из предыдущего (см. график), „ $p$ “ изменяется от 1 — 1,5 до 3,  
следовательно, ( $n$ ) будет меняться от 2 до 6. Давая в этих пределах различ-  
ные значения показателю „ $n$ “, можно вычислить численные значения функции

$$F(\eta) = \int \frac{d\eta}{\eta^n - 1}$$

и результаты объединить в виде расчетных таблиц.

При  $n = 3$ —получаются таблицы Бресса; при  $n = 4$ —таблицы Толкмитта;  
при  $n = 3,5$ —таблицы Форхеймера.

Под руководством инж. Н. Н. Павловского в Опытном-Строительном Отделе  
О. З. У. для изложенного способа были составлены „новые таблицы“ для  
определения вида свободной поверхности водотока при неравномерном движении.  
Необходимость таких общих таблиц, взамен таблиц для частных решений той же  
задачи, достаточно ясна из предыдущего. По условиям времени таблицы еще не  
опубликованы. Мы предполагаем привести их в конспективных записках наших  
лекций по гидравлике.

**п. 22. Заключение.** Размеры статьи не дают возможности полнее исчерпать  
вопрос и дать большее количество примеров приложения понятия о характери-  
стике к решению в общем виде практических задач. Так, здесь нами не затро-  
нут вопрос о выражении  $K_e$  в функции от  $\beta$  ( $S_e$  или  $K_e$  в функции от  $b$ ), не ука-  
заны решения задач о промышленном канале с неравномерным режимом, расчет  
быстротоков и проч., и проч.

Нам кажется, изложенный материал достаточно освещает сущность и удоб-  
ство введения в расчеты понятий о характеристиках ( $S$  и  $K$ ) и, тем самым,  
может сыграть полезную роль в гидротехнической практике. Исчерпать же полно  
все случаи приложений, вообще, едва ли возможно, так как они чрезвычайно  
разнообразны и, иногда, почти неожиданны. Например, как будто бы (нами эта  
работа еще не закончена) получаются интересные заключения при введении по-  
нятий  $S$  и  $K$  в исследования проф. Г. К. Ризенкампа об изменениях коэффи-  
циента полезного действия ирригационной системы в связи с изменениями рас-  
хода воды в ней. Очевидно, возможен целый ряд подобных приложений доста-  
точно „отдаленных“ от самой техники расчета движущегося потока жидкости.

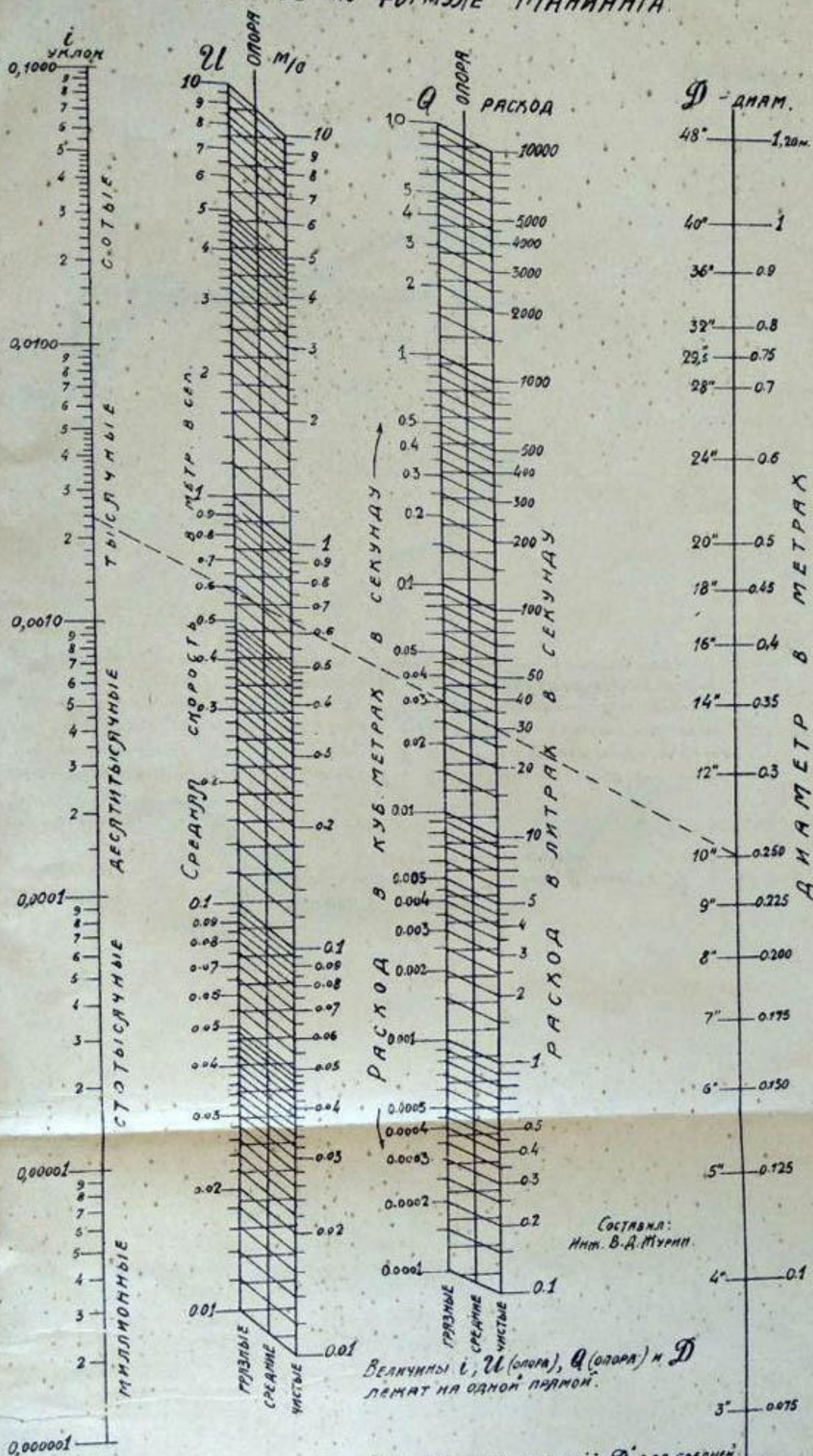
*Примечание:* По техническим обстоятельствам в номограмме для определения ср. скорости  
(и) по форм. Маннинга (при  $m=0$ ) шкала скоростей снята при печатании. Для ее восстано-  
вления нужно провести вертикальную прямую точно в середине между осей ( $i$ ) и ( $S$ ) и градуировать  
эту ось в логарифмическом масштабе  $l_u = 10$  см, (как и ось « $i$ ») начиная от точки  $u = 1$  м/с.,  
которая получается в пересечении оси с прямой, соединяющей точки:  $S=100$  и  $i=0,0001$ ; поло-  
жительное направление оси вниз.

Автор.

Черт. № 1.

# НОМОГРАММА К РАСЧЕТУ ТРУБ ПО ФОРМУЛЕ МАНИНГА

К ст. В. А. Журипп

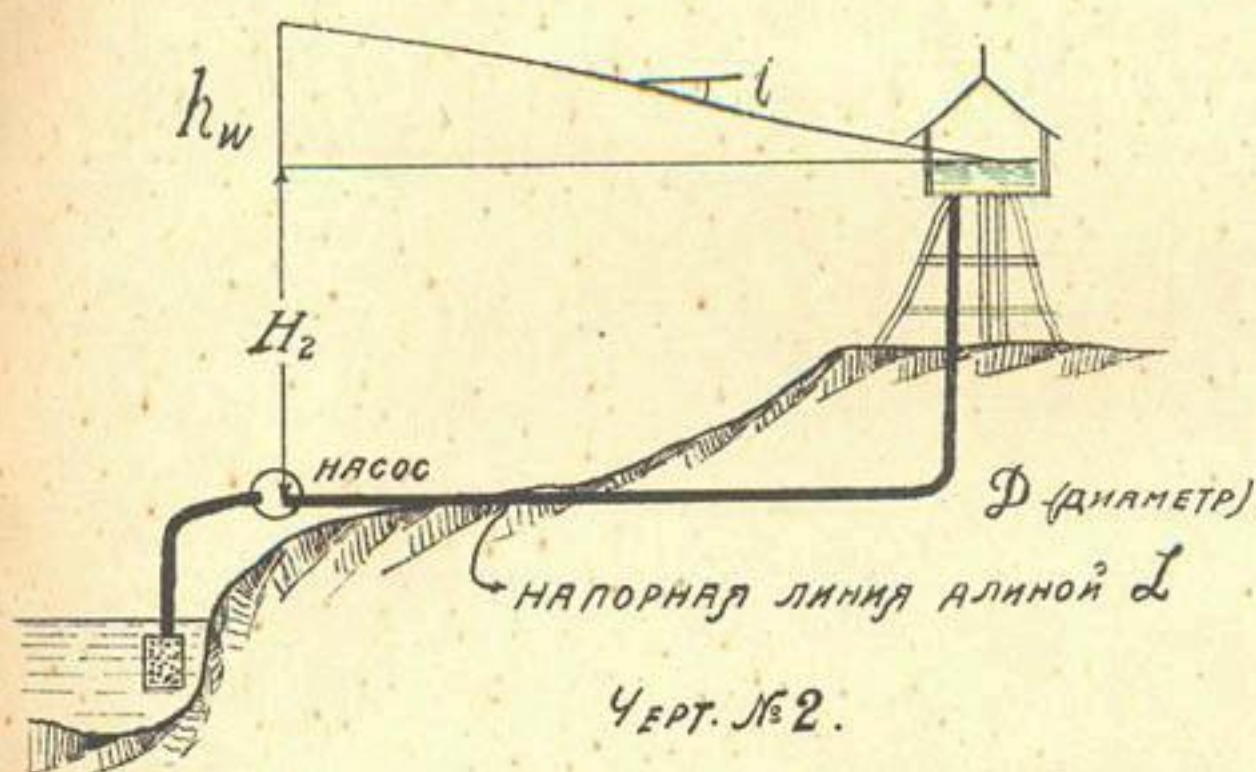


Составил:  
Инж. В. А. Журипп

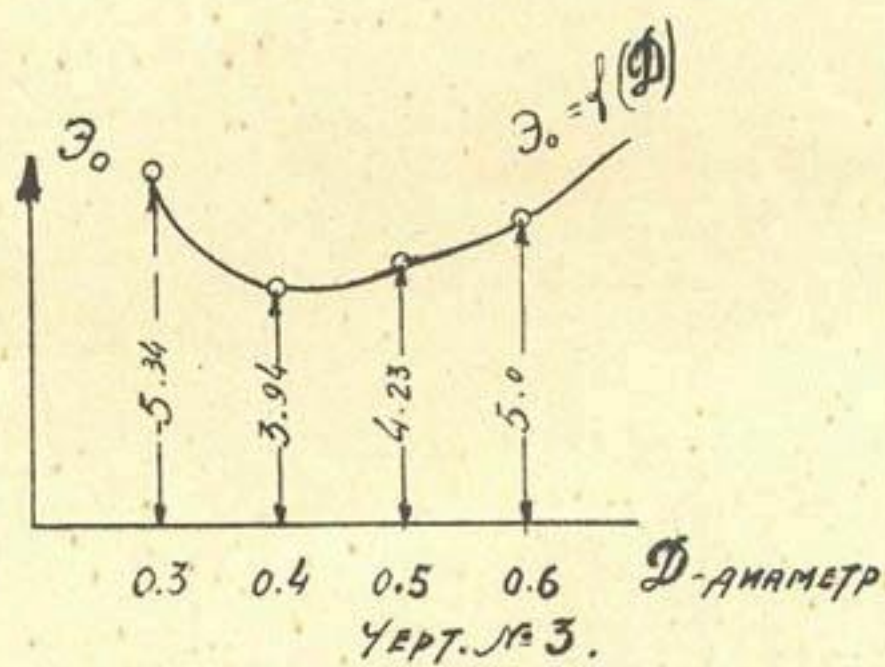
Величины  $i$ ,  $u$  (опор),  $Q$  (опор) и  $D$   
лежат на одной прямой.

Способ пользования. Для нахождения  $u$  и  $Q$  по известным  $i$  и  $D$  для средней шероховатости проводим прямую через  $i$  и  $D$  и отмечаем точки пересечения "опор" шкалы  $u$  и  $Q$ , полученные значения читаем на правой оси. Если шероховатость (слева) или спускается (справа) по наклонным прямым. Если шероховатость не средняя (чистые или грязные), то для получения ответа от точек на опорных переходим на соответствующую ось (чистые или грязные) по горизонтальной прямой (и читаем ответ).

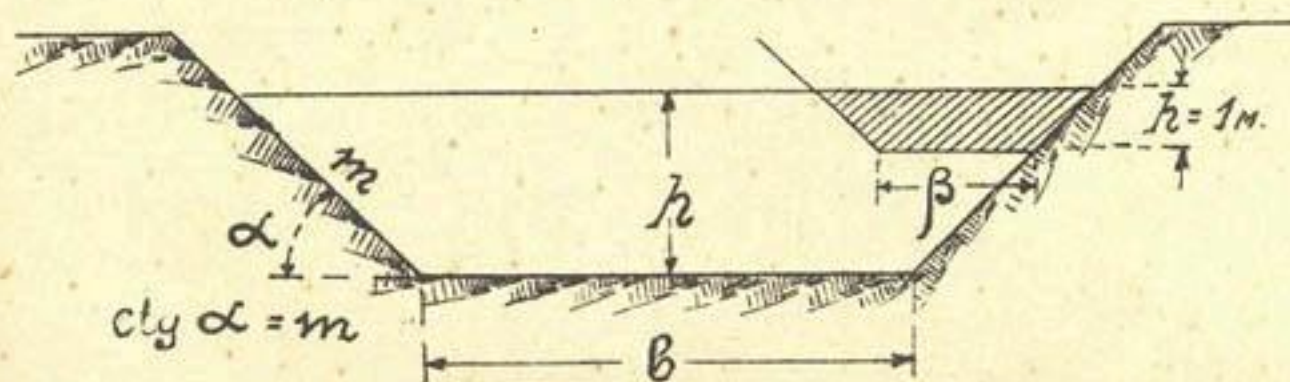
Ист. В. Д. (Муриня)



Черт. № 2.

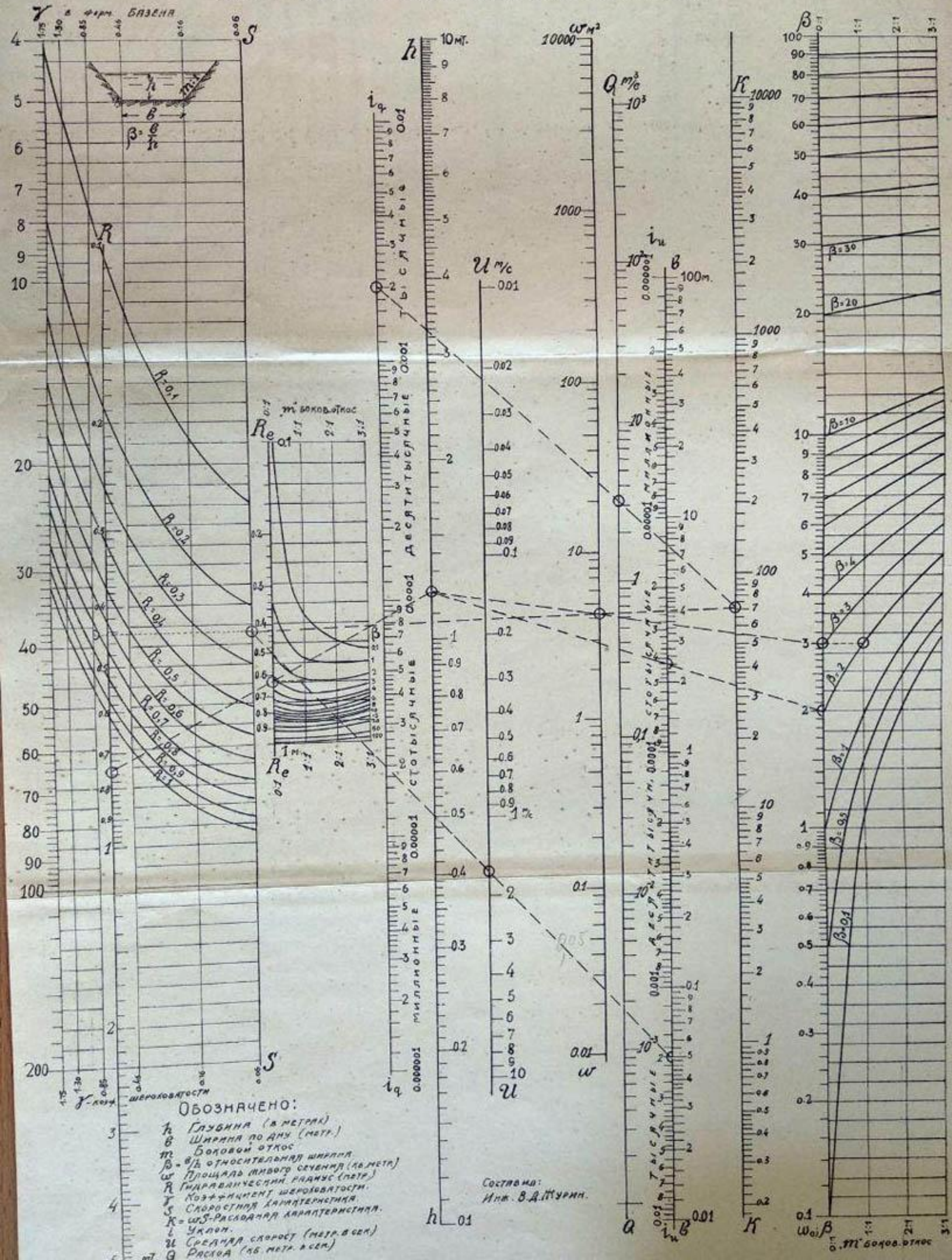


Черт. № 3.



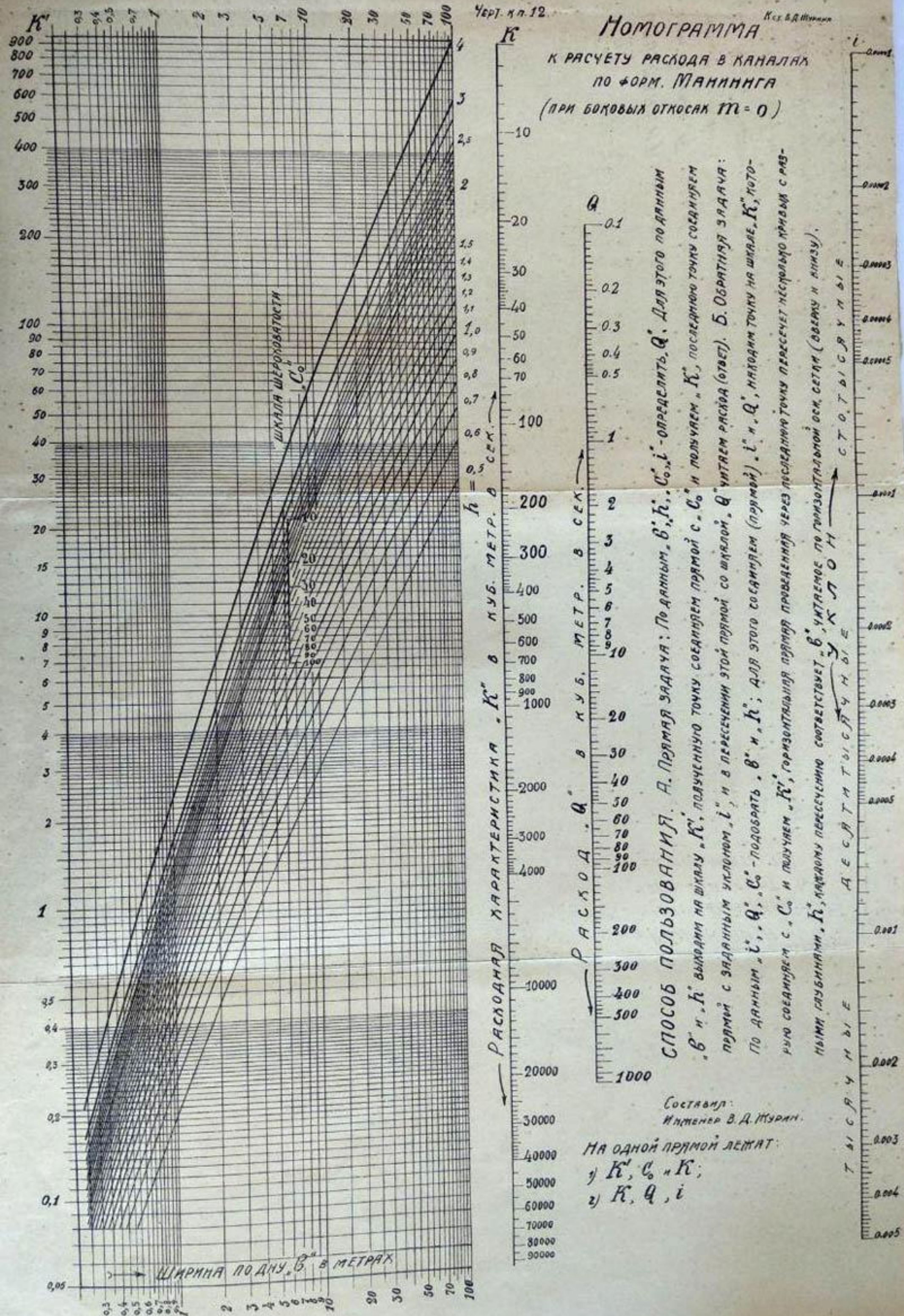
Черт. № 4

# СХЕМА ОБЩЕЙ НОМОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА КАНАЛОВ ПО НОВ. ФОРМ. БАЗЕНА.



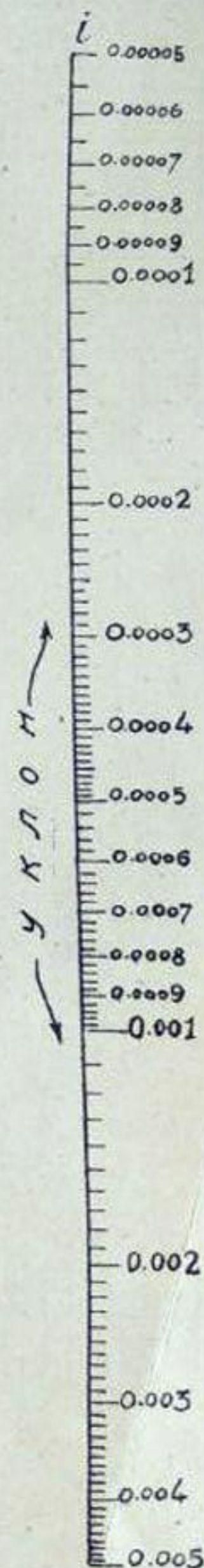
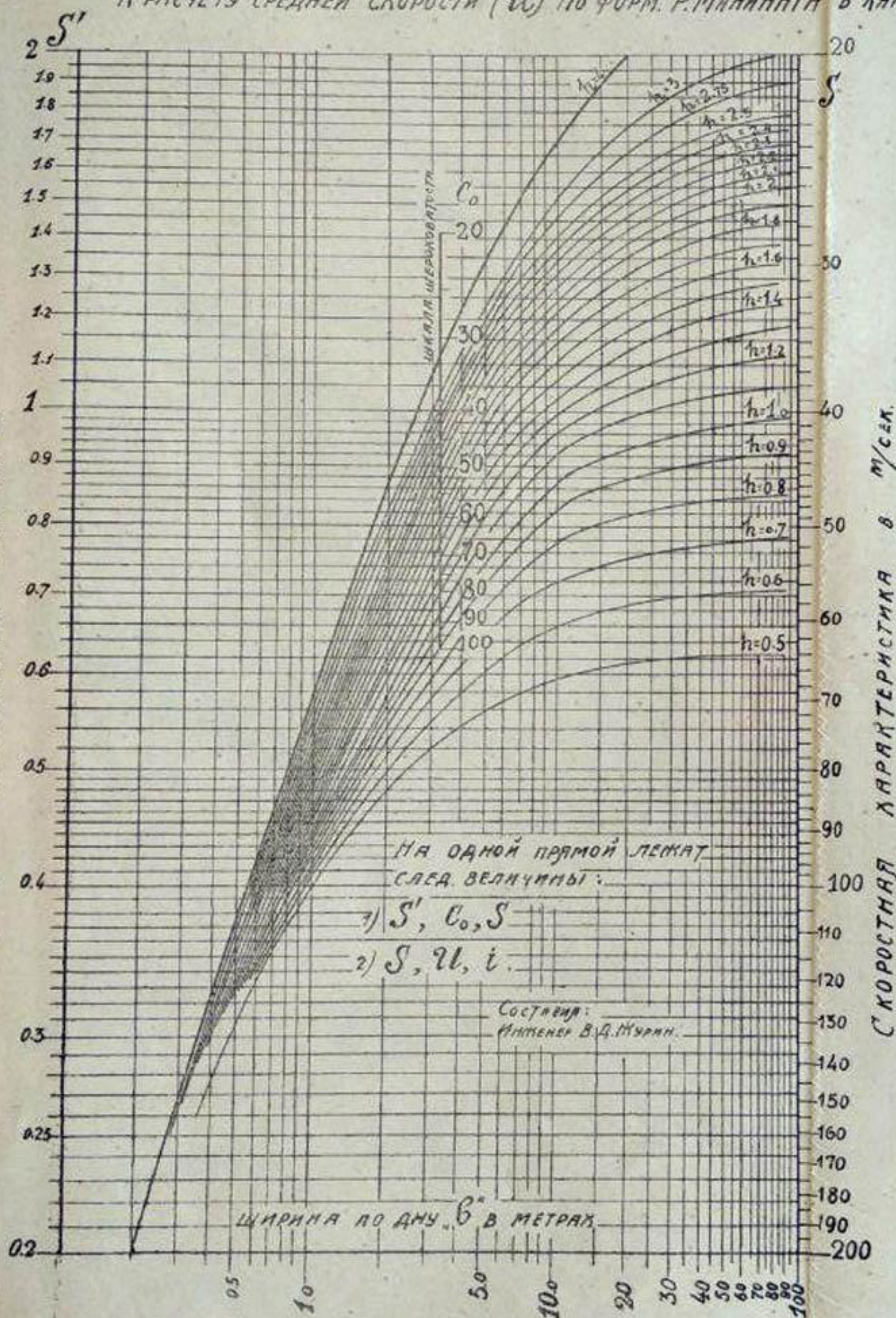


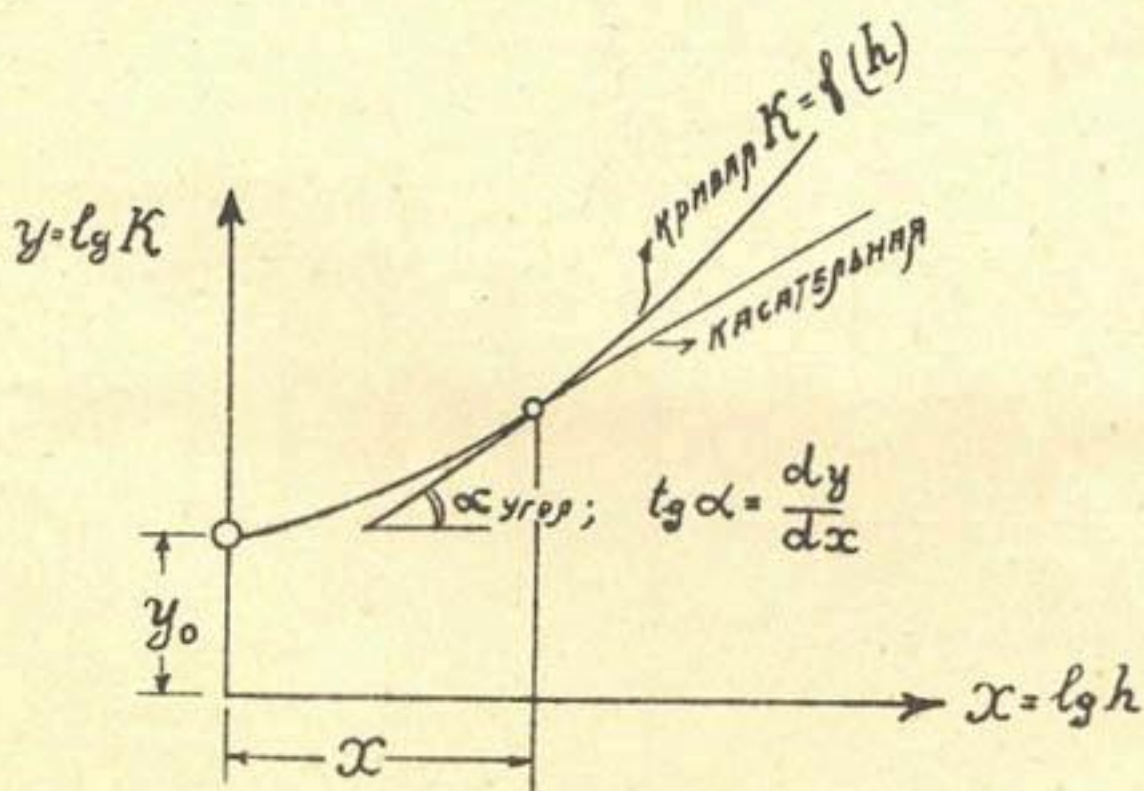
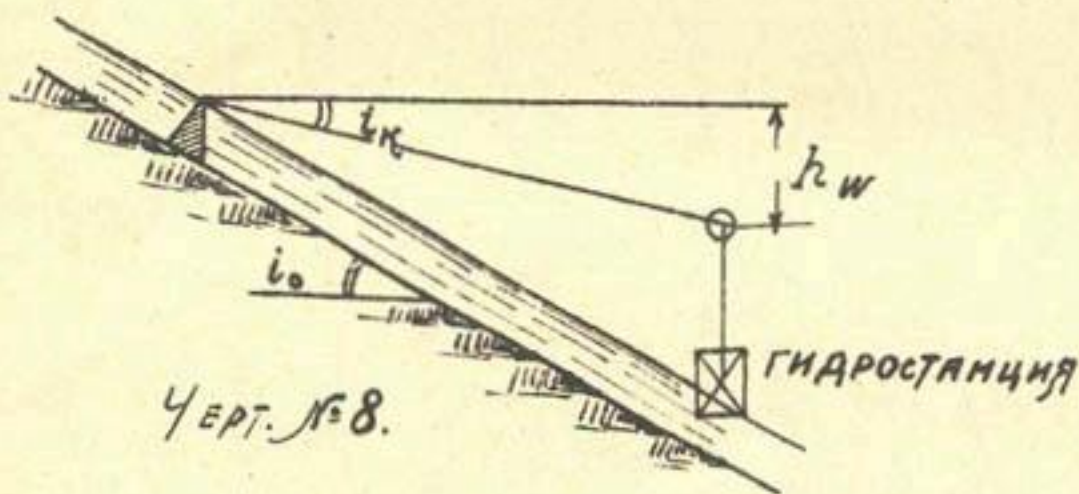
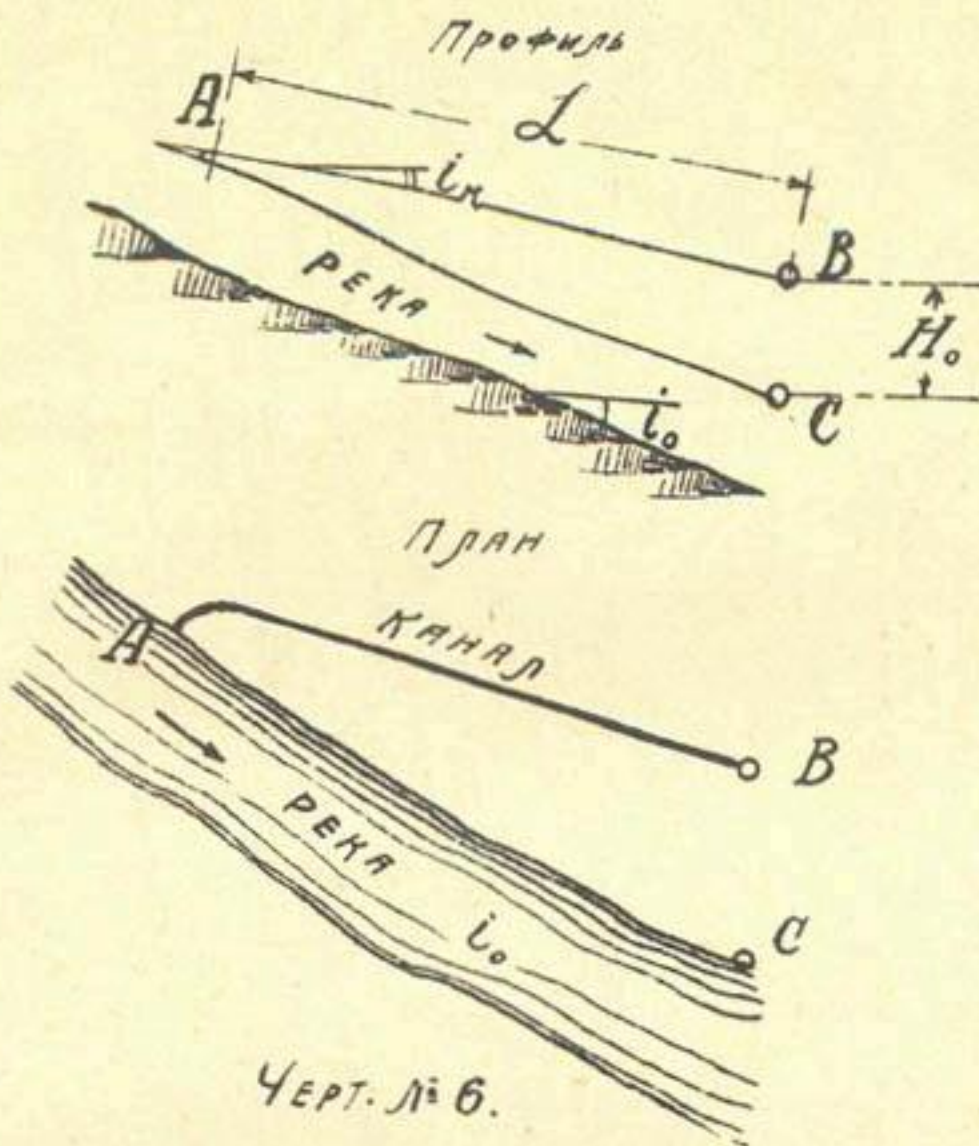
К РАСЧЕТУ РАСХОДА В КАНАЛАХ  
ПО ФОРМ. МАННИНГА  
(ПРИ БОКОВЫХ ОТКОСАХ  $m = 0$ )



К РАСЧЕТУ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ( $U$ ) ПО ФОРМ. Р. МАННИНГА В КАНАЛАХ С БОК. ОТК.  $m=0$

СКОРОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА  $S'$  ПРИ  $C_0=1$



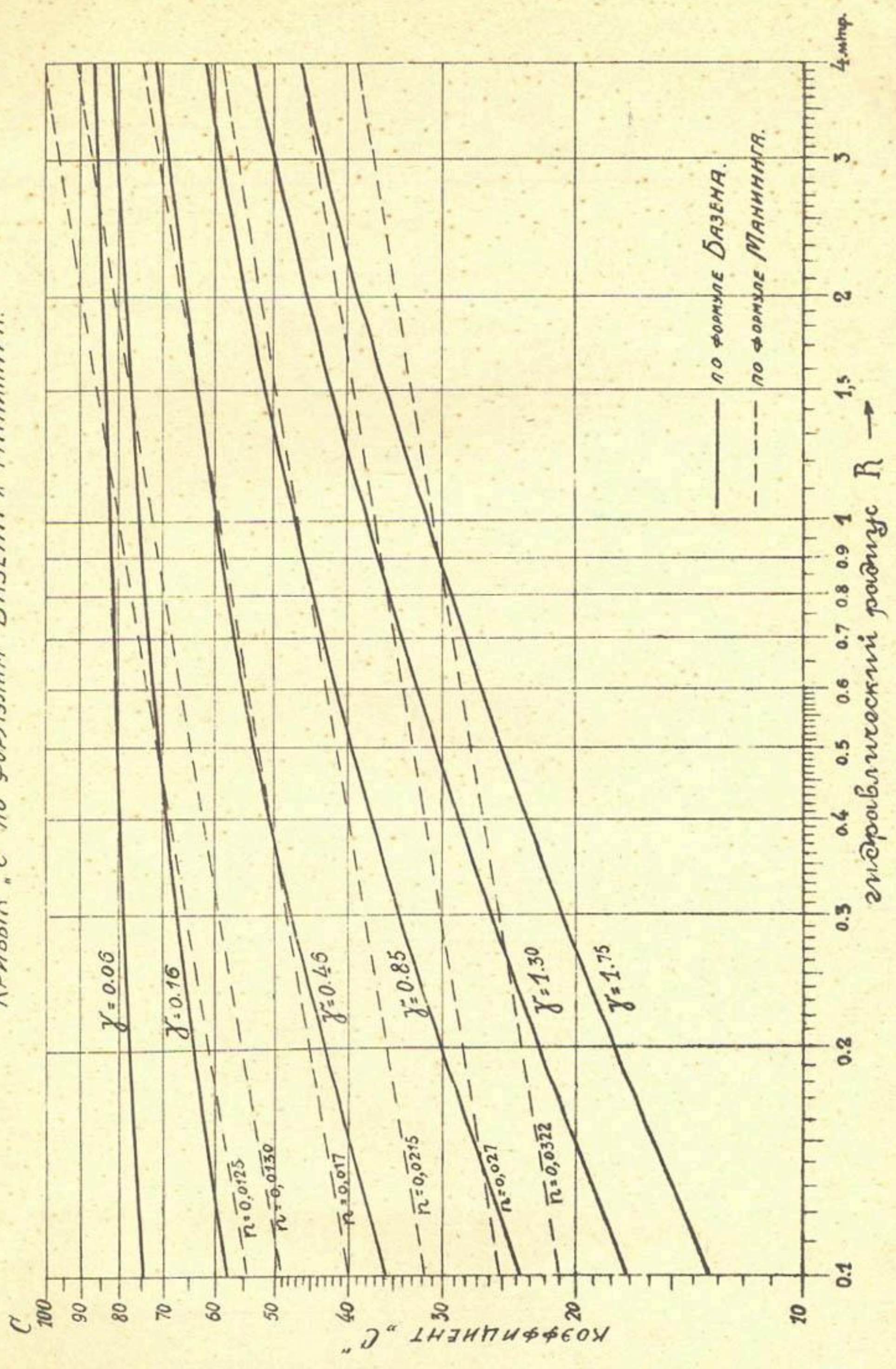


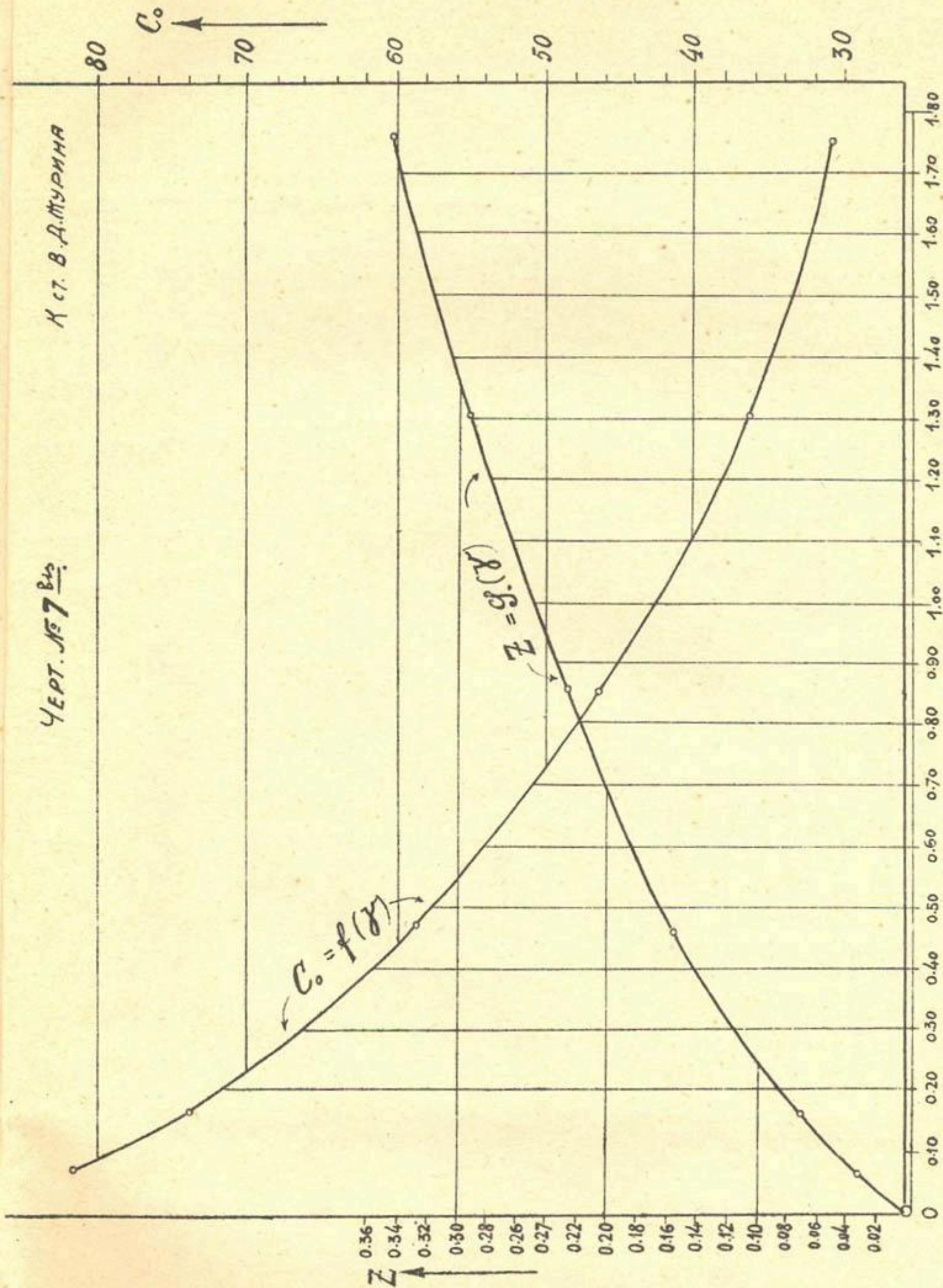
ЧЕРТ. № 9.

Черт. В. Д. Журиня.

Черт. № 7.

ЛОГАРИФИЧЕСКАЯ АНАМОРФОЗА  
КРИВЫХ "С" ПО ФОРМУЛАМ БАЗЕНА И МАНИНГА.

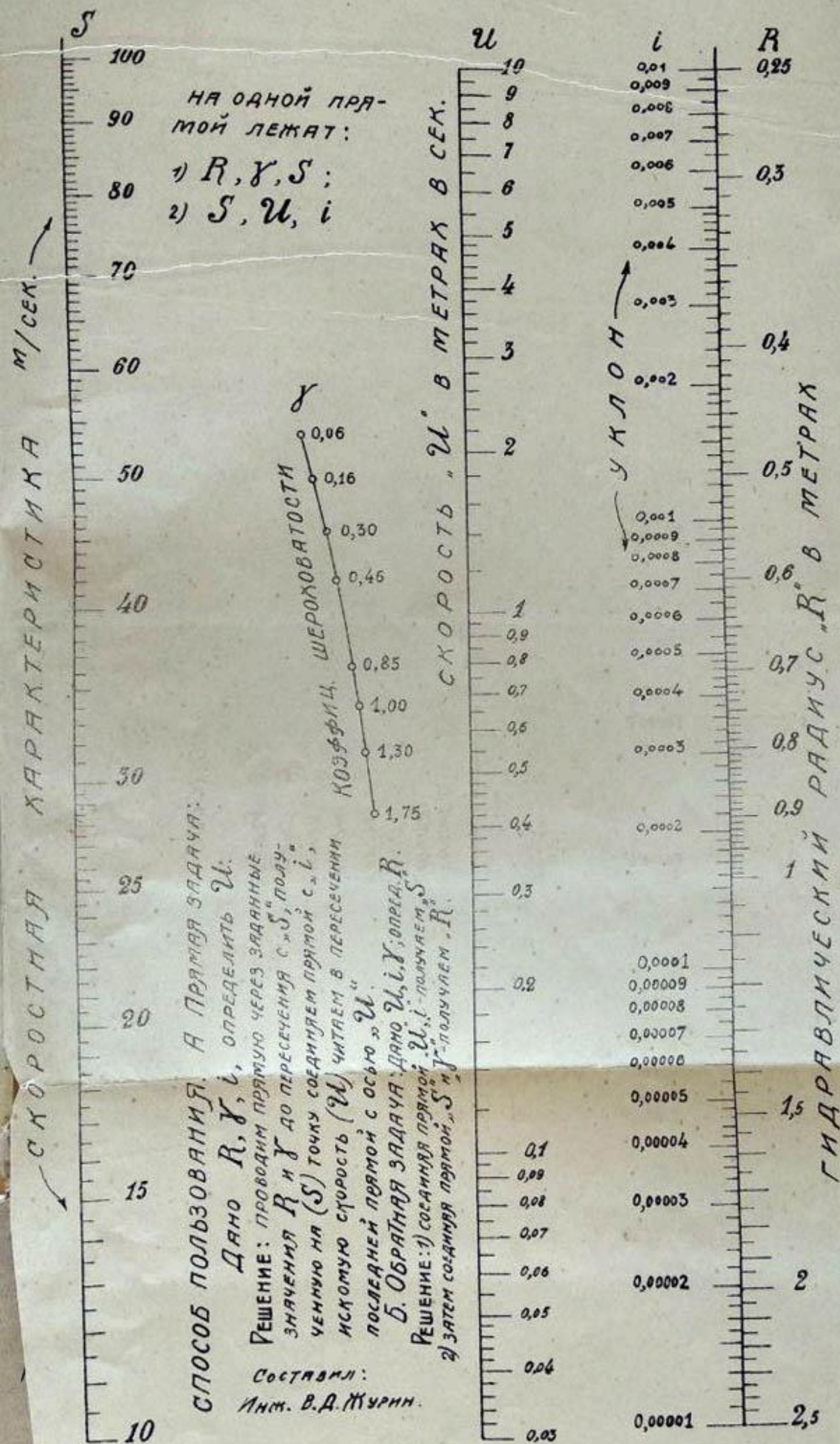




→  $\gamma$  В ФОРМУЛЕ БАЗЕНА

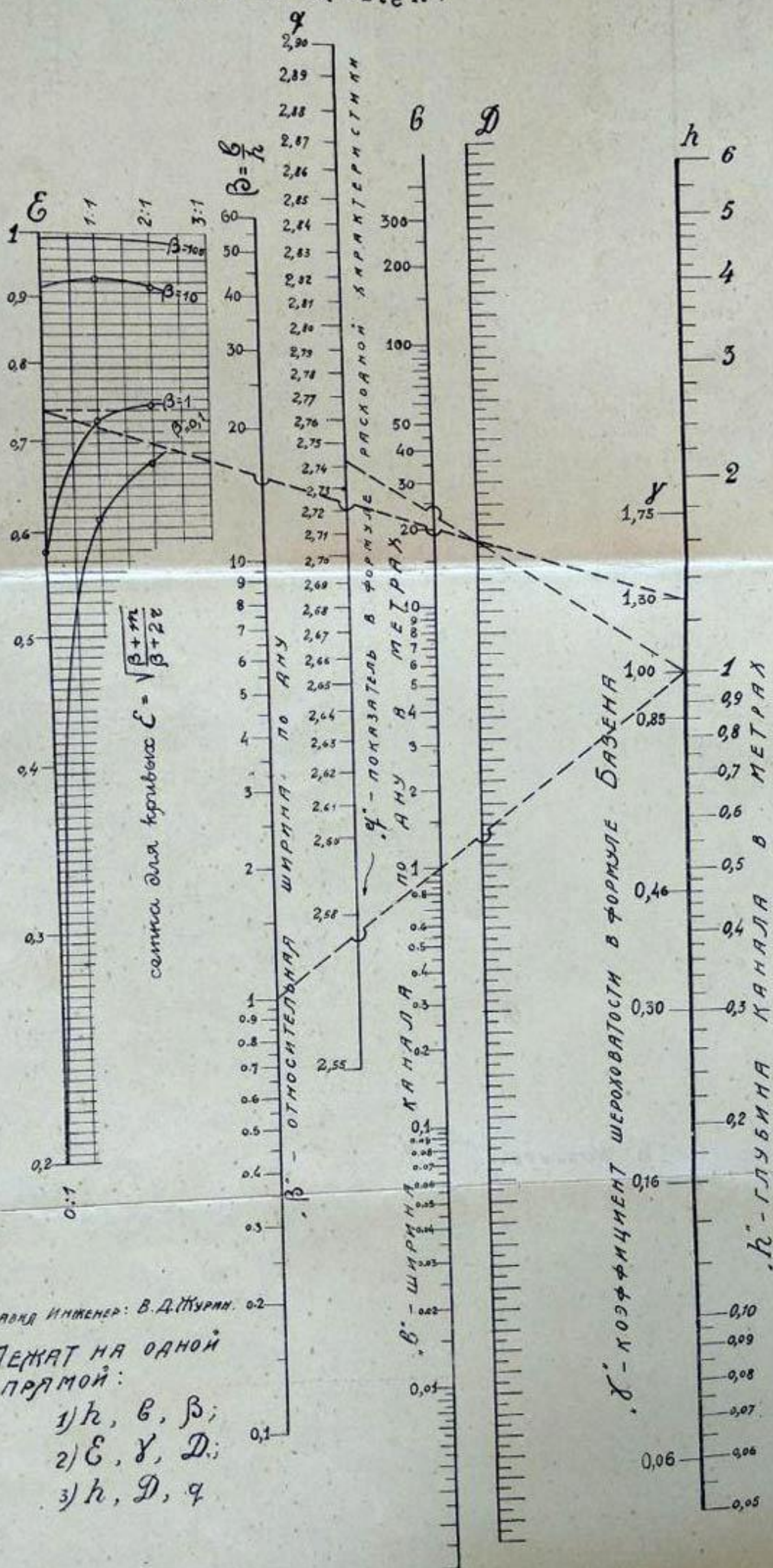
# НОМОГРАММА

ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ( $U$ ) ПО ФОРМ. БАЗЕНА.



# НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ $\varphi$ В ФОРМУЛЕ $K = K_e h \varphi$

Инж. В. Д. Журин



Составил Инженер: В. Д. Журин.

ЛЕЖАТ НА ОДНОЙ ПРЯМОЙ:

- 1)  $h, \beta, \varphi$ ;
- 2)  $\epsilon, \gamma, D$ ;
- 3)  $h, D, \varphi$

# НОММОГРАММА

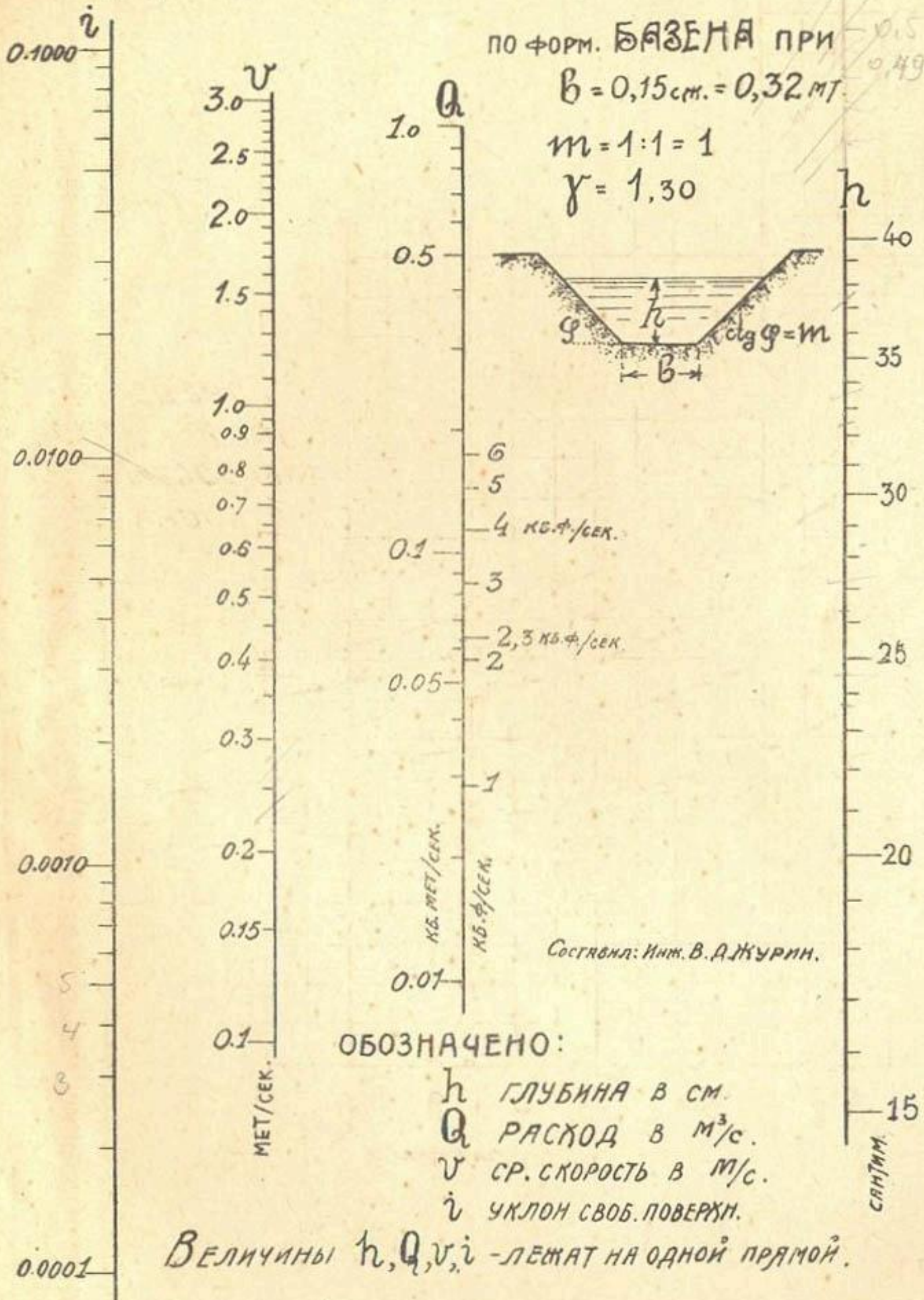
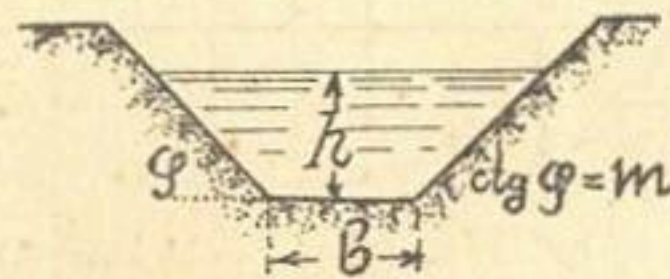
ДЛЯ РАСЧЕТА КАНАЛА ПОСТОЯННОГО ПРОФИЛЯ

ПО ФОРМ. БАЗЕНА ПРИ

$$B = 0,15 \text{ см.} = 0,32 \text{ м.}$$

$$m = 1:1 = 1$$

$$\gamma = 1,30$$



К ст. В. Д. Журина

ЧЕРТ. № 11.

