

# 下水道網的水力計算

A. A. 卡 尔 平 斯 基 著  
C. B. 雅 可 甫 列 夫

城 市 建 設 出 版 社

## 內 容 提 要

这本小册子敘述現代下水管道和渠道的計算新法，这种方法是根據各家所积累的理論与实验資料而得出的。

本書可供在給水和排水部門內工作的設計者之用。

## 原 書 說 明

書 名 ГИДРОВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ  
КАНАЛИЗАЦИОННОЙ СЕТИ  
著 者 А. А. КАРПИНСКИЙ, С. В. ЯКОВЛЕВ  
出 版 者 ИЗДАТЕЛЬСТВО МИНИСТЕРСТВА  
КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РСФСР  
出版地点 МОСКВА—1955.  
及 日 期

## 下 水 道 網 的 水 力 計 算

謝 錫 爵 張 中 和 合 譯

\*

城 市 建 設 出 版 社

(北京阜外大街)

北京市書刊出版業營業許可証出字 088 号

西四印刷厂印刷 新华書店發行

\*

書号: 064 开本 787×1092 耗 1/32 印張11/16

一九五七年五月第一版

一九五七年五月第一次印刷

印数: 1—2000 册

定价: 0.13 元

# 目 录

1. 摩阻系数  $C$  的确定.....( 1 )
2. 水流的运输能力.....(15)
3. 結論.....(19)

## 1. 摩阻系数C的确定

目前計算下水管道和渠道时系用等速流公式:

$$Q = \omega v \text{ 和 } v = C\sqrt{Ri},$$

式中:  $Q$ ——污水設計流量(立方公尺/秒);

$\omega$ ——水流有效断面面积(平方公尺);

$v$ ——水流流速(公尺/秒);

$R$ ——水流的水力半徑(公尺);

$i$ ——水流的水力坡降;

$C$ ——系数。

系数  $C$  之值,按照 Н. Н. 巴甫洛夫斯基(Павловский)院士的經驗公式來計算:

$$C = \frac{1}{n} \cdot Ry,$$

式中:  $y$ ——指数:

$$\text{当 } R \leq 1, y \approx 1.5\sqrt{n},$$

$$\text{当 } R > 1, y \approx 1.3\sqrt{n},$$

$n$ ——粗糙系数,各家採用 0.013 或 0.014,与管子材料無關。

Н. Н. 巴甫洛夫斯基公式在正方形区域内是正确的,在这种区域内由此公式得出之結果与自然观察甚为符合。

但是近年来對於管内水流的計算出現了有理論根据的关系式。这些关系式(所謂紊流的半經驗理論的对数公式)業經試驗証实 [Г. А. 穆林(Мурин), Ф. А. 舍維列夫(Шевелев)等的著作],並在苏联各家 [А. Л. 阿里叔里(Альтшуль), Г. А. 阿达茂夫(Адамов)] 著作中繼續有所發展。

苏联專家們 [А. П. 瑞格士达(Зегжда), И. И. 阿格罗斯金(Агроскин), А. Д. 阿里叔里] 証明了理論公式也适用于露天河床中的水流。因此, 檢查能否应用現代的紊流半經驗理論来計算下水管道和渠道, 也就有了实际价值。

目前有存在着許多由苏联專家們所研究出来的关于下水道網工作情况的实验資料。А. Я. 米洛維奇教授 (Милович) 和 А. В. 格利楚克工程师 (Гришук) 於 1925—1926 年在莫斯科下水道網上首先进行了这种研究。由 23 次观察中得出了一些水力元素, 其中 12 次屬於磚砌渠道, 其余的則屬於各种断面的陶瓦管。这些研究的結論在設計莫斯科第三期下水道工程时曾予应用。

1940 年 А. А. 卡尔平斯基 (Карпинский) 又对莫斯科的下水道进行了研究, 从各种渠道和管道的 58 次观察中得出了一些資料。

观察时, 在选定的下水道干管管段上測量了水深(充滿度)、流速(用流速仪和浮标)、及污水的温度, 确定了管中有無沉渣及污水中沉淀物質的含量。

分析所收集的材料証实了在下水道網中污水的流动情况是变速流, 更精确地說, 是不稳定流。

將各个管段水流的基本水力元素(流量、流速、充滿度和坡降)与由等速流公式計算所得的水力元素相較, 証明測量所得的流量和流速与由公式計算所得者之比值, 平均等於:

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 直線(过路)的管段, 沒有大的側面支線且無沉渣沉淀者 | 0.96      |
| 同上, 但有沉渣沉淀者                | 0.64      |
| 有轉弯的管段                     | 0.75      |
| 同上, 並有側支線                  | 0.17—0.99 |
| 同上, 並有跌水                   | 1.3—1.5   |

由此可見, 只有在沒有大的側面支線, 同时也沒有沉渣沉淀的直線(过路的)管段中, 污水的流动情况才能假定为等速流。而当

有沉渣沉淀时，管道的宣洩能力就比設計能力大为減低。宣洩能力在轉弯管段中亦会減低，而在某些情況下，在有側面支線的管段中同样也会減低。

下水道網中污水流动情况呈現变速流，主要由於在管道轉弯处和支線連接處形成壅水所引起，在这些地方發生了在設計下水道網時沒有考慮到的局部水头損失。流动的不均匀性也發生在檢查井底槽和管道本身由於施工不慎而引起的缺点處（沉陷、断面縮小等等），而在个别管段中底槽有不同的坡度時也能出現这种現象。

污水中含有各种污物，特別是砂子和其他重物時，对流动情况也有影响。为运输这些物質，污水的水流須消耗一定的能量，並且重物是靠水流沿管道的底槽移动，或借形成推移的砂礫而移动的。在不良的情況下，管道中形成一片連續的砂底。

因此，工作中的下水道網乃是一个复杂的系統，其中水流元素是根据污水流动時發生的情况而不断变化的。

考虑轉弯、匯流等处所發生的局部阻力，可以大为減輕下水道網中污水流动的不均匀性。为保證流动情况較為均匀，还必須合理地設計管網（轉弯處和連結處做成勻調的曲線，在匯流處保證約略相等的流速等等）。

A. A. 卡尔平斯基在分析得出的實驗資料時，应用了現代的液体紊流半經驗理論。實驗点繪於 A. П. 瑞格士达圖解上，該圖与有名的尼庫拉瑞（Никурадзе）圖解相似。A. П. 瑞格士达圖解表征出明槽中污水紊流的基本关系。同时也算出完全光滑的和完全粗糙的渠道之極限雷諾数值，並和实际所得的雷諾数值作了比較。結果确定了大多数實驗点落在平方阻力区域内，而在同一区域内实际的雷諾数值較計算的極限数值为高。由此可見，許多觀察的管道从动水力学方面来看是完全粗糙的。

推导下水道網水力計算的公式时,应用了有名的表示压力管中流速分佈的对数定律的方程式:

$$\frac{v}{v_*} = \frac{2.3}{\kappa} \lg\left(\frac{y}{y_0}\right),$$

式中:  $v$ ——水流断面上任一点的流速;

$v_*$ ——动力流速;

$y$ ——从管壁到該一点的距离;

$y_0$ ——紊流的表征長度;

$\kappa$ ——参数。

当时並採用下列各点,即:對於不受压的明渠和暗渠或管道中的水流,管道的半徑或直徑可用水流的水力半徑来代替,而自由表面对摩阻系数的影响,可用表征对渠壁表面摩阻所起影响的参数来計算。

最后,为下水道網的計算,A.A.卡尔平斯基提出了以下的公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = 4.63 + 4.07 \lg \frac{R}{k_s},$$

式中:  $\psi$ ——摩阻系数;

$R$ ——水力半徑;

$k_s$ ——視管壁材料而採用的当量粗糙度数值,亦即:

陶 瓦 管  $k_s = 0.178$  公分,

混凝土管  $k_s = 0.214$  公分,

磚砌溝道  $k_s = 0.275$  公分。

为計算流速,建議使用公式:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\psi}} \sqrt{2gRi}。$$

將所得的公式与 H. H. 巴甫洛夫斯基院士的公式进行比較,証明两个公式所得的結果相近。这两个公式對於平方区域内水流

的等速紊流情况都有效。

在 1948—1952 年期間，Н. Ф. 費道罗夫(Федоров)在列宁格勒进行了溝管中污水流动方面的研究。試驗是在現有的下水道網和專用設備上做的。試驗的對象有鋼管和鑄鐵管，以及混凝土管渠，其內壁也有光滑的，也有粗糙的。

Н. Ф. 費道罗夫根据其本人的實驗資料，提出了計算下水道的公式：

$$\frac{1}{\sqrt{\psi}} = -2 \lg \left[ \frac{\Delta_{\text{экс}}}{13.68} + \frac{a_2}{Re} \right],$$

式中： $\Delta_{\text{экс}}$ ——当量粗糙度；

$Re$ ——雷諾数值；

$a_2$ ——表征污水中有悬浮物和表征管子材料的参数。

此公式就其本身結構而言，無論在平方区域或过渡区域内都应当是正确的。用此公式計算 $\psi$ 值时，必須有 $\Delta_{\text{экс}}$ 值与 $a_2$ 值。但在Н. Ф. 費道罗夫的著作中仅举出鑄鐵管和鋼管的 $\Delta_{\text{экс}}$ 与 $a_2$ 的数值，而對於下水道網主要採用的混凝土管和陶瓦管，以及磚砌渠道，这些数值沒有举出。所以設計管網时不能使用这个公式。

这公式在使用时也不方便，因其中表征水的粘滯性的一項包含雷諾数 $Re$ ，此数在解答問題时是未知的。

其他專家們：Б. О. 鮑圖克(Ботук)，С. К. 柯洛巴諾夫(Колоба-нов)，Н. А. 馬司林尼科夫(Масленников)，Г. Л. 扎克(Зак)，Г. Г. 施果林(Шигорин)，С. В. 雅可夫列夫(Яковлев)也从事於下水道網工作的研究。

为了闡明關於設計下水管道与渠道时可否使用Н. П. 巴甫洛夫斯基公式的問題，特制出圖解(圖 1)。圖中以縱軸代表系数 $C$

註 1 實驗資料系 А. Я. 米洛維奇，А. В. 格利楚克，А. А. 卡尔平斯基，Н. А. 馬司林尼科夫，Н. Ф. 費道罗夫 С. В. 雅可夫列夫等人所得。

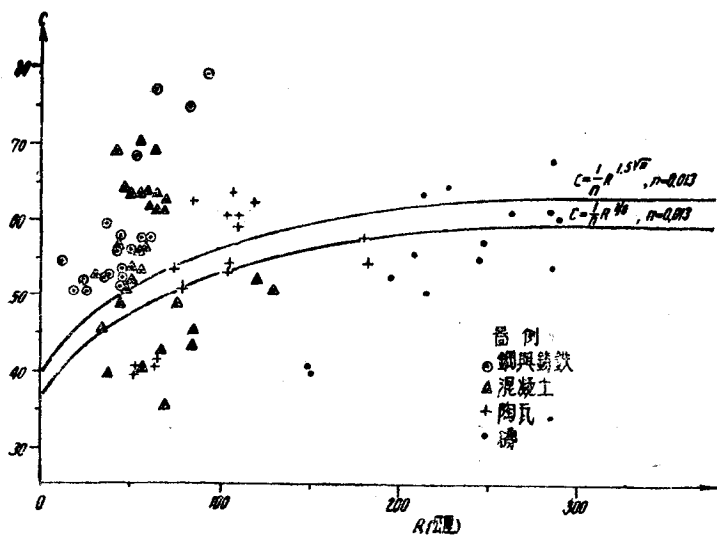


圖1 系数  $C$  与水力半径  $R$  的关系图解

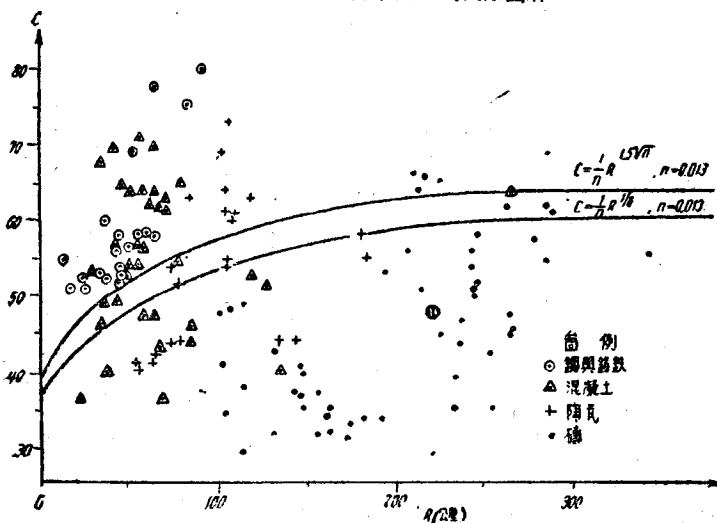


圖2 系数  $C$  与水力半径  $R$  的关系图解

值,而以橫軸代表水力半徑  $R$  值。圖中繪出各研究家(註1)所得出的實驗點,以及當粗糙系數為常數,即  $n=0.013$  時,按照 H. H. 巴甫洛夫斯基公式和曼寧 (Манинг) 公式計算所得的  $C$  值曲線。而對於沒有沉渣沉淀和壅水的管網各段上所得出之各點也制出同樣的圖解(圖2)。由這些圖解中可見,各實驗點分散得很遠,且管壁和渠牆的粗糙度為一變數。

在圖解(圖3)中已有的實驗資料繪於坐標  $C$  和  $\lg Re$  上;而這裡所繪出者為表征光滑區域的直線,且遵照 A. Д. 阿里叔里提出的露天河床的理論關係式:

$$C = 20 \lg \frac{Re}{\frac{\Delta_{\text{шкк}}}{R} \cdot Re + 10}$$

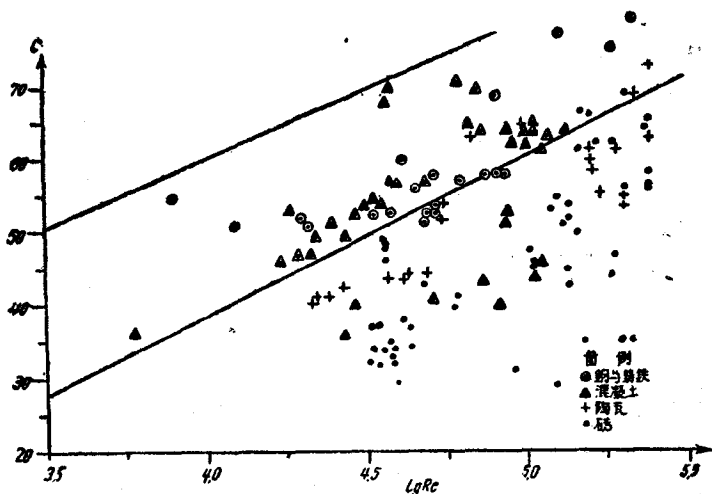


圖3 系數  $C$  與  $\lg Re$  的關係圖解

如果在此方程式中,乘積  $\frac{\Delta_{\text{шкк}}}{R} Re > 100$ ,則可簡化如下:

$$C = 20 \lg \frac{R}{\Delta_{\text{экс}}},$$

而在計算的結果中誤差不致超過 4%。

圖 3 中繪有一補助線，其方程式為  $\frac{\Delta}{R} Re = 100$ 。

由圖 3 中可見大批主要的點在平方區域內，但有相當多的點落在過渡區域內。這些點是位於光滑地帶的曲線與補助線之間的。且基本上屬於金屬管和混凝土管。因此分析現有的各實驗點證明，污水在管道和渠道中的流動情況不僅處於平方區域內，且亦在過渡區域內。

關於污水的流動是否可應用現代的紊流半經驗理論的問題，也是重要的。摩阻方程式有以下的一般形式：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = f \left[ \lg \left( \frac{\Delta_{\text{экс}}}{R}; Re \right) \right].$$

通常對於任何液體的流動，這個方程式都被認為是正確的。已知由實驗資料中得出的參數，用反算的方法找出任何材料的管子的  $\Delta_{\text{экс}}$  值。如果沒有證明對數定律應用到液體流動在任何情況下都是正確的。這樣處理研究的方式就不是完全有根據的。此方程式中有三個未知數，其中只有兩個 ( $\lambda$  和  $Re$ ) 可由實驗中得出。

對數關係式對於污水流動的正確性只可用間接的辦法來證明。為了分析，採用了 Н. Ф. 費道羅夫的各實驗點；這些點很明顯地具在平方區域內，由 Н. Ф. 費道羅夫在粗糙的混凝土水槽上得出來的。

對平方區域而言，摩阻方程式可化為以下的一般形式：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = B \lg \frac{R}{\Delta} \quad \text{或} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = B \lg R - B \lg \Delta,$$

亦即 
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = B \lg R + C_1,$$

式中:  $C_1 = -B \lg \Delta$ 。

这在坐标轴  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$  和  $\lg R$  上是一直線方程式。

如果这个对数关系式对計算下水管道是正确的, 則所有得自完全粗糙的管子的实验点(即在平方区域内), 如由圖解(圖 4)中所得者, 应为直線形式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = B \lg R + C_1,$$

这也可証明上述規律的正确性。

上述的分析証明, 在目前对于平方区域使用的公式, 並不完全反映了下水道網工作的实在情况。

因此在某些情况之下(見以下), 使用無論在平方区域, 过渡区域和光滑区域内都正确的綜合公式是较为合理的。

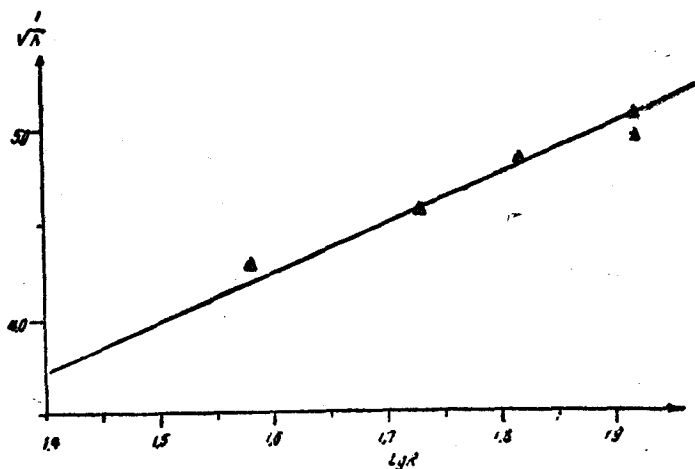


圖 4  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$  与  $\lg R$  的关系圖解

上述的 A. Д. 阿里叔里公式是屬於綜合公式一类的。但是 C. B. 雅可夫列夫所完成的已有試驗点的整理工作証明，此公式如不經相当改正，則不能适用於含有杂物的污水的流动。按照 A. Д. 阿里叔里公式的型式，C. B. 雅可夫列夫提出了計算下水道溝管的方程式：

$$C = 24.7 \lg \frac{Rv}{v\varepsilon + 10}, \quad (1)$$

式中：  $v$ ——流速(公厘/秒)；

$R$ ——水力半徑(公厘)；

$\varepsilon$ ——折算粗糙度；

为了將此公式与試驗資料对照，繪制坐标为  $C$  及  $\lg \frac{Rv}{\varepsilon v + 10}$  的圖解(圖 5)。

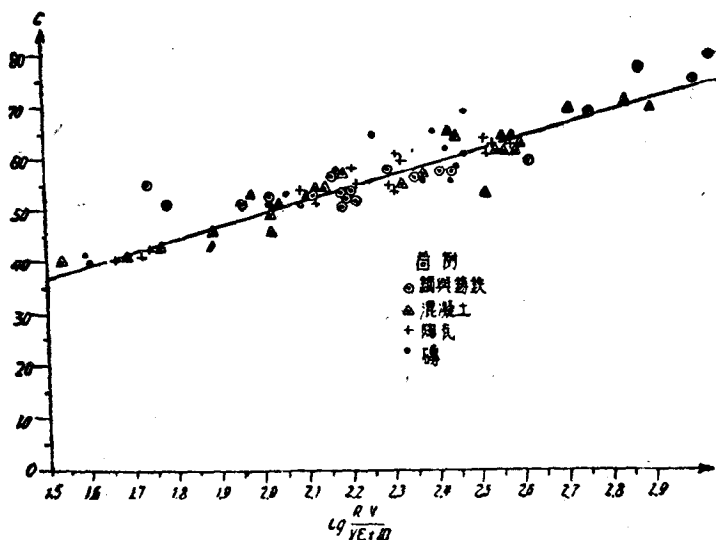


圖 5 系数  $C$  和  $\lg \frac{Rv}{\varepsilon v + 10}$  的关系圖解

此处只应用了研究家們对沒有泥沙沉淀的溝槽和管道的观察所得的試驗点。

圖解証實了提出的公式的正确性,因为對於每一組試驗,同一材料的管子  $\varepsilon$  值为常数。

公式便於应用,因为其中就包含着在解决任何問題时都可为已知的参数;亦即:速度  $v$ , 採用不小於运沙流速,而折算粗糙度  $\varepsilon$  則为由試驗得到的数值。

根据現有試驗資料的分析,С.В.雅可夫列夫提出採用下列  $\varepsilon$  值:

極其光滑,仔細地燙光的混凝土溝管或渠槽用  $0.1 \sim 0.2$ ;

使用了一些时期的粗糙混凝土管用  $0.8 \sim 1.1$ ;

新的鋼管用  $0.1 \sim 0.2$ ;

鑄鐵管和旧鋼管用  $0.6 \sim 0.9$ ;

陶瓦管用  $0.8 \sim 1.0$ ;

磚砌渠道  $1.3 \sim 1.5$ 。

由於已有的試驗資料不多,上述  $\varepsilon$  值应認為是預測的,並在今后的研究工作过程中加以修正(註1)。

С. В. 雅可夫列夫按照綜合公式在不同  $\varepsilon$  值 ( $0.17$ ;  $0.5$ ; 及  $1.0$ ) 时,及按照巴甫洛夫斯基公式在  $n = 0.014$  时,做出下水道管網坡度的計算,以資比較(表1)。

这些計算也令人信服地說明,在計算下水道網时,必須定出不同材料管道的不同粗糙系数值,或在利用綜合公式时定出各种不同的  $\varepsilon$  值。

提出的公式与 Н. Н. 巴甫洛夫斯基公式一样,在直接使用时很复杂。所以,应作者之請,Г. С. 赫文斯基 (Хованский) 制成了方便的諾模圖,为此,公式(1)化为下列形式:

---

註1: 如果所試驗的管子系沒有沉淀者,这点就更加需要。

管 道 的 比 較 水 力 計 算

表 1

| 管 段   | $D$<br>(公厘) | $\frac{H}{D}$ | $\frac{R}{D}$ | $R$<br>(公厘) | $v$<br>(公厘/秒) | $R \cdot v$ | $I = \frac{v^2}{C^2 R}$ |                    |                    | $n=0.014$ 時接<br>$C = \frac{1}{n} R^y$ 公式<br>計算之 $I_0$ |
|-------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|-------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------------------------|
|       |             |               |               |             |               |             | $\varepsilon=0.17$      | $\varepsilon=0.50$ | $\varepsilon=1.00$ |                                                       |
| 4~5   | 250         | 0.40          | 0.2142        | 50.5        | 700           | 35350       | 0.0025                  | 0.0039             | 0.0042             | 0.0045                                                |
| 5~6   | 250         | 0.45          | 0.2001        | 57.6        | 700           | 40320       | 0.0022                  | 0.0034             | 0.0036             | 0.004                                                 |
| 6~7   | 250         | 0.50          | 0.2500        | 62.5        | 720           | 45000       | 0.0021                  | 0.0032             | 0.0033             | 0.004                                                 |
| 7~8   | 300         | 0.45          | 0.2001        | 69.2        | 720           | 49820       | 0.0019                  | 0.0027             | 0.0030             | 0.0035                                                |
| 8~9   | 300         | 0.46          | 0.2070        | 70.0        | 730           | 51100       | 0.0019                  | 0.0027             | 0.0029             | 0.0035                                                |
| 9~10  | 350         | 0.46          | 0.2070        | 80.0        | 750           | 60000       | 0.0016                  | 0.0022             | 0.0025             | 0.003                                                 |
| 10~11 | 900         | 0.80          | 0.0042        | 274.0       | 810           | 221940      | 0.0004                  | 0.0005             | 0.0005             | 0.0007                                                |
| 11~12 | 900         | 0.80          | 0.0042        | 270.0       | 810           | 218700      | 0.0004                  | 0.0005             | 0.0005             | 0.0007                                                |

$$C = 24.7 \lg \frac{R}{\varepsilon + \frac{10}{v}}. \quad (2)$$

令  $\frac{10}{v} = \Delta\varepsilon,$

則  $C = 24.7 \lg \frac{R}{\varepsilon + \Delta\varepsilon}. \quad (3)$

為公式 (3) 繪制諾模圖 (圖 6), 圖中有 3 根平行標尺  $R, C, \varepsilon + \Delta\varepsilon$ 。在同圖中用  $v$  及  $\Delta\varepsilon$  值作出一雙標尺。

應用雙標尺和諾模圖, 很容易看出流速對  $C$  的影響, 從雙標尺上可知,  $v$  自 0.4 變至 1.5 公尺/秒時,  $\Delta\varepsilon$  值在 0.025 至 0.007 的範圍內變化。

**例題** 已知:  $R = 0.5$  公尺;  $\varepsilon = 0.10$  公厘;  $v = 0.4$  公尺/秒。求考慮及不考慮流速影響的  $C$  值。

自雙標線上得出  $\Delta\varepsilon = 0.025$  公厘, 算得  $\varepsilon + \Delta\varepsilon = 0.1 + 0.025 = 0.125$ ; 按諾模圖求出  $C = 89.0$ 。如果取  $\Delta\varepsilon = 0$ , 則得出  $C = 91.6$ 。誤差為 3%。諾模圖顯然地說明 (試驗研究也同樣說明, 見上述圖解) 了污水流動情況主要是處於平方區域內, 而且僅有在光滑管子中, 或者當流速不大時, 流動情況才處於過渡區域或甚至接近光滑區域。

同時應注意, 當不用綜合公式而用平方公式時, 誤差甚至沒有這樣大, 一般在 4% 以內。因此, 在計算  $\varepsilon$  值足夠大的混凝土及陶瓦管, 以及磚砌渠槽時, 亦可應用僅在平方區域內為正確的公式, 亦即 H. H. 巴甫洛夫斯基公式或如下公式:

$$C = 24.7 \lg \frac{R}{\varepsilon}.$$

而在計算金屬管, 及光滑而仔細變光的混凝土管時, 只應使用

綜合公式。(註1)

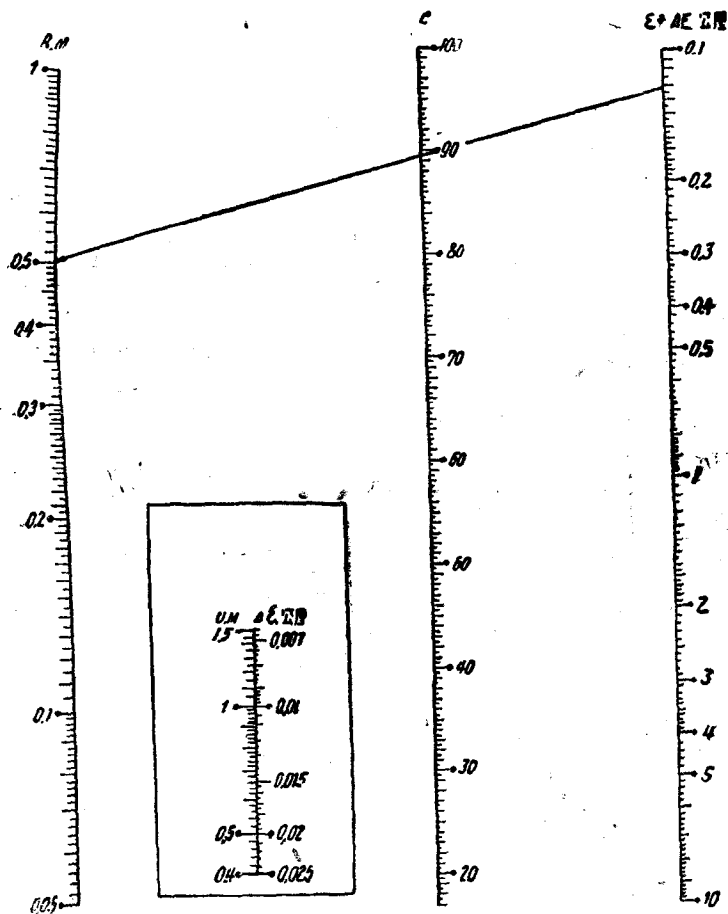


圖 6 按公式  $C = 24.7 \lg \frac{Rv}{Ev + 10}$  決定係數  $C$  的諾模圖

註 1 參加繪制圖解及整理試驗資料工作的有莫斯科市執行委員會莫斯科城市建設工程師學院學生 Ю. М. 拉斯克夫(Ласков)及 Н. Д. 斯基爾德夫(Скирдов)二人。