

泥沙研究

第二卷 第一期

泥沙研究工作組編輯

1 9 5 7

水利出版社出版

泥沙研究 第二卷 第一期

編輯者	泥沙研究工作組
出版者	水利出版社
發行者	新華書店
印刷者	水利出版社印刷廠

本期印數1,400 本期定價1.2元

62

N1

泥 沙 研 究

第二卷 第一期

1957年 6 月

目 錄

有压管道內渾水的运动及其計算方法.....	В.С. 克諾罗茲 (1)
明渠水力輸送及其計算.....	В.С. 克諾罗茲 (30)
論泥沙懸浮功問題.....	М.А. 費里堪諾夫 (49)
懸沙运动理論.....	Ф.И. 弗蘭克里 (52)
懸移泥沙的流量的精确公式.....	К.К. 奥尔罗夫 Б.А. 費德曼 (56)
渠道懸移質含沙量的經驗关系式.....	范家驊 (59)
关于弯道上水流的問題.....	技術科学碩士 П.А. 張克因 (63)
春洪与淺灘.....	С.В. 路撒可夫 (69)
关于沙浪的运动.....	Ф.И. 費蘭克里 (73)
造床过程的模型律.....	И.В. 叶吉札洛夫 (76)
水庫修建后發生的河床变形.....	В.Н. 岡查洛夫 В.И. 波尔达夫采夫 (79)
在水平运动的流体介質中重的顆粒沉降的計算.....	苏联技術科学候補博士 Д.П. 別克列歇夫 (85)
泥沙水力学中需要研究的問題.....	Е. J. 卡尔遜 С. R. 米勒 (91)
苏联河床演变文献目錄.....	謝鑒衡 (112)

有压管道内浑水的运动及其计算方法

ДВИЖЕНИЕ ГИДРОСМЕСЕЙ В НАПОРНЫХ

ТРУБОПРОВОДАХ И МЕТОД ИХ РАСЧЕТА

В.С. 克諾羅茲

1. 前 言

水力輸送，即借水流移運固體物質，是在建築工程以及許多工業部門中已得到廣泛發展與使用的水力機械化施工的基本部分。

在蘇聯以及在外國，水力輸送已經應用極廣，並成為機械化施工的獨立部門。

選礦廠的廢礦石（尾礦砂），熱能廠和電廠鍋爐房的煤渣，煉鋼廠軋壓機下的鐵屑等，都需要排除，通常只有在利用水力輸送法時，這些問題才算得到最好的解決。在蘇聯的許多企業中，已採取了這一類利用水力的方法。

顯然，在開采石炭等事業中，在決定水力機械化施工的規模和範圍方面，水力輸送應當起很大的作用。

應該特別指出，水力機械化施工可能的有效使用範圍，特別是水力輸送，正成為日益廣泛。

但是渾水運動問題，尚未得到在理論方面的解決，又缺乏實際工作者制訂的標準規範，所以水力機械化施工的合理設計和計算就發生困難。

為了實用，首先需要適當的關係式，用以計算水管中渾水運動的損失水頭，適合於各種實用流速數值，以及水中固體物質的各種含量的情況。

但是由於渾水運動的複雜性，此問題的理論解決，到現在還遇到未曾克服的巨大困難。因此，在水力輸送問題研究的現階段，最可靠的而且最迅速地達到目的方法，是廣泛的試驗研究和其後對試驗資料的必要的分析。

根據上述任務，為了進行水力輸送問題的試驗研究，作者在列寧格勒城水工科學研究院水力樞紐和泥沙試驗室設計並建成了兩套試驗設備（圖1和圖2）。利用這些設備，作者用直徑250公厘的水管，進行了各種渾水運動的研究。

根據這些研究的結果，以及所得試驗資料的分析，現時已能清楚地想像有壓管道中渾水運動狀態，擬定其計算方法，並且按照以動力相似理論為根據的方法，把所有的實驗資料綜合起來。這些資料雖然還不多，但是用所有已經作成的綜合圖解形式，就能夠在水管直徑和沙料粒徑的廣大變化範圍內，給予實際工作者以所需要的可靠的計算參考數。以下我們就敘述從這些研究所得出的成果和結論。

2. 有壓輸泥管內渾水運動的特性

我們根據布拉赤（N.S. Blatch），奧布賴恩（M.P. O'Brien），豪厄德（G.W. Howard），和本文作者的觀察，來判斷有壓管道內渾水運動的特性。

布拉赤〔注1〕的研究是用黃銅管和鍍鋅鐵管，管子內徑各為25公厘（1英寸）。為了直接觀

〔注1〕 N. S. Blatch, Works for the purification of the water supply of Washington, Transactions of Amer. Soc. civ. Eng. 1906, December, pp. 400—408,

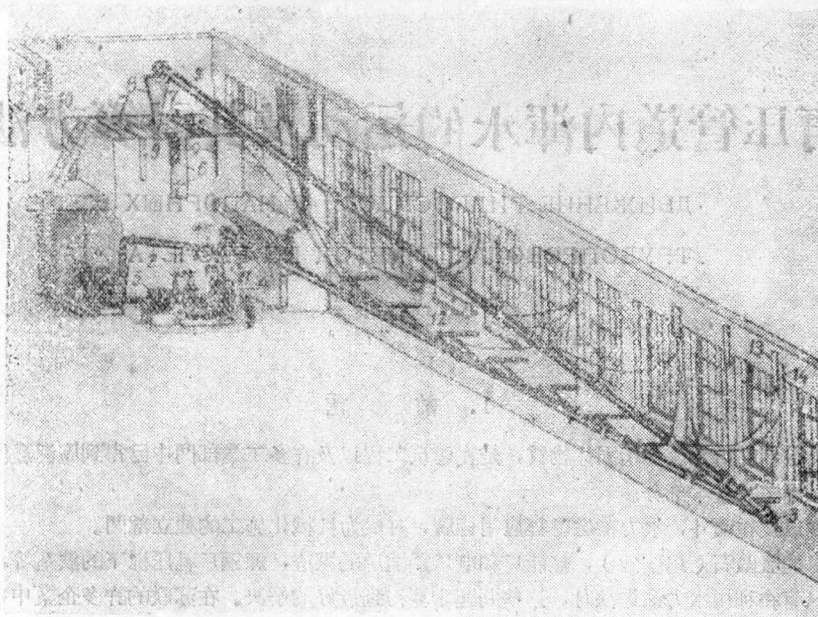


圖 1 研究水力輸送固體物質的試驗設備（大型）

- | | | |
|----------------------|-----------------------|------------------|
| 1—率定槽， $W=4.5$ 立方公尺； | 6—箱，在此取泥漿樣品； | 11—活動門； |
| 2—聚水槽， $W=13$ 立方公尺； | 7—水槽開門手輪； | 12—壓力容器； |
| 3—試驗管道； | 8—有活動接合的支管，用以把水引入率定槽； | 13—開啟式水銀測壓計； |
| 4—“維爾夫列依”抽水系統； | 9—指示水面的玻璃管； | 14—水銀比壓計； |
| 5—電動機， $W=75$ 千瓦特； | 10—試驗系統的進水管； | 15—從聚水槽排出固體物質的孔。 |

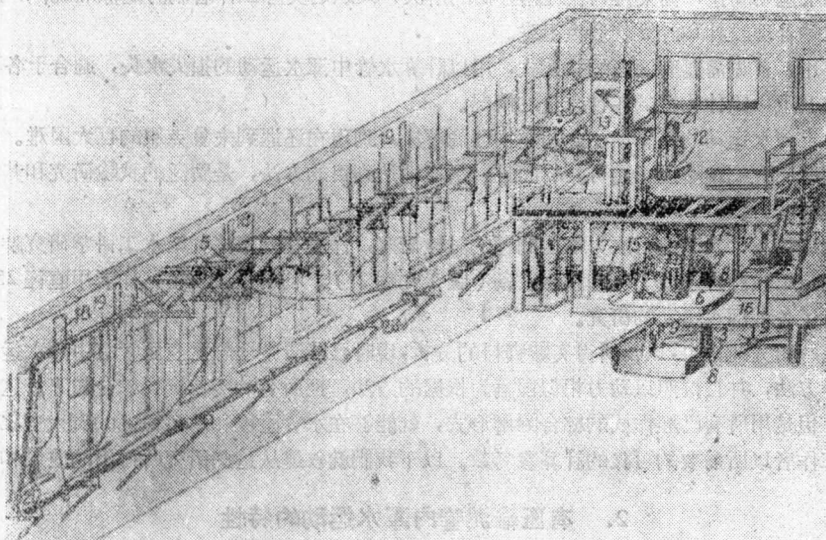


圖 2 研究水力輸送固體物質的試驗設備（小型）

- | | | | |
|-------------|------------------------|--------------|-----------------|
| 1—率定槽； | 7—電動機； | 12—採樣筒和台秤； | 18—水銀比壓計； |
| 2—蓄水槽； | 8—抽水機進水管； | 13—通風的鐘形調整器； | 19—開啟式水銀測壓計； |
| 3—聚水坑； | 9—拌和機； | 14—排水管道； | 20—壓力容器； |
| 4—試驗管道； | 10—拌和機節速器； | 15—率定槽排水管； | 21—瀉出渾水樣品容器的龍頭； |
| 5—可改變比降的水槽； | 11—有活動接合的支管，用以把水引入率定槽； | 16—試驗系統的進水管； | 22—配電盤。 |
| 6—離心抽水機； | | 17—指示水面的玻璃管； | |

察水流和泥沙运动的特性，在两个试验水管中，曾安装了不长的玻璃段。

奥布赖恩[注2]的浑水运动试验，是用内径50公厘（2英寸）和75公厘（3英寸）的铁管[柏克立试验（Бекелейские опыты）]。浑水运动特性的观察，是用装在2英寸管子上的玻璃管。

豪厄德[注3]进行浑水运动特性的观察，是用内径100公厘（4英寸）的有压铁管，也在试验管道上装有专门的玻璃管。

在我们的研究中，观察内径10英寸（250公厘）钢管内浑水运动特性，是用特别安装在管壁上的玻璃窗，如图3所示。

根据上列各家的观察，浑水运动的特性，在原则上可叙述如下：

浑水运动的状态可分为三类：

1. 高流速状态，
2. 过渡状态，
3. 低（小）流速状态[注4]。

第一种状态（即高流速状态）是，在浑水运动中的固体物质，全部处于悬浮状态。此时的流速称为临界流速。

按照我们的肉眼观察以及一些测量，“接近”临界流速的浑水水流状态是，水流下层内固体物质的含量最大，上层内含量最小。

在流速超过临界流速时，固体物质沿水管断面垂直线上的分布更加均匀，虽然在很长时间内水流底部的含沙量还是最大的。

作为高流速状态下限的临界流速，是过渡状态的上限；过渡状态是，一部分的固体颗粒在水流中呈悬浮状态而移动，同时另一部分（最粗的部分）系沿水管底部移动。此时在过渡区内，有时可以看到，正如我们的观察指出，固体颗粒在水管底部，堆积成小沙丘形状，小沙丘随时形成，随时逐渐地或是在一刹那間被水流冲走。这种状态的不稳定性，就是它的特性之一。此外应注意到，正如布拉克和我们的试验所指出的，这种情况在固体颗粒的组成不均匀时，特别显著。

第三种状态（即低流速状态）是，在水流内含有固体颗粒时，水管断面的底部为淤积的固体颗粒所复盖。浑水在呈部分淤积状态的水管中流动，此时真实流速大于平均流速，而平均流速（即在计算时用 $\frac{1}{4}\pi D^2$ 除流量所得的商）成为虚拟流速。此时流动的浑水，保护着管壁和淤积的底部。浑水中固体颗粒的被输送，是一部分呈悬浮状态，另一部分沿着沙底而进行。这部分沿管底移动的固体颗粒，基本上成为高度可以变化的沙丘形式。从安装玻璃管观察浑水运动，就可看到淤积物厚度随时改变，淤积物顶部高程大约接近某一平均值而变动，因此，在“低”流速区，有压浑水的水力状态是不稳定的。根据对于浑水运动的观察，在各种流速和水中固体颗粒的各种含量时，我们得到了关于水流状态的同一概念。必需指出，在中流速和低流速状态之间，没有明显界限（流速特性）；在某种流速“范围”内，这两种状态常常互相转换。

为了判断在有压水管中固体颗粒沿水流断面分布的特性，我们根据在直径为250公厘的铁管内所

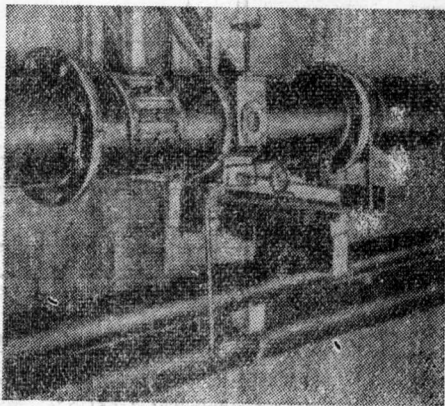


图3 在管道上所开的孔，用以观察浑水的运动，和装置测验含沙量的仪器

[注2] Morrrough P. O'Brien and Richard G. Folsom, The transportation of sand in pipe lines, University Of California Publications in Engineering, Vol. 3, No. 7, pp. 343-384.

[注3] G. W. Howard, Transportation of sand and gravel in a four-inch pipe, Proceedings Amer. Soc. Civ. Eng., 1938, September, No. 7, pp. 1377-1391.

[注4] 这里和下文所说的平均流速，系指以输水管断面面积（即 $\omega = \frac{1}{4}\pi D^2$ ）除浑水流量所得的商数。

Qdf75/10

進行的測量，繪制圖 4 和 5〔注 5〕。圖中有表示渾水水流特性的必要資料。

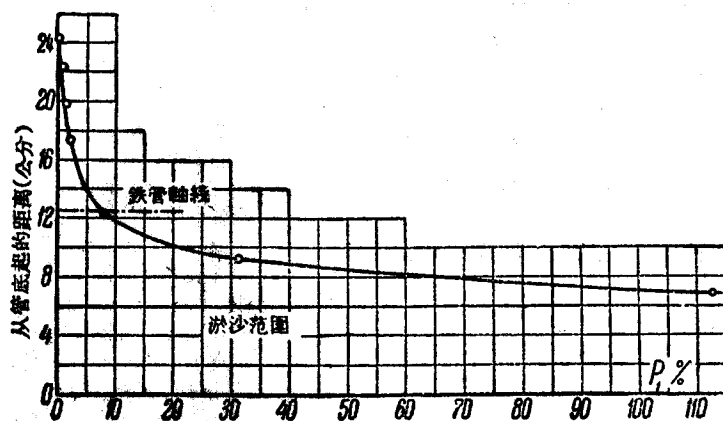


圖 4 在直徑 $D=250$ 公厘鐵管橫斷面垂直直徑上的含沙量分布曲綫

沙的特征: $\gamma_T=2.71$; $d_{op}=0.18$ 公厘; $\omega_{cp}=2.57$ 公分/秒。渾水的特征: $\gamma_{OM}=1.045$; $P_1=8.5\%$ (按重量計); $t=37.5^\circ\text{C}$ 。管底淤沙 $h=6.0$ 公分。

渾水虚拟流速 $v_0=Q/F=1.62$ 公尺/秒, 渾水真实流速 $v_{cp}=2.0$ 公尺/秒。 $I=0.0189$ 。

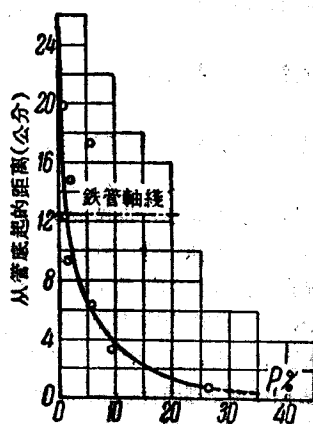


圖 5 在直徑 $D=250$ 公厘鐵管橫斷面垂直直徑上的含沙量分布曲綫

沙的特征: $\gamma_T=2.71$; $d_{cp}=0.18$ 公厘; $\omega_{cp}=2.57$ 公分/秒。

渾水的特征: $\gamma_{OM}=1.032$; $P_1=6.2\%$ (按重量計); $t=34.5^\circ\text{C}$ 。沒有淤沙。 $v_{cp}=2.86$ 公尺/秒。
 $I=0.0279$ 。

圖 4 是属于在管底有高 6 公分的淤沙的情况 (“低” 流速状态)。

圖 5 表示, 在渾水中固体物質呈全部懸浮状态而其流速稍微超过臨界流速时, 沿水管断面垂直直徑上含沙量的分布。

〔注 5〕这里不能介绍这些測量的方法和采样器的構造。我們僅僅說明, 渾水的采样器是弯成直角的管子, 放在水流里就正像在測流速时把畢托管放在水流里一样。在采样器的進水管里, 适当的阻力, 保持适当的渾水流速。

3. 水管中浑水运动时水头损失变化的特性

关于水管中水头损失变化特性的研究，目前有大量试验资料。我们在这里，把这些资料，按照浑水运动的各种情况，和水中固体颗粒的各种含量，画出图来表示单位长度上的水头损失（比降）与平均流速的关系〔注6〕。

图6、7、8、9、10和11中所表示的是布拉赤用镀锌铁管和黄铜管试验所得的资料。管子直径为25公厘，沙子平均粒径为0.7和0.2公厘。这些资料发表于1906年。我们现在的分析中，引用这些资料。

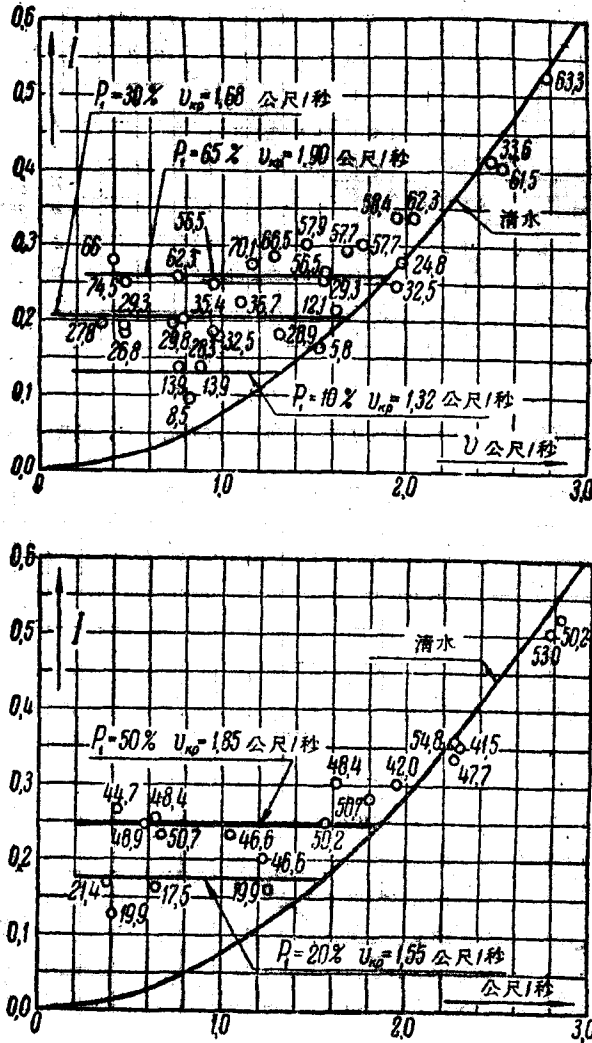


图6和7 $I=f(v)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.7$ 公厘, $\omega_{cp}=7.4$ 公分/秒。1906年布拉赤的试验。用镀锌铁管, $D=25$ 公厘。

〔注6〕在各图中，浑水运动的水头损失，都用所输送浑水的水柱高度来表示。

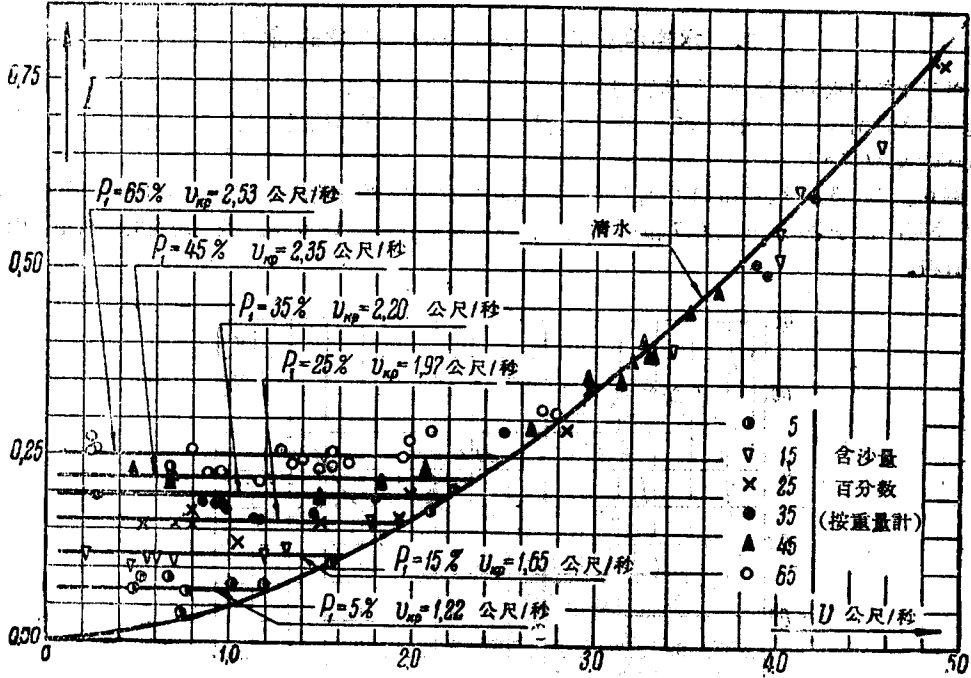


圖 8 $I=f(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.7$ 公厘, $\omega_{cp}=7.4$ 公分/秒。1906年布拉赤的試驗。用黃銅管, $D=25$ 公厘。

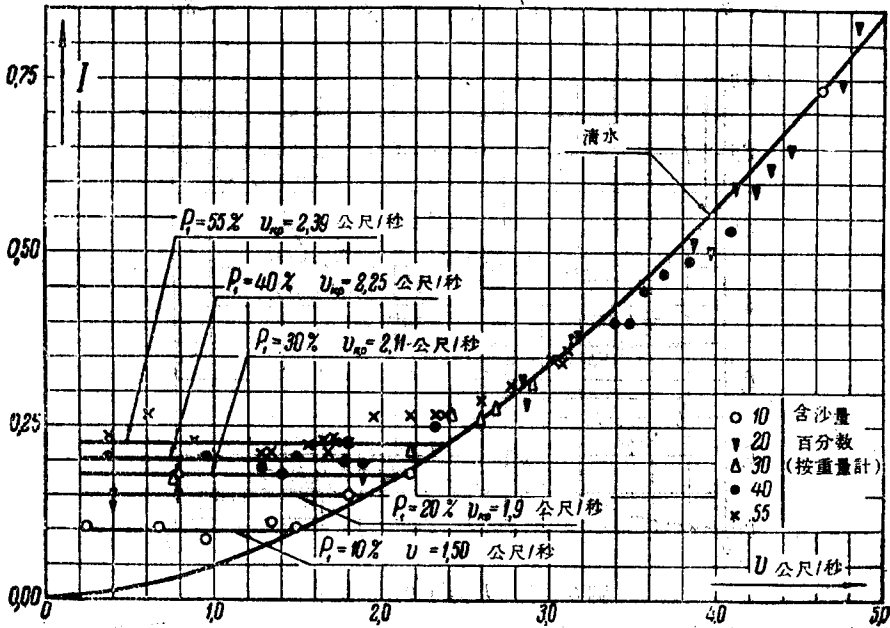


圖 9 $I=f(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.7$ 公厘, $\omega_{cp}=7.4$ 公分/秒。1906年布拉赤試驗。用黃銅管, $D=25$ 公厘。

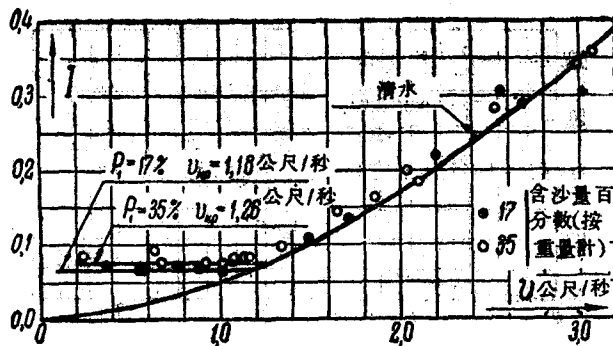
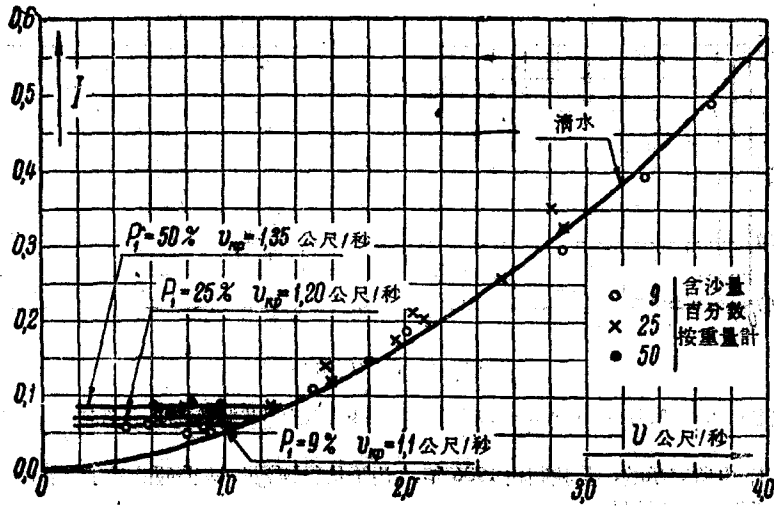


圖10和11 $I=f(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.2$ 公厘, $\omega_{cp}=2.42$ 公分/秒。1906年布拉赤試驗。用黃銅管, $D=25$ 公厘。

圖12和13中所表示的, 是我們分析 ЧИИВТ 1936年試驗資料的結果。当时使用平均粒徑为 0.47 公厘的沙子, 在直徑为 130 公厘的鉄管内進行試驗。

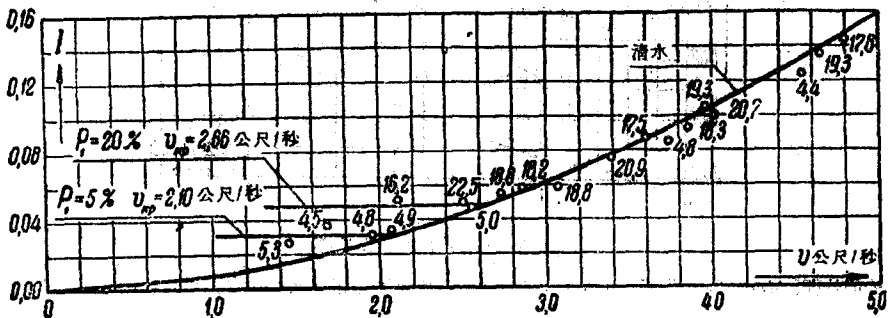


圖12 $I=f(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.47$ 公厘, $\omega_{cp}=5.9$ 公分/秒。1936年帕尔买夫斯基試驗。用鉄管, $D=130$ 公厘。

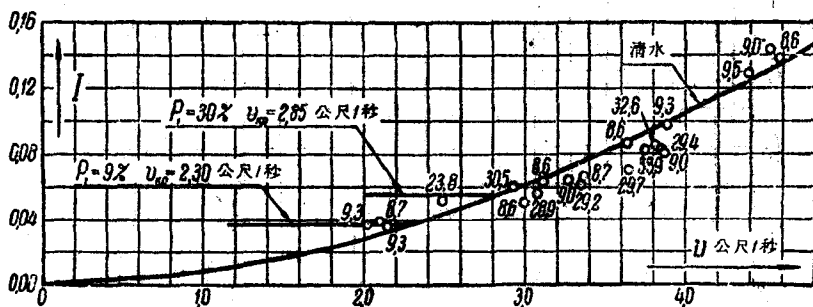


圖13 $I=f(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.47$ 公厘, $\omega_{cp}=5.9$ 公分/秒。1936年帕尔契夫斯基試驗。用鉄管, $D=130$ 公厘。

圖 14 和 15 中所表示的, 是我們在 1936 年, 用平均粒徑为 0.42 公厘的砂子, 在直径为 250 公厘的鉄管内, 所作試驗的結果。

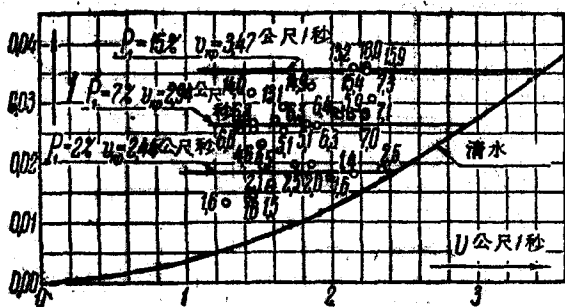


圖14 $I=f(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.42$ 公厘, $\omega_{cp}=5.2$ 公分/秒。1936年克諾罗茲的試驗。用鉄管, $D=250$ 公厘。

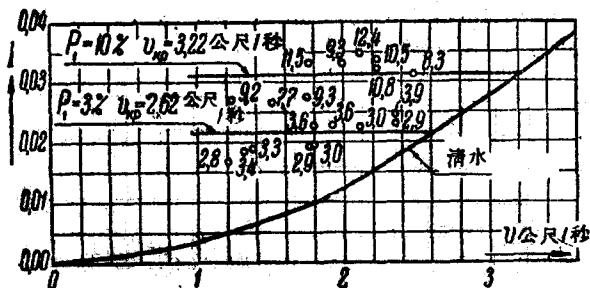


圖15 $I=f(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.42$ 公厘, $\omega_{cp}=5.2$ 公分/秒。1936年克諾罗茲的試驗。用鉄管, $D=250$ 公厘。

圖 16 和 17 所表示的, 是奥布賴恩在 1937 年發表的試驗結果。这些試驗 (柏克立試驗) 是用河沙, 在直径 3 英寸和 2 英寸的兩道鉄管内進行的。

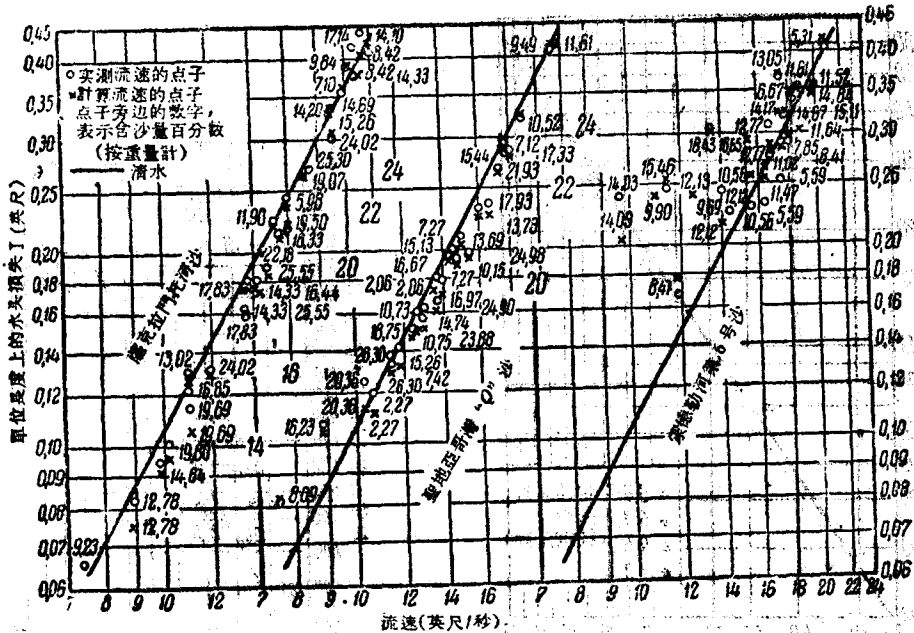


圖16 $I=f(v)$ 的关系

奧布賴恩的試驗(柏克立試驗)。用鉄管, $D=3$ 英寸。

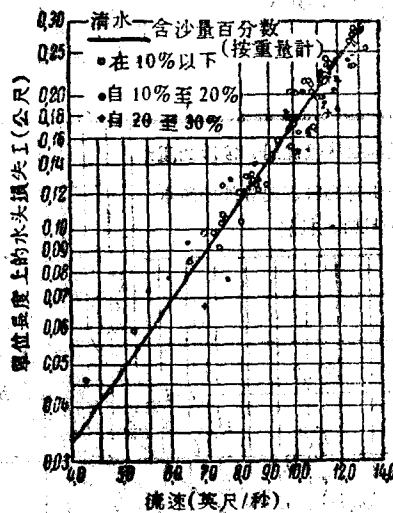


圖17 $I=f(v)$ 的关系

奧布賴恩的試驗(柏克立試驗)。用 $d=2$ 英寸的鉄管, 用薩克拉門托河沙。

此外, 在奧布賴恩的报告中, 并引用了两种資料。一种是米克莫 (Mikumo) 用銅礦沙在 1 英寸直徑的管子中所作試驗的資料。另一种是几只吸泥船的輸泥管, 在吸泥时的实測資料, 这包括“薩克拉門托 (Sacramento)”和“季尔斐特 (Гульfort)”兩只吸泥船的 24 英寸直徑輸泥管和哥倫比亞河上吸泥船的 24 英寸直徑輸泥管的資料 (見圖 18、19 和 20)。

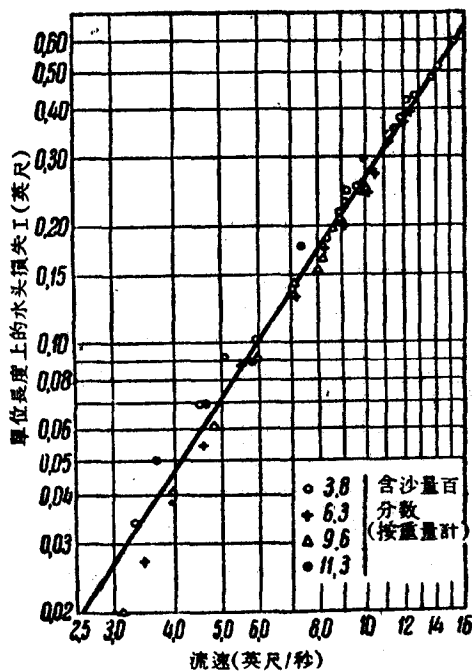


圖18 $I=f(v)$ 的关系

根据奥布賴恩的資料。用 $D=1\frac{1}{2}$ 英寸的铁管，以水力輸送銅礦〔密克謨(Mikumo)試驗〕。

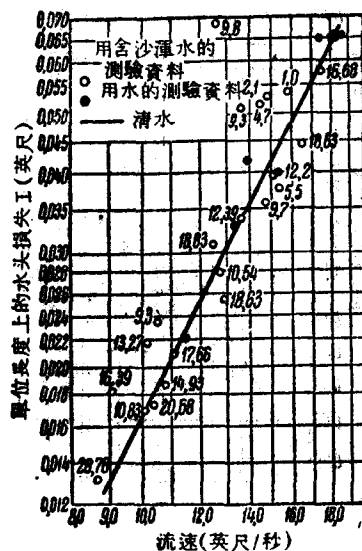


圖19 $I=f(v)$ 的关系

根据奥布賴恩的資料；由吸泥船“薩克拉門托”和“季尔斐特”吸取含沙的渾水，用直徑 20 英寸的标准吸泥管。

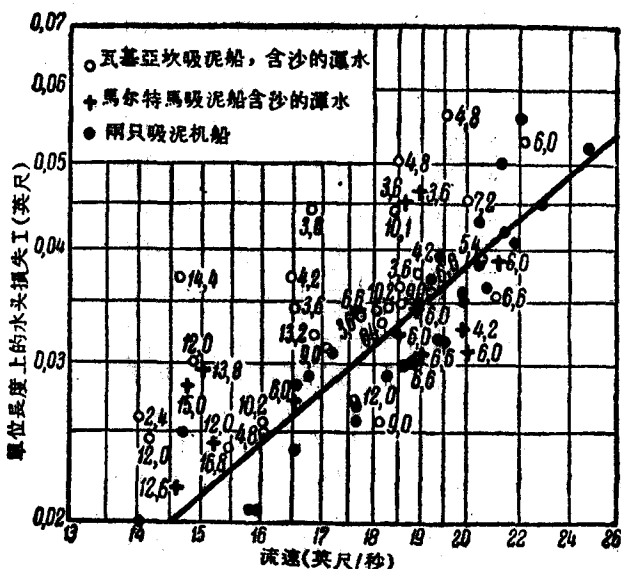


圖20 $I=f(v)$ 的关系

根据奥布賴恩的資料，在哥倫比亞河上的瓦基亞坎(Wahkiakum)和馬尔特馬(Multhomah)兩只吸泥船，用直徑24英寸的标准铁管，輸送含沙的渾水。

我們在 1939 年, 用平均粒徑为 0.65 公厘的沙子, 和巴尔喀什 (Балхаш) 煉銅厂里选礦厂的尾礦砂 (平均粒徑为 0.066 公厘), 在鉄管中所作試驗的資料, 表示在圖 21、22、23 和 24 中。

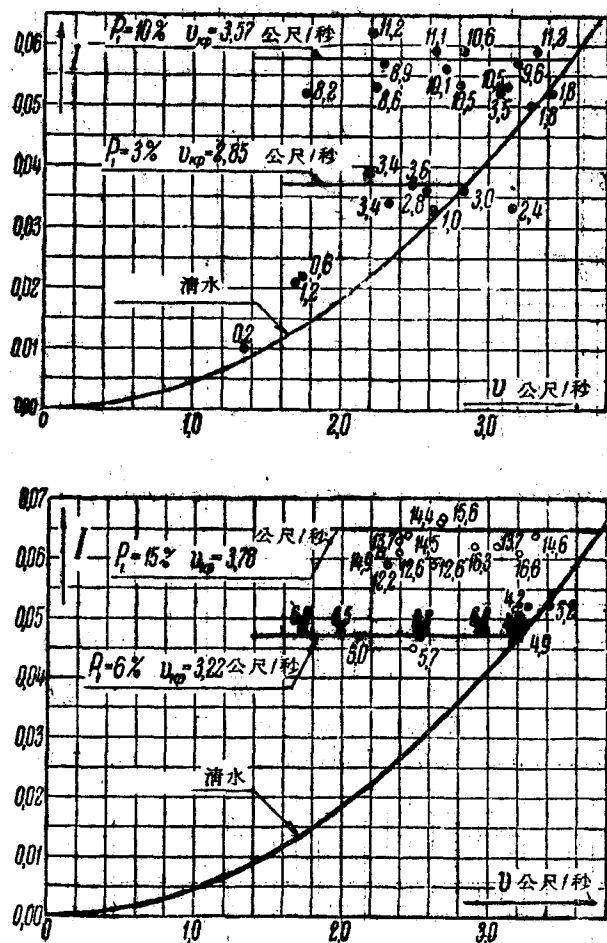


圖21和22 $I=f(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.65$ 公厘, $\omega_{cp}=7.9$ 公分/秒。1939年克諾羅茲的試驗。用鉄管, $D=250$ 公厘。

我們把 1938 至 1939 年間克里門托夫 (Климентов) 工程師在占比雪夫水力樞紐水力機械化施工試驗室 (在德米特洛夫 (Дмитров) 城) 的試驗資料, 加以分析研究, 所得結果見圖 25 至 29 [注 7]。

研究了上述資料以后, 就可知道, 毫無例外的, 对所有各样的渾水和各种的管道, 从某一平均流速起, 以渾水水柱高度所表示摩擦水头損失, 实际上都是与在相似条件下清水的水头損失一样。这一見解不僅为試驗室資料所証实 (圖 6 至 11、16 至 18、23 和 24), 且为实地測驗資料所証实 (圖 19 和 20)。

布拉赤和奥布賴恩的研究, 如前所述, 除了測定水流的量的特性以外, 并且用肉眼观察渾水运动状态。根据这些研究, 就可知道, 从固体顆粒在水流中完全呈懸浮状态时起, 即从流速等于臨界流速时起, 渾水与清水的水头損失即屬相等。

[注 7] 为了不使本文过长, 这些資料未全部引用。

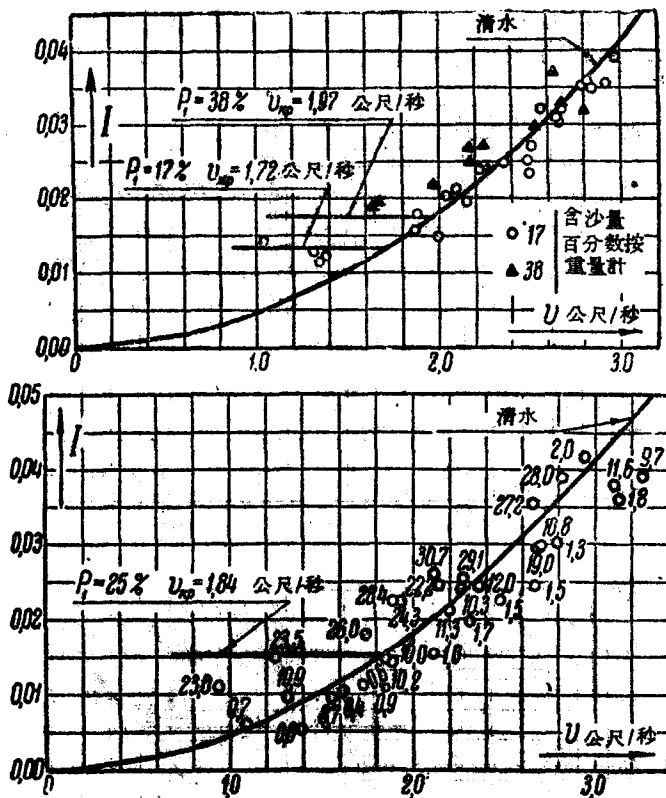


圖23和24 $I = f(v)$ 的关系

1939年克羅羅茲的試驗。用巴爾哈什逸礦的尾礦沙， $d_{cp} = 0.066$ 公厘， $\omega_{cp} = 0.86$ 公分/秒。用鉄管， $D = 250$ 公厘。

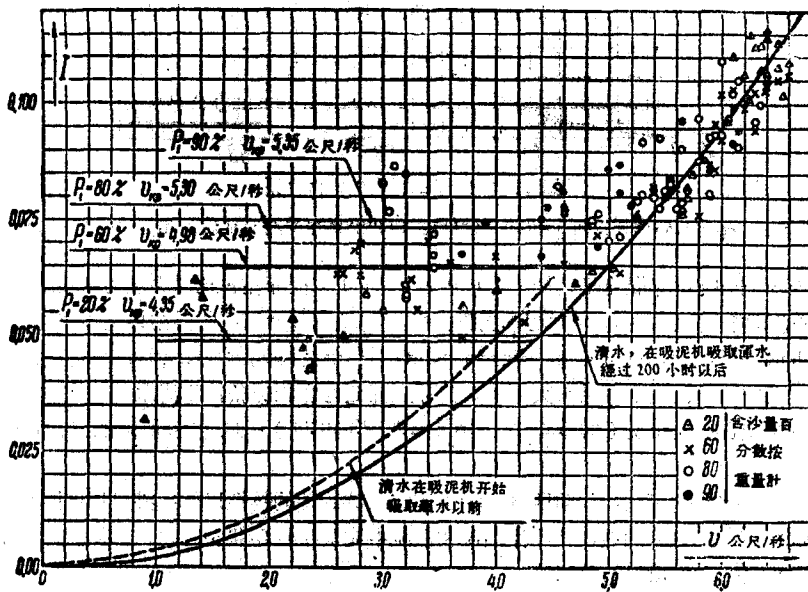


圖25 $I = f(v)$ 的关系

沙的特征： $d_{cp} = 0.79$ 公厘， $\omega = 8.7$ 公分/秒。1938年克里門托夫的試驗，用鉄管， $D = 255$ 公厘。

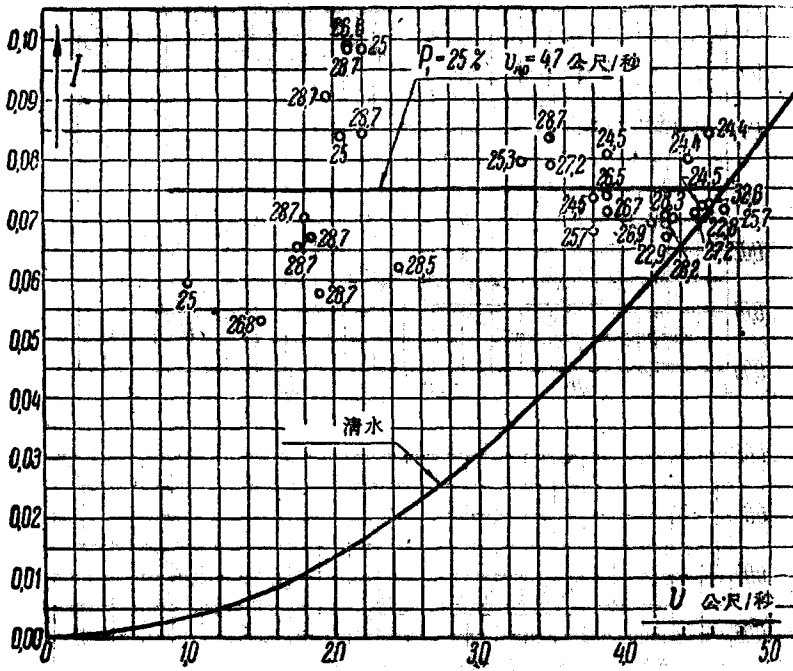


圖26 $I=f(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.79$ 公厘, $\omega_{cp}=8.7$ 公分/秒。1938年克里門托夫的試驗, 用鉄管, $D=306$ 公厘。

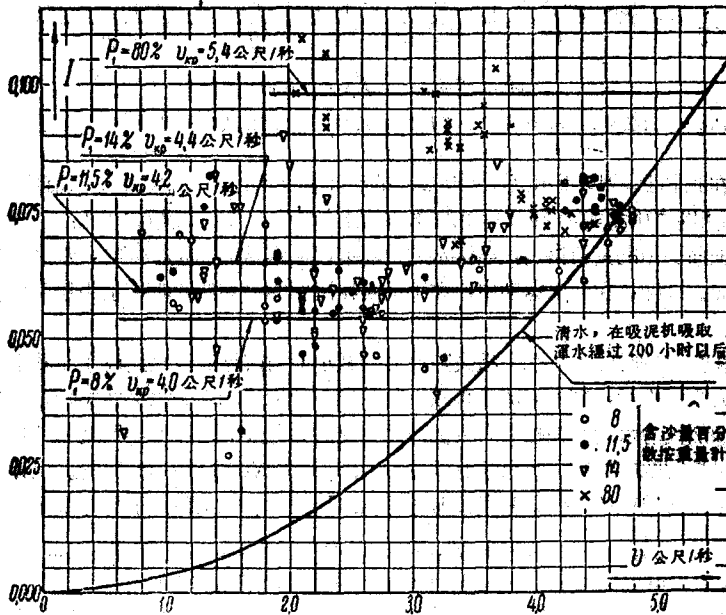
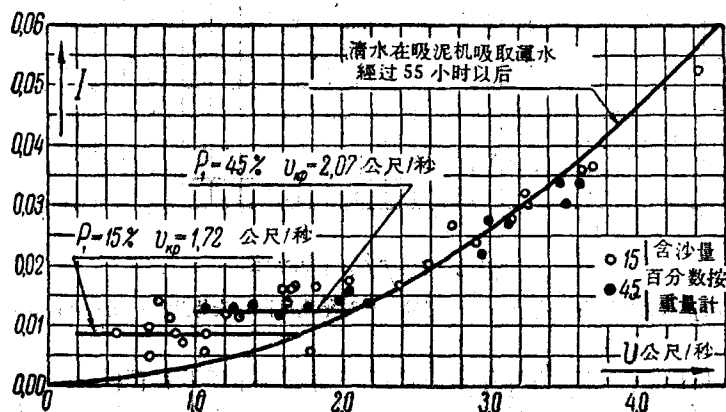
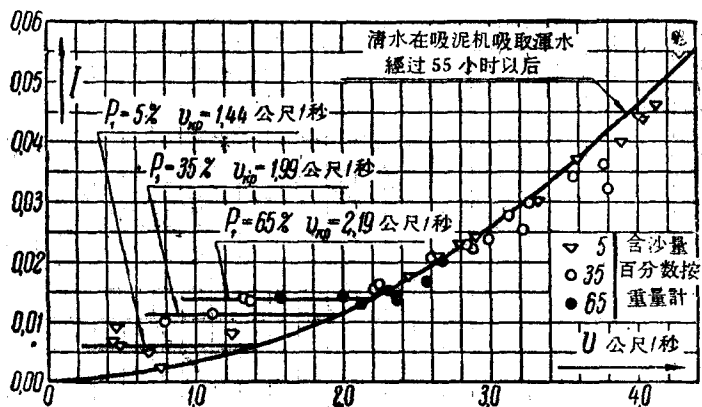


圖27 $I=t(U)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.79$ 公厘, $\omega_{cp}=8.7$ 公分/秒。1938年克里門托夫的試驗, 用鉄管, $D=306$ 公厘。

圖28和29 $I=f(v)$ 的关系

沙的特征: $d_{cp}=0.1$ 公厘, $\omega_{cp}=0.99$ 公分/秒。1939年克里門托夫的試驗。用鉄管, $D=306$ 公厘。

这一情况,在我們于1940年用直径250公厘的有压管道所作研究中,也完全証实,而在我們自1936至1939年間用明槽所作無压浑水运动的許多試驗資料中,又經証实[注8]。

進一步分析上面引用的資料指出,当浑水的平均流速从臨界流速起降低时,水头损失变化的特性,即与清水不同。亦即,在浑水运动中,在小于臨界流速的一切流速时,水头损失較在清水中大。

最初,一般在較短的时间內,水头损失随流速的减小(与臨界流速相比較)而减小,但此时仍較清水的水头损失为大,之后,当平均流速再减小时,每一种浑水的水头损失在实际上約为常数;在此区域内,其数值顯然較清水的水头损失为大。当然,这正如此处的附圖(特别是圖14、15等)所指出的,水头损失保持常数的性質,也只是有条件的,因为試驗点子是頗为分散的。但是,十分明顯,所有这些点子仍是很有規律地靠近某些穿过与各种含沙量相对应的試驗点子羣的水平直綫。我們的研

[注8] В. С. Кнороз. Технический отчет по работе "Составление технических условий и норм для проектирования и расчета пульповодов". 1937 г.

В. С. Кнороз. Технический отчет по работе "Установление гидравлических характеристик для расчета гидравлических транспорта хвостов прибалхашской обогатительной фабрики", 1939 г.

В. С. Кнороз 的其它研究报告。