

河床演变

(论文集)



科学出版社

河 床 演 变

(论 文 集)

E. B. 勃利茲尼亞克 主編
水利水电科学研究院技术处 译

科 学 出 版 社

1965

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Секция по научной разработке проблем
ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА
РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
Сборник Статей
Изд. АН СССР
Москва 1958

內 容 簡 介

本論文集共包括論文 27 篇，各篇論文的主要內容有下述几方面：探討河床演变的規律性、水流結構、紊流中的悬沙以及用于悬沙运动問題的扩散方程式。此外，并闡述利用放射性同位素研究土中徑流和滲流方面的經驗，河床演变的模型試驗方法和河床变形等。

本論文集可供科学研究工作者及水利工程設計、施工和管理部門的工程人員和水文工作者参考使用。

河 床 演 变

(論 文 集)

Е. В. 勃利茲尼亞克 主編

水利水电科学研究院技术处 译

*

科学出版社出版

北京朝陽門內大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

上海新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1965 年 6 月 第一版 开本：787×1092 1/16

1965 年 6 月第一次印刷 印張：20

印数：0001—2,700 字数：465,000

統一書号：15031·166

本社書号：3095·15—1

定价：[科七] 2.80 元

前 言

水流与河床、河岸以及修建在河床上的建筑物相互作用的结果,引起河床演变,对这种河床演变进行研究,有巨大的意义。特别是由于在苏联各河流上宏伟的水利工程建设,修建大型水库和大型水电站,开挖渠道,灌溉土地,建筑桥梁以及发展疏浚和整治工程等,研究河床演变的意义就格外重大。由于这些问题的的重要性,苏联部长会议于1951年9月12日通过决议,责成苏联科学院,在水文气象总局参加下,研究人类活动对河流河床演变的影响问题。这项巨大而复杂的工作是在苏联科学院水利问题科学研究室主持下进行的,参加这项工作的有苏联科学院各加盟共和国科学院和苏联科学院各分院所属各主要科学研究单位,国立水文研究所,全苏有关部门的科学研究院:全苏捷涅耶夫水利科学研究院,全苏给水、排水、水工建筑物及工程水文地质科学研究院,水利和土壤改良研究院,运输工程研究院,水工设计院,水能设计院和这些研究院的分院:各高等学校教研组以及从事研究河床演变的一些专家们。苏联科学院水利问题科学研究室在总的指导这项工作的协调委员会成员参加下,详细地制定了工作计划,作为这项研究工作的依据。协调委员会的主席是E. B. 勃利兹尼亚克,副主席是A. Д. 沙瓦廉斯基(1951—1953)和K. И. 罗辛斯基(1953—1954),学术秘书是K. Л. 波波娃和H. C. 沙拉什金娜。工作成果和工作计划由每年召开的协调会议审定,协调会议上有参加本项研究工作的各机关代表。此外,对个别复杂问题,特别是河床演变室内模型试验的研究方法,在专门的学术会议上进行了讨论。政府规定的任务已经按期完成。1954年12月16日,在苏联科学院水利问题科学研究室的学术委员会上,把最初在协调委员会全体会议上审定过的工作成果作了报告(报告人是:E. B. 勃利兹尼亚克, K. И. 罗辛斯基和H. E. 康德拉季耶夫),这些报告获得了学术委员会的赞同。研究工作成果的綜合报告和主要結論,刊载在苏联科学院水利问题科学研究室出版的论文集(“河川徑流調节問題”第6集)中。在本論文集中包括有在协调会议上和学术会议上所作的报告,以及水利问题科学研究室河床演变試驗室工作人員和参加研究这些问题的其他一些作者的論文。

本論文集包括以下几个部分:1.“水流結構”,2.“河床演变的基本規律”,3.“模型試驗問題”,4.“水库上下游的河床演变”,5.“河床演变的研究和計算方法”,6.“建筑物对河床演变的影响”。

由于許多問題的复杂性和研究得不够,作者們提出的某些論点具有商討的性质,因此希望对这些問題作进一步的全面討論。应该补充一点,1955年6月7—12日在塔什干由水利问题科学研究室和烏茲別克苏維埃社会主义共和国科学院結構研究所联合召开的会议上,曾对有关河床演变和水利工程建设的許多問題,进行了研究(會議論文集由烏茲別克苏維埃社会主义共和国科学院出版)。

本論文集所包括的資料,已經过編輯委员会的审定。編輯委员会由下列人員組成:責任編輯和編輯委员会主席E. B. 勃利兹尼亚克,編輯委员会副主席K. И. 罗辛斯基,委員O. B. 安得列耶夫, H. И. 茲列洛夫和H. A. 尔札尼岑,学术秘书H. C. 沙拉什金娜。本論文集付印的大量准备工作,是由K. Л. 波波娃和C. К. 謝特克維奇两位同志負責的。

目 录

前 言	(v)
河床形成的规律性	К. И. 罗辛斯基, И. А. 庫茲明 (1)
論紊流的相似性	В. А. 費德曼 (9)
紊流弯道上的横向环流	А. К. 阿納尼揚 (19)
弯道上的横向环流及其与水面形状的关系. 弯道上纵向流速的分布	И. Л. 罗卓夫斯基 (31)
河流与副流	А. С. 奧費切罗夫 (43)
测量脉动流速的新仪器和灌溉渠系中水流结构的研究	И. К. 尼基京 (52)
紊流中悬沙分布的試驗研究	И. А. 米哈依洛娃 (65)
应用在悬沙运动問題上的扩散方程的解法	К. И. 罗辛斯基, И. А. 庫茲明 (78)
紊流中悬沙沉降的計算方法	Н. Ф. 茨維季柯娃 (98)
沙浪不同形成阶段时的輸沙率和沙浪特点	И. А. 米哈依洛娃 (106)
河床的周期性展寬	Н. С. 沙拉什金娜 (111)
河床演变过程的模型試驗	И. В. 叶基阿扎洛夫 (122)
河床变形的模型試驗(基本原理)	О. В. 安得列耶夫, И. А. 雅罗斯拉夫切夫 (129)
天然河道水流的动床模型試驗	Н. А. 尔札尼岑 (136)
可冲河床和河工建筑物的模型試驗	С. Т. 阿尔图宁 (152)
根据顆粒沉降速度模拟泥沙运动	И. П. 茲列洛夫 (162)
河床冲刷的模型試驗方法問題	Н. Н. 苏洛娃 (171)
大型水庫的河床演变	С. Л. 文德洛夫 (180)
水庫淤积和坝下游河床的冲刷	С. Т. 阿尔图宁 (196)
預报水庫淤积量的理論基础	М. А. 莫斯特科夫 (228)
壅水段悬沙和底沙淤积过程的計算方法	А. С. 謝特吉尼特西, И. И. 密契托夫 (238)
山区河流的水庫淤积	С. А. 德查馬洛夫, А. И. 阿卡耶夫 (245)
变动回水区的河床演变	И. И. 馬卡維耶夫, И. В. 別里諾維奇, Н. В. 赫麦列娃 (254)
紊流中泥沙的沉降	А. А. 薩尔基襄 (269)
桥渡建筑物所在河段的河床变形	О. В. 安得列耶夫, И. А. 雅罗斯拉夫切夫 (281)
关于河床演变的一个重要問題	М. С. 維茲果 (297)
应用放射性同位素研究徑流和土中渗流的經驗	К. Л. 波波娃 (300)

河床形成的規律性

К. И. 罗辛斯基 И. А. 庫茲明

(苏联科学院水利問題科学研究所，

全苏茹克科学研究和勘测設計院)

1. 河床是河川水流与其底部的土相互作用的产物。在相互作用的过程中，形成与这个过程的規律相适应的河床形状。

泥沙平衡受到破坏乃是河床变形的直接原因。在某一河段上，当来沙量大于輸沙量时，或来沙量小于輸沙量时，泥沙的平衡就受到破坏。在前一种情况下，河床淤积升高，在后一种情况下，河床受到冲刷。泥沙平衡的破坏可以扩展到整条河流的断面上。在这种情况下，泥沙的纵向平衡遭到破坏，河床的纵断面发生变化。同样，也可以观测到泥沙横向平衡破坏的情况，这时河床就会发生横断面的变化，水深沿河寬重新分配以及河床在平面上移动。

在平原河流上，这些变化过程基本上带有周期性重复的特点；在多年的长时间内，每一河段的来沙量和輸走的沙量实际上是平衡的。在山区則不同，这里河床的情况具有明显的不平衡現象。在山区，流速大并輸移大量泥沙的河流切入岩石而形成峡谷。随着这种切入的发展，山区河流的比降变小，流速减低，輸沙量也减小。

河流出山谷以后，把所挟带的泥沙沉积下来，从而使河身强烈抬高。泥沙的沉积主要是集中在河床以及和河床直接毗連的滩地上，久而久之，这一条地带开始高出离河床較远的滩地，于是河流好象是被約束在它自己冲填成的天然的河堤以內流动。以后，河流冲决这种河堤并从它自己冲填成的高地流入河谷的低地，并形成一条新河床；这条新河床又重新开始升高，如此循环不已。由于泥沙不断地在低洼段上落淤堆积，河流就把所有的低洼段逐渐抬高。这种抬高的过程往往延續几千年，直到泥沙的来量与水流的挟沙能力相适应为止。这时抬高的地区就变为平原河流性质的滩地，河床达到平衡以后，就只发生滩地的重复变形。例如庫拉-阿拉克斯低地內的庫拉河、苏拉克河、捷列克河和里奧尼河的下流，以及其他一些河流，都可以作为这种特殊的河床不稳定情况的例子。

重复变形的强度和性质，以及与这种强度和性质有密切关系的河床形状，是由流速决定的，也就是由河流的比降以及河底和河岸的土的可动性所决定的。

流经易动的散粒土上的河流，在水与土介质相互作用过程中，形成具有一定規律性的河床形状；这种形状不仅对同一河流的各个河段是典型的，而且对类似条件下的其他河流來說，也是典型的。有些河床，除了易动的土以外，有时还有不易动的土，这种河床的形状会在某种程度上失去其典型性而成为微变形河段的特殊形状。对于这种微变形河段來說，河底与河岸的形状主要取决于不同河段的相对坚固程度，并且帶有无規律的独特的性质。

2. 紊动水流与其底部散粒状的可动性土相互作用的結果，使河底得到稳定的形状。这种河底地形是由前后相继的可移动的許多沙浪或沙波所組成，是一种有代表性的可动河底的地形。組成每个沙浪的无粘性土顆粒，在沙浪运动过程中参加共同的运动，因此，可以把他們看成是一个統一的整体来研究。沙浪的纵剖面，在迎着水流的一面为平緩凸出的迎水坡，它与沙浪峰頂的连接呈光滑的曲綫形；而在另一面，則为較陡的背水坡，它逐渐

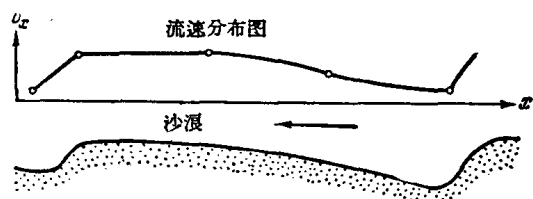


图1. 沙浪上面近底层流速的纵向分布图
(伏尔加河)

地过渡为凹形的波谷。上一个沙浪的波谷与下一个沙浪的迎水坡相連(图1)。

沙浪在平面上的形状以及它們在河底面上的相互位置，是取决于水流深度和宽度、流速以及河床沉积物顆粒粗度之間的相互关系。

在无限寬的水流中，不管流速大小如何，总是形成堆状(新月形)或带状的沙浪。堆状沙浪排列成互相平行而与水流方向垂直的行列(新月形带鏈)。

在有槽壁限制的、而且有相当流速的水流中，假如河寬很大而水深較小，沙浪的外形就呈切割成一半的新月形，其切开的一面与一岸相連。此时，沙浪呈交錯排列，輪流地靠近水流的两岸。

在比較深的水流中所形成的沙浪，它們的峰頂是平行的，并且在沿河床整个寬度上，沙浪的高度几乎是不变的。

河底沙浪的形成，与地表上由于气流作用而形成沙丘的現象是类似的。

下面我們想談一下关于沙浪产生的机理。

如上所述，沙浪是紊动水流介质与无粘性土粒所組成的散粒介质交接面的稳定形状。初一看來，在均匀水流中这种交接面似乎可以設想为較简单的平坦形状。但是，不难相信，这种形状是不稳定的，并且不可避免地要轉变成成为沙浪。

只有在泥沙是均匀运动的条件下，水流的可动性河底才能保持平坦，均匀性的任何破坏，都不可避免地会导致河底的变形。可是对紊流來說，由于流速脉动的影响，甚至在其平均水力特性不随時間和沿水流方向发生变化时，仍不可能是均匀流动的。与水流流速有关的泥沙运动强度，也是脉动变化着的；它在有一些河段是增大，而在另一些河段則减小。由于輸沙率脉动的結果，使河底必然产生不平整現象。这种現象将引起水流的分离，与此同时，在河底突起部分的背水面下方出現具有水平旋轉軸的漩渦；在漩渦区下方的水流自然层內，产生沿水流长度方向的稳定加速区。

水流內产生漩渦和与此有关的水流加速区的地方，就是沙浪形成的根源。漩渦冲刷着河底低洼的“谷地”，从“谷地”冲起的泥沙沉积在它的边緣上，形成沙浪的初期状态，以后逐渐发展成为完整的沙浪形状。从沙浪形成的第一瞬間起，水流在沙浪峰頂下方的分离，就为在下游产生下一个沙浪創造了条件，这样地繼續下去。

在加速水流作用下形成的沙浪，具有适合于在此种流速条件下必然会发生泥沙不均匀运动的稳定形状。同时沙浪也在其迎水坡上保持着为本身存在所必需的加速水流，并在其峰頂下方引起流速分离。河底水流情况与可动性河底的沙浪形状之間的这种互相协调，是河底沙浪形状稳定的原因。

当水流深度与宽度比值减小, 沙浪的稳定状态由平行排列过渡到交错排列. 在水流具有足够宽度的情况下, 沙浪峰顶极微小的歪斜都将引起泥沙在波谷中顺着峰顶方向移动, 亦即与水流的总方向成一定角度移动. 泥沙的这种运动将不可避免地使在波谷范围内形成新的沙浪, 新沙浪与老沙浪的波谷方向大致垂直. 这种现象的结果是两相邻沙浪的峰顶互相垂直. 同样, 下一个沙浪的峰顶也垂直于其相邻沙浪的峰顶. 这样的沙浪结构使得在整个河段上的沙浪峰顶互相交错, 并且互相垂直, 以致在平面上形成锯齿状.

在沙峰呈锯齿形排列的条件下, 各个沙浪的高度不可能沿程都是一样的. 位于前一个沙浪所掩盖处的沙峰高度最小; 相反地, 在沙峰相对的一端, 沙浪的高度最大并且也最长. 不难看出, 此时沙浪的升高部分必定轮流靠近河流的两岸. 这就是交错形式的河底地形不同于其他形式的地方.

沙峰歪斜时, 不可避免地要产生横向环流, 这种横向环流对于河底的作用也应该会造成沙浪交错排列. 环流将泥沙卷到弯曲水束的中心, 因而促使沙浪体与一岸相接. 水流经过弯道后伸直时, 不可避免地要向相反方向弯转, 这就预先决定了下一个沙浪与对岸相接, 如此继续不已.

沙浪是河床的最重要因素. 河床的形状和河流的特性与沙浪的形成及其运动密切相关.

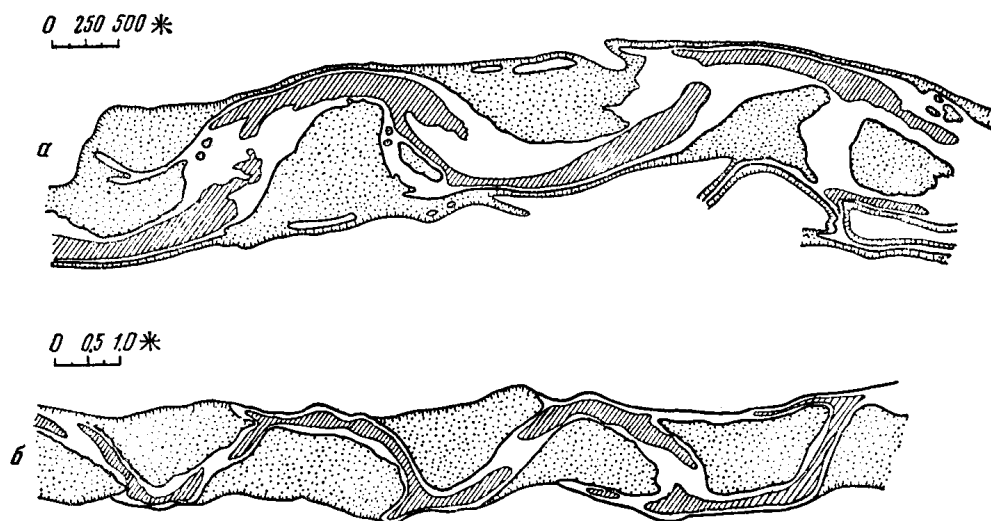


图 2. 直线河段上的沙浪-边滩

a——德涅伯河; *b*——兹韦尼哥罗德河床试验场模型试验河段(1953年)。

3. 根据河床在平面上的外形, 在天然情况下遇到的河床形状可分为直线形(或微曲形)、弯曲形和散乱形三种.

在直线形河段上, 河底表面由被水流移动着的沙浪所组成. 这种沙浪的分布通常呈交错状, 且互相形成链状的浅滩. 沙浪的升高部分轮流地与两岸相接, 形成可动性的近岸浅滩, 叫做边滩. 连接位于两岸的两相邻边滩的泥沙, 组成了浅滩埂. 图 2 所示为德涅伯河直线段上的河床地形与试验室中模型试验河段的河床地形. 直线河段上的浅滩保持着自己的形态因素, 并不断地向下游移动(图 3).

根据沙浪河底外形的稳定性, 紊流条件下产生沙浪的规律性(紊流情况不受边滩因素

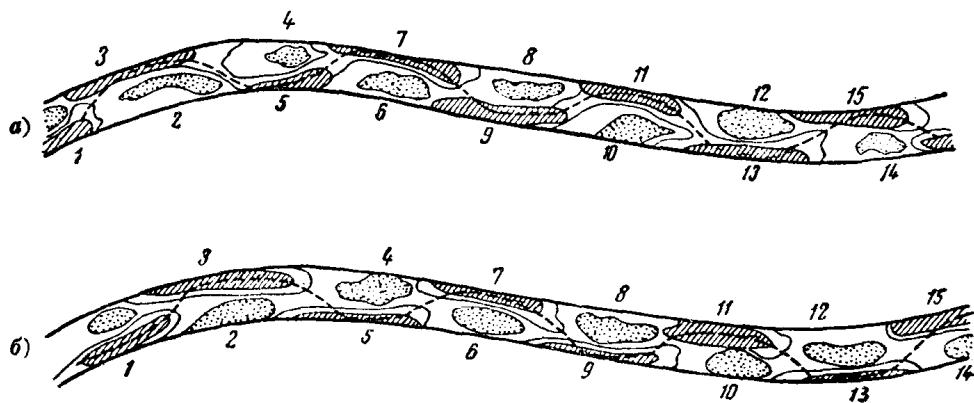


图3. 维斯纳河河段上的浅滩图(河岸经过工程加固)

a——1901年9月; b——1902年9月.

1, 3, 5——深槽; 2, 6...14——边滩.

的影响)以及浅滩地形在河流上的广泛分布等条件,可得出这样的结论:如果没有什么使河床演变过程不正常发展的其他因素,则在易动土上造床的水流,由于紊流和散性土相互作用,必定会自然而然地在河底形成浅滩形状.这是河床形成理论的第一个基本原理.

与上述直线河段不同,在弯曲河段以及在大河流上,在水流靠近右方原始河岸的地方,河槽一般具有深槽性质.水流由于弯道上离心力(或科里奥里斯力)的作用而产生的环流运动,将泥沙卷向凸岸,并使河床的横断面呈不对称形状.在弯道全长范围内,凹岸为河床较深部分,而凸岸则为连续延伸的近岸沙滩.浅滩分布在河床弯道的反折点处(图4).

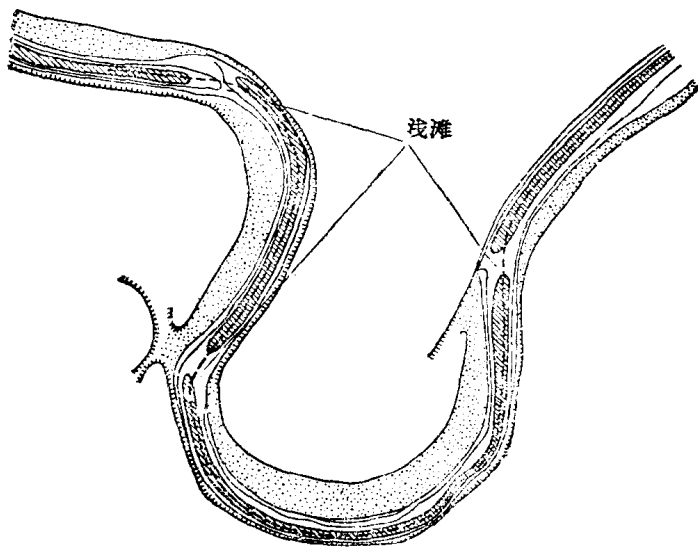


图4. 低水位时的河弯图

根据上述情况,可以得出河床形成理论的第二个基本原理:河流在易动土上的河床,其深槽段只有在水流中具有对全程为共同的方向不变的环流发展条件处,才能够形成.

在自然界中也有很多散乱形河床,其特点是具有为数众多的汊流,这些汊流被江心滩地与江心洲所分割(图5).个别汊流的河床可能具有浅滩或深槽的形状.

4. 上述三种基本河床形式的任何一种,都有其相应的保持这种形式或再演这种形式

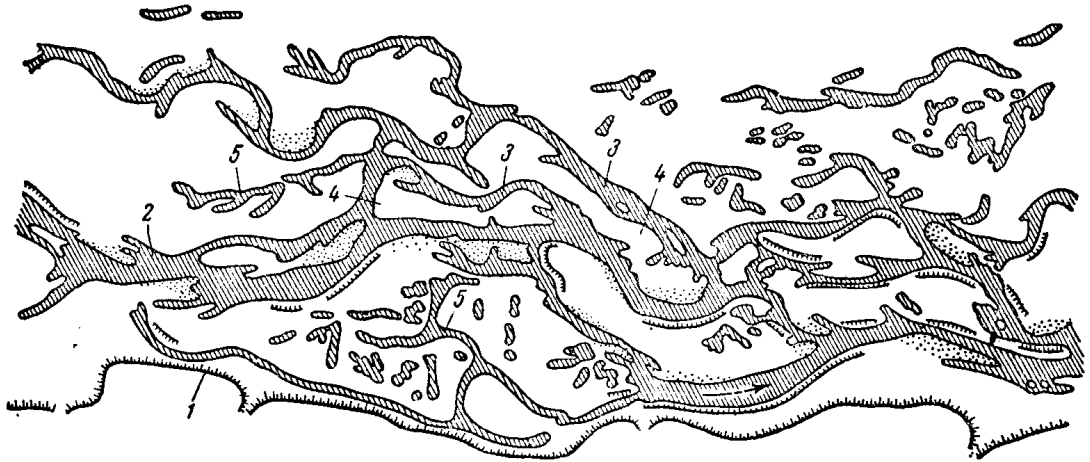


图 5. 游荡性河流平面图

1——边岸；2——主河床；3——二级汉流；4——江心洲；5——老河槽。

的河床重复演变过程。这种过程分为三个类型：

- (a) 周期性展宽；
- (b) 河湾发展(蜿蜒)；
- (B) 游荡。

在某一河流上，河床变形的过程是哪一种类型，主要取决于河床和河岸的相对可动性。

在有些河流上，由于河床沉积物的可动性，组成河底基本地形的沙浪很快向下游移动；相反地，河岸则由于地质因素，或者由于植物根部的加固作用，水流对它的淘刷不很强烈，这样的河流在演变过程中，河床不会弯曲。沙浪在向下游移动时，它们依次地掩护河段边岸的冲刷，使边岸沿程较均匀地坍塌，因此，河床渐渐展宽。

河床展宽的漫长过程，最终为短暂的河床束窄过程所代替：河床大大展宽以后，水流冲刷一岸的边滩(沙浪)，并为自己开辟了一条直线形的，起初比较狭窄的河床。被冲开的边滩变成了心滩，以后成为使河床分叉的江心洲。在汉河的淤积过程中，江心洲经常与冲刷岸对面的一岸相连接，并形成新的几乎是向河流一边推进的河岸线。这样，就完成了河床束窄的过程。此后，河床又恢复了展宽过程。处于周期性展宽条件下的河流，保持着直线或微曲的河段外形。河流周期性展宽的结果，在河滩上遗留下一些直线形或微曲的老河道。

在上述过程的各个时期内的河床情况，如图 6 所示。

在沙体(基本河底地形的沙浪)向下游移动较慢而河岸变形较快的地方，河床在移动着的沙浪能够对其阻碍以前就已弯曲。弯道开始发展，亦即河流开始蜿蜒，而蜿蜒也同展宽过程一样，具有周期性质。久而久之，河弯变得十分弯曲，几乎形成封口的河环。在河环的起点和终点之间，有一个狭窄的地颈被水流突破(图 7)。切断后的河环逐渐为泥沙所淤积，并变成老河道。随着地颈的突破，河道裁弯取直，取直后的河床又为沿岸的浅滩沙浪所复盖。于是，河床弯曲的过程又重新开始。

在河岸可动性很大的河流中，可以看到河床产生游荡，河床不能保持规则形状而急剧地展宽。沙浪主要形成心滩的形状。心滩发展而成为江心洲，并将河流分成许多汉流，汉

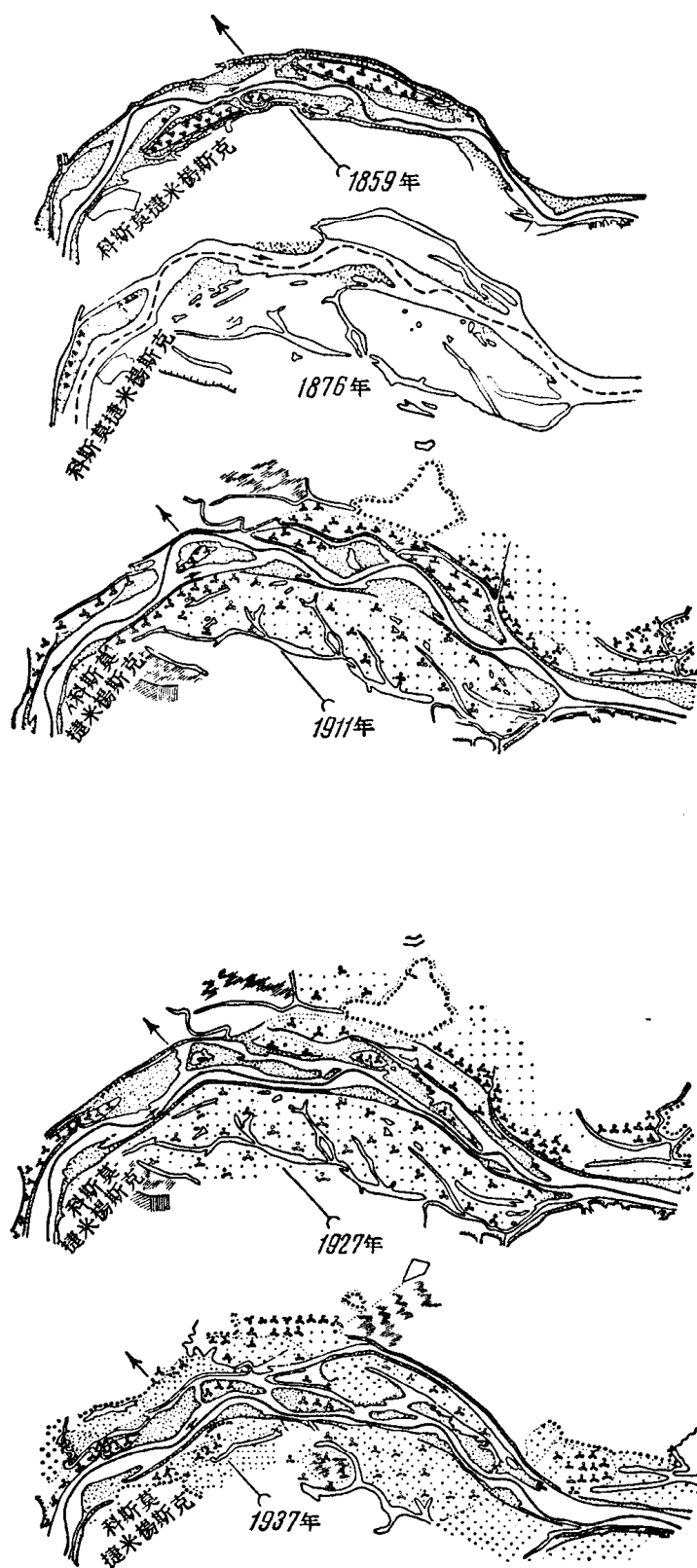


图6. 柯斯莫捷米揚斯克地区伏尔加河周期展宽河段

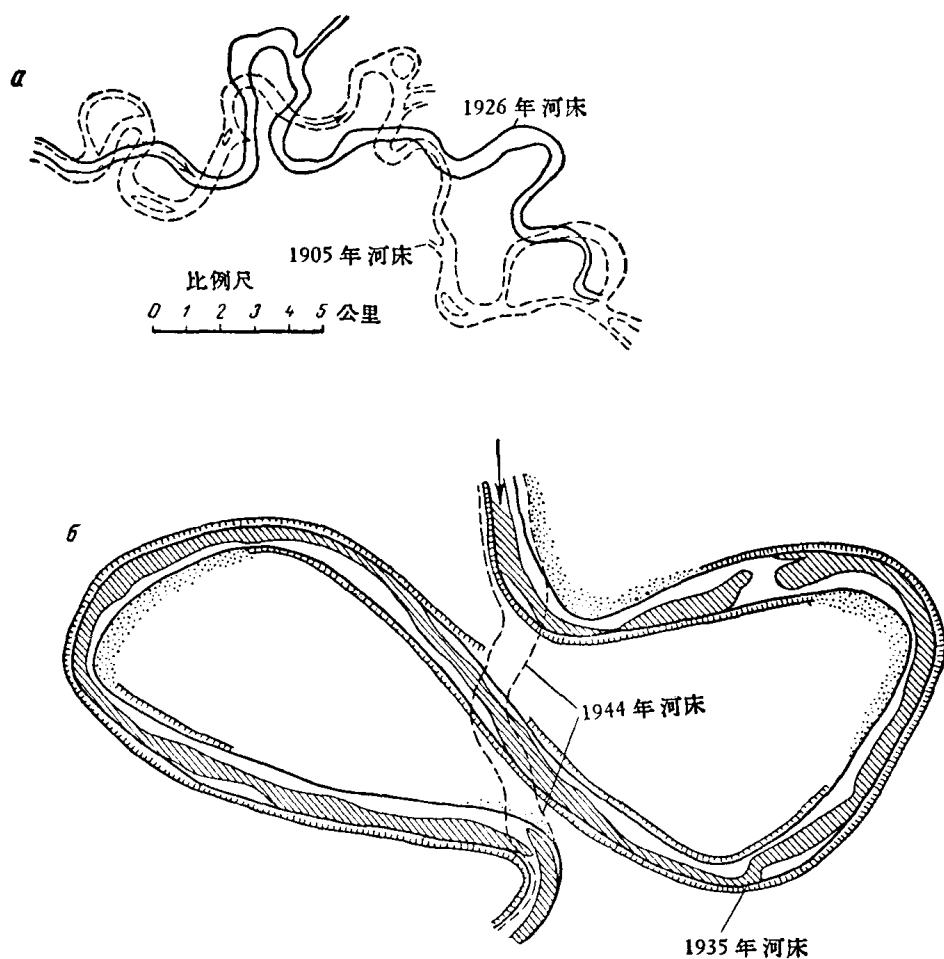


图7. 蜿蜒情况下的河道裁弯取直

a——锡尔河；b——庫拉河。

流不断地改变着自己的外形。

5. 河床周期展宽的过程主要可在具有沙质河床和高滩(高滩上部是由粘壤土构成, 并生长着植物)的大河流上看到。这些河流的特点是汛期长, 有夏汛和秋汛。

河流狭小、有生长植物的低滩、河床沉积物中杂有砾石或淤泥、汛期短和枯水期长等等, 都会促使河弯的发展。

当河底及河岸是由同一类的土所构成, 并且滩地上生长的植物很少、汛期洪水多峰和延续时间较长时, 河流有游荡倾向。

6. 天然河流的变形并不是经常都属于上述变形的类型之一。地质、水文和地貌(局部地)因素都会使个别河段的河床构造具有独特的特点。但是, 在流经冲积层的河流上, 到处都可以看到上面所探讨的三个主要重复演变过程(即周期性展宽、蜿蜒和游荡)的因素。

由可动性不同的土所组成的复杂构造的河床, 无论是河底形状和河床演变特性, 都可与由冲积土所构成的河床不同。假如河底上有一层厚度不大的砂质沉积物, 其下面又为密实的土, 河中就不会形成边滩(沙浪)。在这种情况下, 常常出现所谓的“沙滩”, 即由无数较小的沙浪组成的沙浪河底地形。在能够形成边滩(沙浪)的地方, 沙浪的特点是: 没有完整的形状, 而且几乎总是固定不动的。图8所示为地质构造复杂的白河上的两个河段

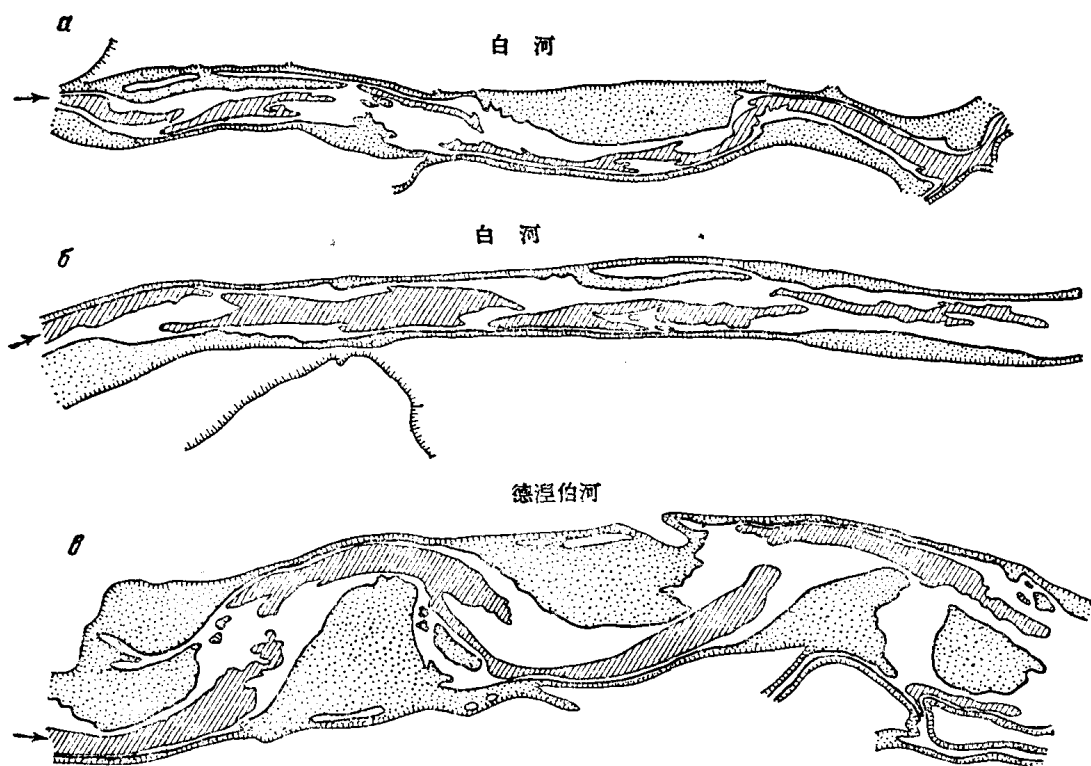


图 8. 构造复杂的河床段(a 和 b)与易冲河床段(c)的比较

与德清河易冲河床河底地形的比较。沙浪河底地形的这些特点，在砂中含有大量砾石时也可观察到。由于边滩固定不动的结果，即使边岸由粘壤土和粘土组成，构造复杂的河床也会向着蜿蜒发展。这种河床，由于深向冲刷困难，形成了许多江心洲，这些江心洲慢慢地改变着自己的形状，而且其所在位置与河流一定的地点有关。在河岸的可冲性比上下游各段为小而河床是由密实的土组成的那些河段上，往往是形成江心洲的好地方。在某些河床地质构造复杂的大河流上，存在着布满江心洲的河段，这些江心洲将河流分割成为数众多的汊流。

流经不易冲刷土上的河流，在大多数情况下没有滩地。这些河流的河床外形，首先取决于邻近地区的地形和地质构造的特点，它在平面上经常是与河谷的外形重合。各浅滩的位置分布与河床的平面形状没有关系，浅滩主要是由不易冲刷的土所组成。

7. 河床的大小主要是由流量、比降、滩地的宽度和高度、河床沉积物的颗粒大小以及河床演变过程的类型所决定。

流经易动土的河流，其河床横断面形状与河床演变过程的类型有关，并为泥沙的横向平衡所控制。在河床演变过程中，河宽与相应的水深是经常变化着的，它们围绕着一个平均值变动。蜿蜒河道的宽度与水深的比值为最小，并且弯曲度愈大，其比值愈小。游荡性河道的宽度与水深的比值为最大。河床周期性展宽的河流则介于两者之间。

在不易冲刷的土上，河床横断面尺寸的比值由河谷底部和边坡的相对坚固程度来决定。

荆玉璽 王建功 晏友嵩 譯
周文浩 王书华 褚德珊 校

論紊流的相似性

Б. А. 費德曼

(苏联科学院水利問題科学研究室)

本文中所涉及的某些相似性的問題，我們感到討論起来对紊流模型試驗的理論和实践都很有意义，但我們对这个問題的現狀并不作系統性的闡述。

相似性的定义

由于水动力学量的实际(瞬間)值的多样性，紊流的精确动力相似概念就失去了实际意义。目前一般采用統計学方法来分析紊流中水动力学各种量的場，根据这种情况来看，从紊流統計学性质的观点来探討相似性問題还是适宜的。

可以提出下面的定义：紊流相似是指紊流的 n 个无量綱主要物理量在四度空間 (x, y, z, t) 中任意选择的相应的 m 个点上，有着同样的 $m \cdot n$ 度机率分布規律。

m 的数目应该足以說明量場，并能滿足希望达到的相似程度。在不可压缩液体运动的情况下，主要的量是三个流速分量以及压力。如果流体具有可压缩性时，还应包括密度。在更加复杂的問題中，除上述各項以外，还要包括热含量及所含杂质的濃度等項。根据量綱理論的一般規則，利用特征值的比尺，可以把我們需要研究的量化成无量綱的形式。

例如速度的比尺应该选择平均流速的某一特征值。在平均流动为恒定流的情况下，上述平均流速是取足够長時間内的实际流速值加以平均而确定。在平均流动不是恒定的情况下，取平均值的概念仅仅从机率的观点来看才有严格的意义。在这种情况下，实际上取平均值可以根据相同条件下經過多次重复性試驗所取得的一系列測量数据来求得，但要做到这一点在技术上往往是困难的。在不恒定流情况下用单次試驗資料来計算某个时段中虚拟的平均值，如果所取时段虽然比脉动特征值长，但是比整个流动发生根本性变化¹⁾ 的时间短，則所得出的平均值可能有相当大的誤差。

应该指出，对于两个流体而言， (x, y, z, t) 空間内的任何两个对应点上的上述諸量的 n 度分布情况等同，还不能表示它們是相似的，因为这种等同并不反映出不同点上紊动变化的統計相关性，而这种相关性，表示着我們所探討的各种演变过程中物理連續性的重要特性。如果观测点子选择恰当，在所提出的关于相似的定义中是可以考虑这种連續性的原則的。特别是上面提到过的 $m \cdot n$ 度的分布，显然也是包括着連續性方面的一些概念，例如紊流的几何比尺和时间比尺。

上述相似性的定义，对实际应用显然还是不适合的。假如仅局限于利用低次矩²⁾ 来

1) 指 $\frac{\partial Q}{\partial t}$ 等——譯者注。

2) 指不同量的乘积——譯者注。

說明統計量的分布情況的話，那麼，在平均流動為恒定流的情況下，這個定義可以用較簡易而方便的定義來代替，雖然其普遍性要小些。對於不可壓縮液體，當平均流動為恒定流的情況，如果下列諸無量綱矩為不變值，則可以足夠精確地成為動力相似。

- (1) 脈動流速的三個分量的平均值 $\frac{v_a}{v_0}$ ；
- (2) 脈動流速分量組成的二次單點矩和雙點矩

$$\frac{v'_i(M_1)v'_j(M_1)}{(v_0)^2} \text{ 和 } \frac{v'_i(M_1)v'_j(M_2)}{(v_0)^2}.$$

這裡 M_1 和 M_2 表示四度空間的不同點子（其中包括在三度空間中同一點上的不同時刻測得的量； $\bar{v}_0$ ——流速比尺）。上列諸量充分表達了水流動力過程，這一過程是由於脈動流速對時均流的動量平衡和能量平衡的影響所造成。

作為例子，我們來探討在有重力作用下時均流運動在垂直軸上投影的方程式

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial x} - \frac{\partial (v')^2}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} + \nu \Delta \bar{v}, \quad (1)$$

式中， u, v, w ——分別為 x, y, z 方向的流速分量投影； t ——時間；小撇“'”表示脈動偏差，橫綫“—”表示時均值； g ——重力加速度； p ——壓力； ρ ——密度； ν ——動粘滯系數；

$$\Delta \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right).$$

我們看到，上述形式的矩包括了方程式(1)中所包含的時均流速和脈動流速的組合。還應指出，我們沒有把 $\frac{\bar{p}}{\rho(v_0)^2}$ 值包括在上面列舉的無量綱矩之內，理由是：大家知道，在起始條件和邊界條件已知以及沒有脈動的情況下，壓力場是由流速場單值確定的（參看[2]）。把這一原理概括到紊流的情況是很自然的。

利用類似的方法很容易說明，時均運動的能量方程式中的諸量（為了節省篇幅，這裡未列出此方程式）僅僅包含有時均流速和脈動流速各分量的組合，這種組合可以用上面所列舉的矩來寫出。

脈動運動的能量方程式包括有三次矩 $\overline{v'_i(M_1)v'_j{}^2(M_1)}$ 和混合矩 $\overline{v'_i(M_1)p'(M_1)}$ （參看[3]）。因此，保證脈動能量平衡的相似，意味著無量綱量 $\frac{\overline{v'_i(M_1)v'_j{}^2(M_1)}}{(v_0)^3}$ 和 $\frac{v'_i p'}{\rho_0(v_0)^3}$ （ ρ ——質量密度比尺）應該相同。

在不恒定流情況下，上述相似性的定義在很大程度上失去了實際意義，因為矩的數值在這種情況下已不能精確地算出。只有在脈動程度明顯變化的周期比脈動本身變化的特征周期長的條件下，這個近似的定義才保持有效（在確定上述各平均值時也是如此）。

在隨着時間或沿着某坐標方向出現恒定時，對下一形式的矩

$$\overline{v'_i(0)v'_i(a)} \quad (\alpha = |x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|, |z_1 - z_2|, |t_1 - t_2|)$$

的探討，可以用相應的頻譜¹⁾密度的研究來代替，

$$f(\omega) = \frac{4}{(\overline{v'_i})^2} \int_0^\infty \overline{v'_i(0)v'_i(a)} \cos 2\pi\omega a da,$$

¹⁾ 脈動記錄曲綫圖譜——譯者注。

它决定于以下的关系:

$$f(\omega) \Delta\omega = \frac{\overline{v_i'^2(\omega, \Delta\omega)}}{(\overline{v_i'})^2},$$

并且, $\omega_\alpha = \frac{1}{\alpha}$ —— 相应于时段 α 的波动数 (“频率”); $\overline{v_i'^2(\omega, \Delta\omega)}$ —— 在频率区 $(\omega - \frac{\Delta\omega}{2}, \omega + \frac{\Delta\omega}{2})$ 内的脉动能量的频谱分量 (参看[4], [5]). 这种研究方法的优点, 在于可以阐明: 在紊动变化的全部过程中, 以波动数 ω 表示的一定大小或周期 α 的扰动, 究竟起着什么作用.

在三元的非均匀场 (非等速流) 的情况下, 水团扰动的几何尺寸严格来讲已不能利用场内不同点上所量得的 v_i 诸值的相关关系来加以确定, 在这种情况下, 用时间频率的图谱 $\omega_t = \frac{1}{t}$ 来表示紊动频率组成的特征是特别适宜的. 同时, 对沿某一方向 x_j 为均匀流 (等速流) 来讲, 根据相应的波动数 ω_{x_j} 所确定的扰动尺度 $l_j = \frac{1}{\omega_{x_j}}$, 可以作为方便的特征尺度.

利用对整个水流为相同的 α_0 值所算出的频谱密度无量纲值 $\frac{1}{\alpha_0} f\left(\frac{1}{\alpha}\right)$ 等同这一条件, 在确定恒定的机率场的相似时, 可以代替矩函数 $\overline{v_i'(0)v_i'(\alpha)}$ 的等同条件.

正如所指出的, 这样代替有一定的方便, 因为这时扰动尺度的概念清楚, 扰动尺度可被解释为函数 $f\left(\frac{1}{\alpha}\right)$ 的某种特征值. 例如, 可以采用 α_0 值来代替扰动尺度, 这里 α_0 对应于函数 $f\left(\frac{1}{\alpha}\right)$ 的极大值, 或者对应于曲线 $f\left(\frac{1}{\alpha}\right)$ 从起点所包含的面积重心等等.

由于脉动的无量纲特征值有时被解释为相似准则, 所以应该强调指出, 在上述讨论中, 矩的无量纲值只能看作是通俗的准则, 因为在两个对比的流场上相应点相同, 这一条件本身就是相似性概念的含意. 这些量的不变性意义 (对由一种流动换算到与其相似的另一流动), 在这种情况下与在沒有紊动的运动情况下无量纲流速场本身的不变性意义是类似的.

从所采用的紊流相似性定义中很容易看出, 相似准则就一般意义来讲就是决定整个现象的那些已知各种量的无量纲组合. 在平均量恒定的情况下: 对于有压流为雷诺数 $Re = \frac{\bar{u}l}{\nu}$, 对于明流为雷诺数 Re 和福路德数 $Fr = \frac{(\bar{u})^2}{gl}$, 或者是包含同样这些量的同等的组合 (例如, $\frac{(\bar{u})^3}{\nu g}$ 和 $\frac{(\bar{u})^2}{gl}$, 或 $\frac{(\bar{u})^3}{\nu g}$ 和 $\frac{\nu}{g^{1/2}l^{3/2}}$, 或 $\frac{\nu}{g^{1/2}l^{3/2}}$ 和 $\frac{\bar{u}l}{\nu}$, 等等).

我们所研究的矩对于实际瞬时运动的方程式中的各个量来说, 并不是有新尺度的量, 它们的引入并不会出现任何新的准则. 这一情况可用前面讨论的方程式 (1) 的例子来加以说明.

我们选取某特征流速 $\bar{v}_0$ 、特征线性尺度 l_0 和质量密度 $\rho_0 = \rho$ 来作为测量的基本单位, 并且引用无量纲量 $\bar{V} = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_0}$, 等等; $V' = \frac{v'}{\bar{v}_0}$, 等等; $X = \frac{x}{l_0}$, 等等; $T = \frac{tl_0}{\bar{v}_0}$, $\bar{P} = \frac{\bar{p}}{\rho(\bar{v}_0)^2}$. 方程式 (1) 经过简单的换算以后, 可化成无量纲形式:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial T} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial X} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial Y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{V}}{\partial Z} = -\frac{gl_0}{(v_0)^2} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial Y} - \frac{\partial \bar{U}'\bar{V}'}{\partial X} - \frac{\partial (\bar{V}')^2}{\partial Y} - \frac{\partial \bar{V}'\bar{W}'}{\partial Z} + \frac{\nu}{v_0 l_0} \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial Z^2} \right). \quad (1')$$

如果两种流的 $Re = \frac{\bar{v}_0 l_0}{\nu}$ 和 $Fr = \frac{(\bar{v}_0)^2}{gl_0}$ 值都相同, 那么, 这两种流的方程式(1')就完全等同. 方程式(1')是不定的, 并且它本身还不能保证流速场的全部特征. 为了得出一组闭合的联立方程式, 除了方程式(1')以外, 还应写出九个方程式, 亦即: 两个运动方程式、一个连续方程式和六个形式不知道的假定方程式. 但是很自然地可以认为, 在这六个方程式中, 除了决定流速场和压力场的十个未知量之外, 只能列入外力和流体物理性质的特征值, 也就是方程式(1')和两个类似的运动方程式中所包含的那些量. 显然, 从这些量的比尺中, 不可能作出与福路德数和雷诺数有根本出入的无量纲组合.

应该指出, Л. Г. 罗依茨扬斯基^[2]所引用的卡门数 $K = \frac{\sqrt{(\bar{v}')^2}}{v_0}$, 对于解决外部问题(物体的绕流)可以作为决定性的准则来加以讨论, 这只是因为, 这个量表征着对于绕流情形十分重要的冲击流中的紊动程度. 但是根据上述理由, 更为正确的看法, 应该认为 K 是反映冲击流中的边界条件(格栅的位置和形状等等), 但并不具有决定性准则的意义. 这一意见对于为槽壁所限制的很长的水流来讲更是正确, 因为在这种情况下, 脉动程度与固体边界的形状有关, 一般不能随意变化.

因此, 保证紊流结构相似的准则, 应该认为就是那些恒定流的相似准则(不考虑紊动性问题).

紊流的近似模型试验

我们知道, 由于模拟粘滞性的困难, 对于几何尺寸相差悬殊的水流(原型和小模型), 要同时满足两种准则($Re = idem$, $Fr = idem$), 实际上是不可能的. 因此, 在模型试验的实践中, 模型的 Re 值大大地小于原型(天然)的 Re 值. 这就失掉了微结构中的相似性, 但实质上并不影响水流的大尺寸结构.

的确, 从以前测量水流所输移的乳胶体粒子横向扩散的资料^[6]中可以看出, 在雷诺数(以水力半径计)从 2000 到 28000 的情况下, 在光滑槽壁上等速流的大尺寸结构仍是接近于不变的, 也就是说, 在这种情况下, 保证横向紊流输移的扰动不发生重大的改变. 在槽壁粗糙的情况下, 大脉动的相似律应该比较精确地遵守相似原则, 因为我们知道, 相应两水流在阻力平方区内时均流速方面的相似还是相当好的.

以前讨论断面剧烈增大的水流例子^[7]表明, 在这种水流中流速场脉动结构也可达到近似相似. 论文[7]指出, 在雷诺数变化的情况下, 这种断面的流速场结构内的变化不大, 看来, 其原因不应该是粘滞性对时均水流的直接影响, 而是粘滞性对于脉动冲量和脉动能量二者的紊动输移的作用, 这种紊动输移是随紊动图谱中小尺寸涡流比重的增长而变化的. 可以认为, 因涡流破碎所引起的能量扩散的变化是最主要的. 这种能量扩散是决定于三次矩.

利用图谱分析紊动性, 可以明显地看出, 紊流流速场结构细节中的相似, 在雷诺数变化(尽管作到大尺寸结构的大体相似)时, 不可避免地会发生一定的偏差. 正如研究各向