

水电站進水口和 引水建筑物中的惰性环流

苏联 О. Л. 尤什曼諾夫著

徐 在 庸譯

水 利 电 力 出 版 社

序 言

最近几十年来在苏联进行广泛的水利工程建设，随着大量的科学研究工作，充实了我們在工程水力学領域內的知識，这样就有可能更深入地探討复杂的水流結構，在許多水利工程建筑物工作中，水流結構起有极为重要的作用。

环流对于水流結構起有巨大的影响。环流常常可以与基本水流相比較，因此，在研究各种水利工程建筑物时，尤其是研究引水式水电站的取水枢紐时，不能不注意环流現象。

环流按其性質來說，可以分为几种形式。其中按其作用强度及經常性來說，惰性环流具有最大的意义。不考虑惰性环流，就常常会带来运行方面的严重困难，而有时还导致成事故状态。相反地，有效地利用惰性环流的建筑物，其运行的質量則最为良好。但是，惰性力与建筑物結構形状对于水流所起的作用，不是随时都能得到明晰的概念，因此，关于所发生的环流的概念也就不明确，这种情况常常妨碍有效地利用惰性环流。这就促使必須对未来建筑物的各种方案的模型进行为数更多的昂貴研究。在格魯吉亞水利技术与土壤改良科学研究院与中亚細亞灌溉科学研究院曾对惰性环流的利用进行过著有成效的工作，他們曾設計，研究与建造了（或正在建筑）大量的取水建筑物与其他建筑物，而这些建筑物在个别情形下，在运行質量方面与未利用环流的类似建筑物相比較是更为有利。

作者希望使讀者了解惰性环流的屬性与特性，以及关于利用惰性环流的現有各种建議，並願本書能使从事水电站取水枢紐与引水建筑物設計，施工和运行的工作人員得到一定益处，並使他們能在某种程度上預估未来环流的特性，闡明許多与惰性环流有关的驟然看来不可理解的現象，預先規定改进建筑物工作的合理措施。

本書也可供相应专业的科学工作者与大学生閱讀。

目 录

序 言

第一章	液体的惯性环流及其实质.....	3
1.	环流形式与惯性环流的作用.....	3
2.	惯性环流示例.....	8
第二章	利用惯性环流防止泥沙的各种现有方法.....	15
第三章	带环流集沙段的进水口.....	24
3.	进水口示意图.....	24
4.	渠道弯曲处惯性环流的计算.....	26
5.	环流集沙段的计算.....	40
6.	进水口模型的研究.....	44
7.	进水口的结构特点与示例.....	53
第四章	引水渠中的环流集沙段.....	58
参考文献		63

第一章 液体的惰性环流及其实质

1. 环流形式与惰性环流的作用

液流的控制問題，是水工建筑物的基本問題之一。了解水流的結構和性質，以及其中发生的各种現象的物理實質，是正确解决这个問題的必要条件。

就在不久以前，工程实践中还采用着簡化的、平行流束式水流运动图形。这样的图形只能解决某一小范围内的問題，即主要是与确定像水流平均流速，水流流量等这样一些数值特征有关的問題。但是，在实际中，水流結構几乎永远比平行流束图形复杂得多，因此，在解决与水流内部能量特征有关的各种問題时，例如，确定水流中个别点的压力或流速时，这种图形常常会导致严重的錯誤。

在液流中，除了組成其紊流結構的基元渦漩之外，液体質量通常还有与液流縱向运动方向不重合的、附加的液体环流（环式移动）。这些附加的内部流动，賦与水流一种特殊的水力学的結構，使得許多工程水力学的問題解答变得复杂化。

液体环流按其特性与成因說来，与若干因素有关。M.B.波塔波夫教授〔参考文献3〕依环流发生性質的不同，对它們的特性提出了最全面的描述。

我們来談談在M.B.波塔波夫图形中环流的主要形式，並且尽可能地給它們以反映环流本性的名称^①。

离心式环流 在弯曲的水流中，与弯曲軸的平面相垂直的方向上縱向流速分布不均匀时，在惰性离心力的影响下，就形成离

① 在給环流定名时，曾考虑了A.C.奥菲榮罗夫的意見〔参考文献25〕。

心式环流。这种环流的軸綫方向与水流縱向流动的方向相重合，而环流本身的方向，則与水流呈橫交方向。因此，这种形式的环流，也叫作橫向环流。

在明渠中，当垂綫上縱向流速分佈系向河底漸減时，在河灣处永远会发生明显的环流，其河底水流指向凸岸。按其强度來說，离心式环流在其他各种形式的环流当中，是为首的一，因此，它在水工建筑物的工作中，起有很大的作用，尤其是在水渠的弯道处，在取水建筑物，分水建筑物及其他建筑物中河底泥沙的分佈中，以及在天然河槽形成过程中，所起作用更大。

正如以下所述，离心式环流是惰性环流的一种变态。

伯尔式环流 伯尔式环流是因科里奥里斯力的作用而引起的。科里奥里斯力也造成橫向环流，但是，这种环流只在沿子午綫方向流动的大河中才表現得比較显著。在北半球上，如順河流看（即面向下游——譯者），这种环流呈順时針方向冲刷右岸，在南半球上，呈逆时針方向，並促使河槽向左岸方面逐漸移动。这种形式的环流，由于不很强大，通常，在水工建筑物的工作中不起重要的作用。

风生环流 在风的作用下形成风生环流。在液流中，只是在颶側向风时，才产生这种环流。縱向风只使縱向流速沿垂綫上重新分佈。随风力不同，风生环流可能达到巨大的强度，因此，对于任何一种水工建筑物的工作都会有重大的影响，尤其是引起河槽变形，泥沙的扰动及重新分佈。自然条件下的风生环流，在定量方面还研究得不够，其特点是变化多端。

側方偏心的將液体加入主流所引起的环流。这种环流沿橫断方向发展，在明渠中及在封閉水道中都可能达到很大的强度。在某些情形下，这种环流在河槽中引起不利的冲刷，相反地，在另一些情形下，例如，在冲沙廊或冲沙渠中，可以利用这种环流作

为一种提高水流輸沙能力的有益的现象。

感应式环流或次级环流 当主动的(积极的)螺旋形运动不能包括水流的全部横断面,而只能占据其一部分时,就产生这种环流。通常,这种环流发生在宽阔的河槽中,那里,某种力引起的一个纵向螺旋形运动,会引起相隣螺旋形运动的形成(其轴线与前者平行,但旋转方向相反)。在明渠中,每个感应式环流占据地带的宽度为水深的1—1.5,它又在相隣区段上引起环流。这种环流的强度不大,因此,对于水工建筑物来说,它没有特殊意义。

摩擦式环流 在不通的、不流动的地带(牛轭湖,水湾,斜丁坝之间的地段,水底坑道等),当水流在其附近运动时,作为液体与液体摩擦的结果,以及当水流不密贴地绕过河岸突出部,河底突出部或建筑物的边缘时,就形成摩擦式环流。随条件的不同,环流的轴线可以为水平方向,铅垂方向或倾斜方向。当水流流速很大时,这种形式的环流可能相当强烈,在某些情形下,决不能不考虑它。这种环流能够搅起泥沙,而在斜丁坝之间的地段和水湾中则防止泥沙沉积下来。在为了截获与排走泥沙而修建的河底坑道中,摩擦式环流提高水流的輸沙能力。

人工式横向环流 或是利用水流本身的能量,或是从外面加入能量,都能造成这种环流。

第一种方法,即利用水流本身能量的方法,系M.B.波塔波夫研究出来的,在水工实践中已广泛应用,其原理是应用固定的导流盾板,放成与水流成有利的倾角,结果就造成一定方向和一定强度的横向环流。应用这种方法,可以防止底沙进入进水口,可以进行河底浚深工作,提高水流的輸沙能力,防止河岸和建筑物的冲刷等。

第二种方法是基于放在水流中的盾板沿一定方向移动的力学作用,或用在能保证必要的环流的方向上放出或排出液体的方法

所产生的水力学作用，来造成人工式环流。这种方法目前尚未得到实际应用。

*

*

*

在以上所讨论的水流底各种形式的天然环流中，按其强度来说，对于水工建筑物具有最大意义的为下列各种环流：离心式环流，侧方偏心的加水所引起的环流，风生环流与摩擦式环流。

偏心加水所引起的环流，风生环流与摩擦式环流，都是外在因素作用的结果。第一种与最后一种环流，很容易预估，并且将建筑物加以合理改造（整理）后就能得到调节，因此，在水流的控制方面，这两种环流不引起特殊困难。风生环流完全取决于风力与风向，因此，无论定量方面，或是定性方面，都只能预估地、大约地确定。在必要时，可以用相当的遮擋水流的方法来消除风的影响。

水流弯道处发生的环流，其情况就是另一种样子。这种环流不是与外在因素发生关系，而是与水流内力，即与惯性离心力发生关系。这一情况使得离心式环流与其余各种形式的环流有本质上的差异，使得离心式环流取决于水流的内部结构及其能量特征。这种环流的特点是它在时间和空间上都是不变的，因此，它对建筑物起有连续地形式不变的作用，这一点就更提高了这种环流的作用。

水流弯道处的环流极为强烈，在水底附近地带表现得尤其厉害，这一点对于河槽能变形的建筑物来说具有特别重要的意义，因为在某一些地点可能使河床发生冲刷，而在另一些地点，却又使河床淤积。

与惯性内力作用有关的环流，以后我们就称为惯性环流，这种环流不仅在水流弯道处出现，而且也在与任何一种惰力出现有关的若干其他场合中出现。

对于与底沙运动有关的各种建筑物，首先是对于进水口，惰性环流具有很大的意义。忽视惰性环流，通常就会使进水口得到大量的泥沙，这对于由山区河流供水的水电站是特别不利的，因为在山区河流中洪水时泥沙含量高达2—3%或更大，这样每秒10立方公尺的流量在一昼夜間其固体逕流就达到25 000立方公尺。

在引水道式水电站中，泥沙除了淤塞引水道之外，还对于水輪机，管壁，急流槽及其他建筑物的衬砌进行有力的磨耗。这种磨損可能极为强烈。例如，含有大于0.25~0.40公厘的石英沙的土壤顆粒；有时在一次洪水期中就能够把水輪机的工作輪磨損到如此严重的程度，以致水輪机的效率降低10—25%。

以很大速度通过建筑物的固体泥沙顆粒，对建筑物的作用类似磨石作用。水流通过的速度越大，也就是說沙粒在水輪机及其他建筑物的表面上滑动的速度越大，則泥沙的磨損能力就越大。即使水中石英沙的含量很小，然而在流速很大时，水輪机的磨損也极强烈。

由于磨損地点是气蚀現象的发源地，在这两种因素共同作用下能繼續加深水力机械设备的破坏，这种情况就更加加强了泥沙的作用。

取水时防止泥沙的問題如此之复杂与重要，也說明了下一事实，即进水口的分类首先应按防止泥沙的方法来划分。

取水时防止底沙的最初的一些工程建議中，系以水流运动为平行流束的簡化图形为基础的，因此，就把水流分成为无泥沙的表层(上层)与滿含泥沙的底层。将水流的表层引入渠道，而将推移質泥沙通过进水口的檻处的专設孔或洩水建筑物附近的专設孔，連續地或周期性地排到下游河段去。

上述的方法只有在水流結構真正符合平行流束图形的情形下，才能保証进水口有良好的工作。但是，在进水口前面水流中能

維持平行流束的情形極為罕見。甚至在具有很高的進水檻時，上升的環流也能將它揚起的底沙推移入進水口中。

因此，蘇聯在近年的實踐中，防止泥沙的方法日益更多地以考慮和利用環流為基礎，這在許多情形下，比早就採用的基於將水流分成表層與底層而防止泥沙的其他各種方法，得到更好的結果。

2. 惰性環流示例

如上所述，惰性環流對於底沙分佈與運動來說，具有最大的意義。但是，在計算和利用環流時常感困難，這是由於對惰性環流的本性及物理實質的概念不完整，後者又是由於對水流內力的概念不完整的原故。

根據作者的意見，下述各例能夠幫助更好地說明惰性環流現象。

水流在障礙物前的滯積 在障礙物前被滯積的明渠水流中，沿垂線的縱向流速分佈示於圖1, *a*。在建築物滯積處，水流的每個質點都受到余壓力，即因障礙物前所停的液體體積所生的余壓力，余壓力超過水靜壓力的數值等於其動能，如圖16所示。在障礙物旁比較平靜的液體部份中，這些壓力容易相等，產生某一種平均的余壓力，這種余壓力以水位抬高的形式表現出來，其數值

$h = \frac{u_{cp}^2}{2g}$ ，式中 u_{cp} —— 水流中沿垂線的平均流速。障礙物附近垂直流速的最大值允許作一個假定：這裡的壓力分佈服從水靜壓力法則。在這種情形下，障礙物前的液體體積從障礙物方面受到的壓力為

$$P = \gamma h = \frac{\gamma u_{cp}^2}{2g} = \frac{\gamma u_{cp}^2}{2}$$

(參看圖1, σ 的圖形)。

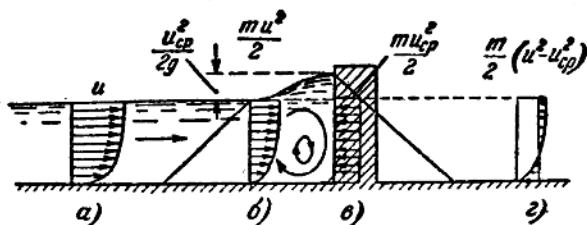


圖 1 障礙物前水流淤積的現象

忽略能量損失不計，可以假設圖 1, b 與 c 中圖形的面積相等。這兩個圖形之和產生一個新圖形(圖 1, d)，這個新圖形表明作用於障礙物前液體體積上的，並決定環流方向的力。在這個體積的上部，液體運動方向與淤積水流的運動方向相同，而在河底附近，水流方向就變成相反的。由於連續性，在建築物前也發生兩個方向上的垂流運動，與水平流動一起造成一個水平的水浪。這種水浪通常發生在取水建築物的檻前，尤其是正面進水口的檻前(圖2)，這一點在模型中觀察得很清楚。

正如從圖 1, d 中看到的圖形特性那樣，在障礙物附近的河底環流流速就數值說可能很大，並且常常超過在障礙物前的正的河底流速。這種情況可以用一些現象說明，例如對於樁、橋墩及其他建築物在上游方面的強有力的掬刷。



圖 2 進水口檻前的環流

應該指出，在水流繞過障礙物時，上述“平面”問題的圖形，由於三度空間而變得複雜起來。可能並不在障礙物前形成連續的水平水浪，因為河底的液體質點在離開障礙物時就遇到淤積的水流，河底液體質點與其說是向上升，不如說是向旁流走，繞過障

碍物,如图 19 所示。但是这裡现象的本質仍与以上所述情况相同。

在水流弯道处,我們观察到水流在障碍物前拥挤的现象的发展。

水流弯道 在水流弯道处,水槽的凹壁起着障碍物的作用。与以上所述那种情形的不同之处,就是这裡的障碍物的位置不是正面的,而是与水流斜交成一个角度,这样就使环流特性有些改变。

現在在水流横断面的平面上来研究这个现象,即在輻射方向上来研究这个现象,可以确定,在凹壁前被拥挤的液体質点,受到自曲率中心向外的惯性离心力 $F = \frac{mu^2}{r}$ 的作用。由于这种离心力的存在,水流自內壁向外壁挤紧,在外壁附近形成增高的压力。在明渠水流中,在这种挤压现象的同时,外壁附近水位升高,造成横向坡度。

横向坡度,是指向曲率中心的水静压力的过剩力出现的先决条件,此项过剩力等于平均离心力,并在同一垂綫上的各点处均相同。由于在一根垂綫上的不同液体質点的纵向流速 u 是不同的,作用于这些質点上的离心力 F 也将会不同。

实际上,如图 3, a 是沿垂綫上纵向流速的分佈图,而图 3, b 是相应地指向外壁的离心力分佈图。用图 3, c 上的图形表示引起横向坡度的水静压力,系向內壁作用。离心力图与水静压力图的代数和(图 3, d),与前述情形一样,决定輻射平面内环流的特性。

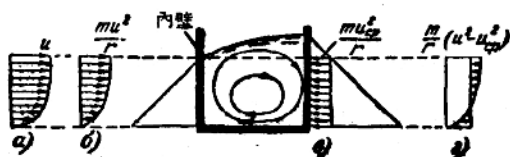


图 3 水流弯道处惯性环流的形成

与障碍物前直接淤积的情形不同之点在于：水流弯道中的环流不是沿弯道顺向发生的，而是在弯道横向上发生的，因此通常称离心式环流为横向环流。环流的横向使水流在弯道处成为螺旋形的性质，这一点在实验室条件下可以容易而明显的发现。

当垂线上纵向流速为普通分佈时，如从图 3， v 所推論出的一样，环流軸綫靠近河底，而横向流速在水流底部附近达到最大值，在水面附近的横向流速要小得多。相反地，纵向流速在水面附近大些，在河底附近要小些。纵向流速矢量与横向流速矢量的几何和，决定在水流不同深度处流綫的方向。显然，水面流綫的曲率，比水底流綫的曲率要小得多(图 4)，許多研究者的試驗資料都証实这一点。現在还要討論一个与水流惯性力有关的例子，即水流的引出。

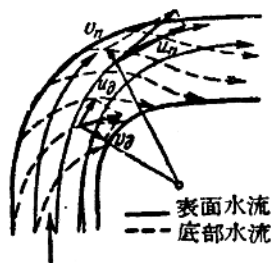


图 4 水流弯道处的惯性环流

液体的侧面引出 大家知道，在液体侧面引出的区域内，观察到水位下落，这是由于克服惯性力和在引出方向上造成额外流速而消耗能量的结果。这时所形成的水面横向坡度，决定于与其相应的水静压力，此项水静压力给液体质点以指向引出方向的加速度。对于同一垂线上的各点来说，此项加速度相等。液体各质点在所得到的加速度的影响下在引出方向上所能得到的流速，取决于它在这种加速度影响下所处历时的长短。

纵向流速较小的水底质点，在引水作用区停留较久，因此得到较大的流速。相反地，水面质点得到较小的侧向流速。这种情况就决定了水流的水面层与水底层对侧面引出的补给是不成比例的(图5)。

显然，在静止水池中引出水流时，就不会发生这种水流补给

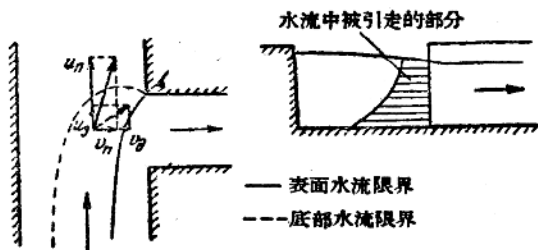


图5 水的侧向引走

不成比例的現象。

应该指出，通常侧面引流现象还因下列同时发生的惰性现象而变得更为复杂化，如水流的一部分在侧方引流槽下游边缘处的淤积现象，以及引走水流部分的弯曲，这些现象也能引起较强烈地攫夺水底层的环流。

所有这些现象合在一起，通常就决定了在侧面引出水流时水流表面变形的一般情景，並示于图6中〔参考文献4，第171页〕。这时在出流的上游边缘区段处，观察到水位下落最甚。从周围的水质点来的水静压力也指向这个压力最低的地点，这种水静压力

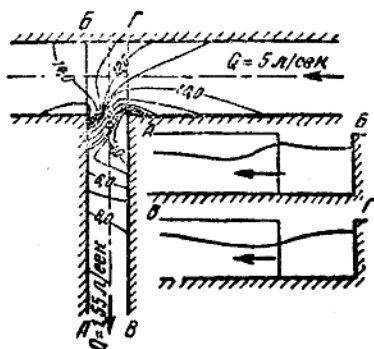


图6 侧向引水时液体表面的变形

决定着水流底层的运动。由于液体的連續性与不可压缩性，水流底层加强地流向一个地点，就使它强烈地上升到液体的上层中去，甚至在有槛存在时也能洩入出流槽中。

主要在上游边缘区段中，将水底泥沙推移到侧方进水口中，这就促使若干著

者建議修筑梯級檻，檻的高度向進水口下游方向遞減。當然，進口檻對於防止泥沙的進入起有一定的影響，但是，只能達到這樣一種程度，即一般說它能防碍液體側方出流的那種程度（即防止泥沙進入的程度越大，則阻碍側方出流的程度也越大，反之亦然——譯者），这样就減弱了指向出流方向的橫向坡度的形成，也削弱一定水力粒徑的泥沙的鉛垂上升程度。但是，決不能期望檻有很大的效力，因為檻並不能夠使進水口前所發生的環流現象的物理方面有重大的改變。

根據以上所討論的一些例子，可以作出一項結論，即慣性環流是水流各質點能量特征不同的結果，而能量特征的不同，又因橫斷面上縱向流速分布不均所引起。在這個分布中流速梯度的數值，決定着環流的強度。

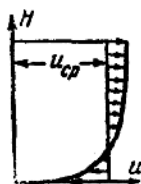


圖 7 關於環流特性的決定

如果不是按力分布圖，而是按沿垂綫上縱向流速分佈圖來直接確定慣性環流特性時，就可以大大簡化。為此就需要從縱向流速分佈圖中減去沿垂綫平均的流速分布圖。這樣所得到的新分佈圖（圖 7），就以某一種流速比例尺反映環流特性。流速大於水流平均流速的液體質點（在這種情形下即水面層），

將繼續向壓力升高區域運動；縱向流速較小的水底質點，將向壓力降低區域移動。

因為水底區域中，由於底部阻礙（制動）作用使縱向流速比平均流速小得多，在這個區域中液體運動永遠朝着壓力降低的方向。這就解釋了為什麼在試驗設備中清楚地觀

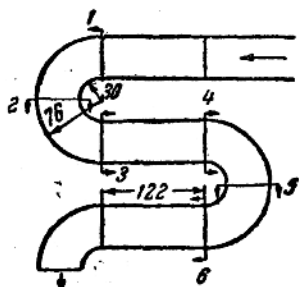


圖 8 順序具有兩個彎道的渠道

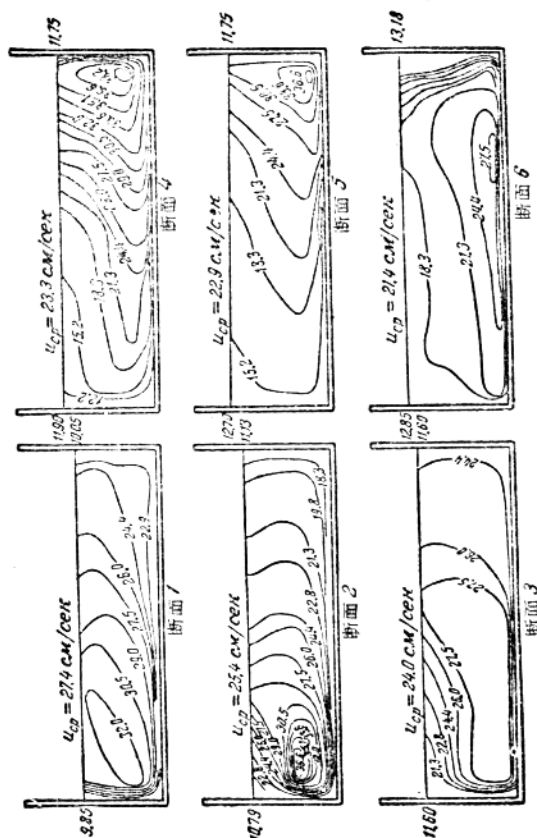


图 9 顺序具有两个成为 180° 的弯道的明渠水流中的纵向流速分布

察到水底流綫有很大的稳定性。

利用以上所述法則，就可以很容易地解釋某些驟然看来很复杂的水流环流現象。例如，在莫克莫尔的試驗中曾观察到(参考文献 28)，在顺序具有两个成为 180° 的弯道的明渠水流中(图8)，在第一个弯道处通常表层水流向河槽的凹壁擠紧，而在第二个弯

道的全长上却仍紧挤向凸壁处。研究沿这种水流的纵向流速分布(图9),就可以看出,由于在第一个弯道处造成螺旋形运动,在槽壁及槽底附近的减缓水流

逐渐向水面层移动,同时改变了第二个弯道前流速分布的特性。在第二个弯道开始处(断面4),沿垂线的纵向流速分佈图与原有形式相比已受到巨大的改变(图10),这样就决定了在

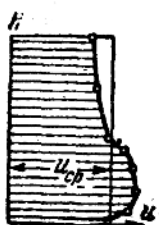


图 10 第二个弯道之前垂线上纵向流速的分布



图 11 第二个弯道中的环流特性

第二个弯道处有双重环流,即有指向内壁的水面水流与水底水流(图11),这一点已在试验中观察到。

第二章 利用惰性环流防止泥沙的各种现有方法

前面已经谈过,在与底沙有联系的建筑物的工作中,液体环流通常起着坏的作用。但是,因为液体环流(尤其是惰性环流)在水流中造成完全肯定的底沙重新分布,某些地方没有底沙,另一些地方则充满底沙,显然,可以把建筑物设计成这样,使其中所形成的惰性环流能令泥沙分布成为所希望的那样。在某些情形下,可以使取水地点造成澄清水流的条件,而在另一些情形下,在一定地点集中泥沙以便以后清除泥沙。在取水问题上,利用环流来防止泥沙的各种建议也就基于这两个原则。

早在很久以前,就发现了将渠首布置在河流的凹岸处,在颇大的程度上就可以防止渠首被泥沙淤塞。这种情况也就是利用水流弯道处发生的环流的最初一些建议的出现原因。以后,为了将

泥沙引离进水口，出現一些使水流在进水口前受到人工弯曲的建築。

例如，1929年 Д.Я. 索科洛夫斯基教授〔参考文献16〕曾建議一种在調節閘前具有輔助的曲綫形渠道的进水口(图12)。在曲綫形渠道中发生的横向环流，将底沙自进水口引至凸岸，这种环流能防止泥沙进入渠道。为了有效地将泥沙引离进水口起見，必須使通过进水口的流量只是曲綫形渠道流量的一小部分，小的程度应使水流基本部分不向进水口方面弯曲。試驗研究証明，引走的那一部分流量不应超过輔助渠道的流量的一半。当取水部分增加到超过50%后，輔助渠道所引起的水流弯曲就减少，而将泥沙引离进水口的环流就会减弱。

在这种情形下，在調節閘前修建进水檻，如前所述，对于防止泥沙进入渠道來說，只有局限的作用。

1935年 Д.Я. 索科洛夫斯基〔参考文献16〕提出一种在調節閘前具有蝸室(螺旋形)的新型进水口(图13)，並給出蝸室的計算方法。进水口工作的实質就在于水流在进入渠道入口之前藉蝸壳成为渦漩。带有泥沙的底部水流向渦壳中心形成低压的地区流去。在那里，带有泥沙的底部水流通过底孔曳出，並經過专门冲沙廊同曳入河中。为了保証泥沙能通过冲沙廊冲走起見，必須用填或截流堤使蝸壳中与河流中的水位达到相应的差值。在这种类型的取水建筑物中，冲沙流量极小。冲沙流量不超过进入渠道的流量的10%。

从蝸壳中取水的问题，可以像图13所示那样用堰来解决，这种办法較好，但是，也可以用入口处設檻的普通类型的調節閘来解决。这种类型的进水口的缺点，就是通过堰取水时其取水前綫过长。如調節閘窄而深时，就会使蝸壳工作受到某种程度的破坏。