

ГИДРАВЛИКА, ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ И ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ОСОБЕННОСТИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

Б.А. Животовский, Н.К. Пономарёв

Кафедра гидравлики и гидротехнических сооружений
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Макля, 6, Москва, Россия, 117198

В статье рассматриваются особенности циркуляционных течений и их использование в вихревых водосбросах при проектировании высоконапорных гидроузлов. Приводятся результаты специальных лабораторных исследований, при проведении которых зафиксированы определенные формы движения, сменяющие друг друга в определенной последовательности. В опытах с закрученной струей обнаружены аналогичные структуры, а также наличие области с обратным течением в центральной части и ее влияние на интегральные характеристики циркуляционного потока в трубе.

Ключевые слова: циркуляционное течение, кавитационная эрозия, вихрь, вихревой водосброс.

При проектировании высоконапорных водосбросов в горных узких створах реки возникают научные и инженерные проблемы, связанные с высокими (до 50—60 м/с) скоростями течения и компоновкой гидроузла, требующие новых нетрадиционных подходов решения этих задач. К этим проблемам относятся:

- гашение избыточной кинетической энергии сбросных потоков;
- защита от размыва русел рек и береговых склонов в нижнем бьефе гидроузла;
- защита от кавитационной эрозии при обтекании бетонных поверхностей;
- размещение водосбросных сооружений в стесненных условиях створа сооружения;
- уменьшение уровня вибрации скального массива.

Решение указанных проблем возможно путем придания осевому потоку вращательной компоненты скорости в отводящем тоннеле шахтного водосброса, где узел соединения вертикальной шахты с горизонтальным отводящим водоводом модернизирован и выполняется по схеме рис. 1.

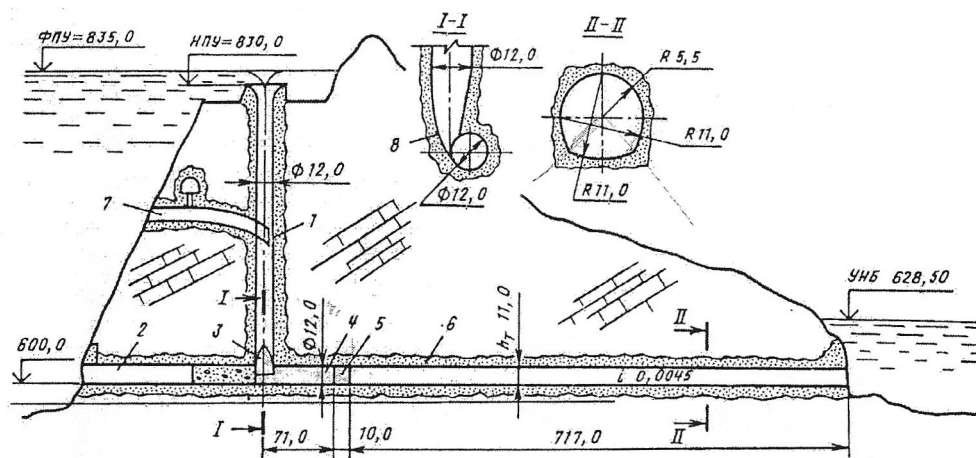


Рис. 1. Вихревой водосброс гидроузла Тери (Индия)

При такой схеме на каждую частицу жидкости в отводящем водоводе будет дополнительно действовать центробежная массовая сила, в результате чего существенно изменяется структура течения. Водосброс при этом будет называться вихревым, а циркуляционные течения в отводящем водоводе приобретают следующие особенности [1—4; 6; 7]:

- положительный радиальный градиент давления (в то время как в осевом потоке этот градиент равен 0);
- повышенное гидравлическое сопротивление;
- замыкание кавитационного факела не на стенке водовода (как при осевом потоке), а в толще потока (вследствие радиального градиента давления), без воздействия непосредственно на твердые границы;
- уменьшение абсолютной скорости у стенки вдоль отводящего водовода (затухание закрутки потока), в то время как в осевом потоке она постоянна (равна 0);
- осевая скорость в центральной области минимальна, а в осевом потоке — максимальна.

Использование этих особенностей циркуляционных течений позволяет эффективно решать вышеперечисленные проблемы.

Гашение избыточной кинетической энергии потока и защита русла реки и береговых склонов от размыва в нижнем бьефе может быть решена на основе гашения избыточной энергии, которое осуществляется в пределах водосбросного сооружения, а поток выпускается в нижний бьеф с допустимой скоростью (20—25 м/с).

Надежность защиты бетонных поверхностей от кавитационной эрозии возрастает за счет возникновения положительного радиального градиента давления, замыкания кавитационного факела в толще потока и уменьшения абсолютной скорости у стенки вдоль отводящего водовода.

Размещение отдельных сооружений гидроузла в стесненных условиях узкого горного створа достигается путем использования строительных водосбросов в качестве отводящих водоводов вихревых водосбросов на последующий эксплуата-

ционный период. Заметим, что при этом существенно снижаются капитальные затраты и сроки строительства гидроузла.

Уровень вибрации скального массива в примыкании к водосбросному сооружению автоматически снижается благодаря конструкции вихревых водосбросов, где гашение энергии происходит рассредоточено и плавно по всей длине отводящего водовода.

Таким образом, использование в вихревых водосбросах циркуляционных течений позволяет решать основные проблемы, возникающие при строительстве гидроузлов в стесненных условиях горного створа с крутизной склонов 40—50° и высотой до 300 м и более.

Еще одной особенностью циркуляционных течений является распад вихря (vortex breakdown), через который осуществляется смена форм движения в закрученном потоке в трубе или в закрученной струе, выпускаемой под уровень в НБ.

Для изучения этого явления были выполнены лабораторные исследования под руководством профессора Б.А. Животовского на кафедре гидравлики и гидротехнических сооружений РУДН [5], при проведении которых были зафиксированы следующие формы движения, сменяющие друг друга в строго определенной последовательности (рис. 2):

- а) форма с резким уменьшением диаметра паровоздушного жгута — непосредственно за завихрителем на начальном участке отводящего водовода ($\Pi \geq 0,65$);
- б) прямолинейный вихрь (ось вихря совпадает с осью трубы $\Pi \geq 0,55$);
- с) спиралевидный вихрь (ось вихря не совпадает с осью трубы $0,26 \leq \Pi < 0,55$);
- д) закритический вихрь ($\Pi < 0,26$).

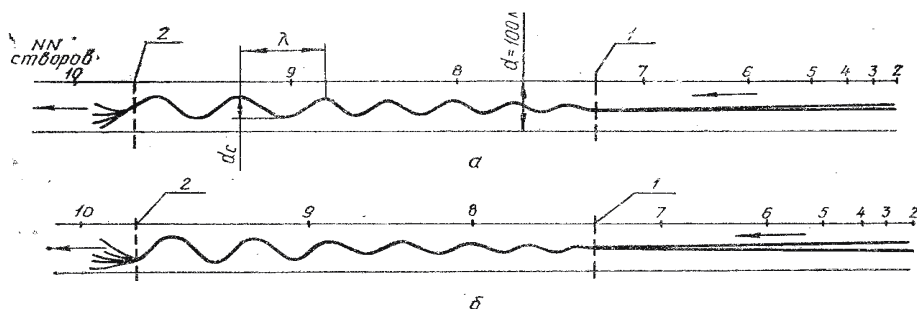


Рис. 2. Формы движения в отводящем водоводе:

- 1 — граница перехода прямолинейного вихря в спиральный;
- 2 — граница распада спирального вихря

Можно предположить, что смена форм движения определяется действием центробежных сил, которые характеризуются параметрами закрутки Π , Sn и др. (их значения, установленные экспериментально, указаны выше).

В опытах с закрученной струей [7] были обнаружены аналогичные структуры, а именно:

- 1) конический вихрь (с резким изменением размеров) (рис. 3 д);
- 2) пузыревидный или прямолинейный вихрь;
- 3) спиральный вихрь.

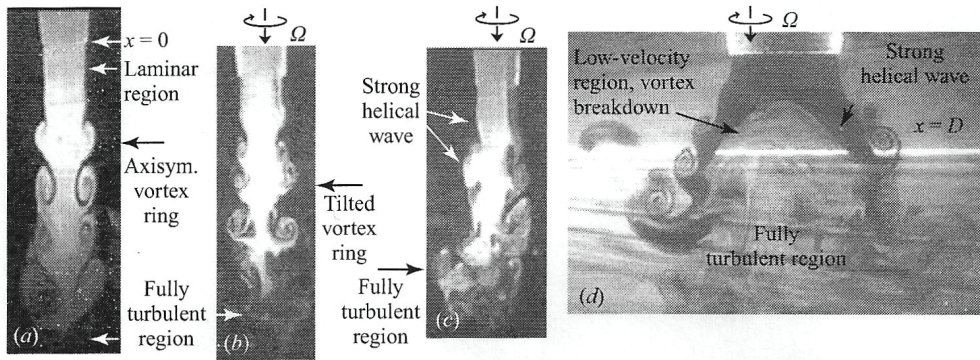


Рис. 3. Режимы течения в закрученных струях

Обращает на себя внимание, что переход от спиралевидной к закритической форме движения происходит при тех же критериальных значениях параметров Π или Sn ($\Pi \leq 0,26$, $Sn \leq 0,17$), что и для области течения, где распределение тангенциальной скорости подчиняется закону квазитвердого вращения. Этот переход был отмечен рядом исследователей, назвавших его по-разному: областью пассивной трансформации [8]; областью квазитвердого вращения [2]. В настоящей работе на основе обобщения форм движения данное явление квалифицировано как закритическая форма циркуляционного течения.

Сравнение условий распада вихря в циркуляционном потоке в трубе и в свободной закрученной струе, выпущенной под уровень, указывает на их идентичность. С учетом этого распад вихря, по нашему мнению, можно квалифицировать более точно — как переходный процесс, в котором реализуется способность циркуляционного течения сохранять устойчивость в пределах каждой формы движения с переходом к другой форме через распад вихря. При этом заметим, что характерным признаком распада является экспансия вихря.

Рассмотрим более подробно циркуляционное течение в трубе применительно к вихревым водосбросам, для которых начальная закрутка принимается в пределах $\Pi_0 = 0,6 \div 0,8$; остаточная закрутка на выходе из отводящего водовода $\Pi_{ост} = 0,1 \div 0,35$ при длине отводящего водовода $l/d = 70 \div 100$. Для оценки работы вихревого водосброса необходимо знать местоположение распада вихря, так как распад может сопровождаться дополнительными гидродинамическими нагрузками на сооружение.

Параметры, определяющие местоположение распада вихря представлены в таблице.

Таблица

Π_0	l/d	$\Pi_{вых}$	Форма движения на выходе	Расстояние от выходного портала l/d
0,8	97	0,35	Спиралевидная	0
	100	0,33	-----	15
0,7	70	0,32	-----	5
	100	0,23	Закритическая форма	<5

Из таблицы видно, что распад вихря (переход от спиралевидной формы к закритической) локализуется вблизи выходного портала отводящего водовода, но может выйти за пределы тоннеля. Отметим, что во время проведения эксперимента с распадом вихря [4] усиленных вибраций не наблюдалось.

Следует также отметить, что при проведении эксперимента наблюдалась форма движения с обратным течением [5], где жидкость продолжает вращаться в ту же сторону, а осевая компонента скорости меняет знак, и жидкость движется вдоль трубы в противоположном направлении. Область с обратным течением незначительна и в центральной части закрученного потока. Это явление можно не учитывать в расчетах, если можно пренебречь радиальной составляющей скорости и она мала. Причиной этого течения является появление в определенной области течения (на малых радиусах) положительного градиента давления [4].

Очевидно, что обратное течение слабо влияет на интегральные характеристики циркуляционного потока в трубе, так как это течение занимает всего лишь 1—2% от общей площади сечения и расположено в центральной части потока, где к тому же продольные скорости минимальны.

В качестве примера вихревого водосброса, где реализуются особенности циркуляционных течений можно привести гидроузел Тери (Индия). В качестве отводящих водоводов в вихревых водосбросах использованы строительные тоннели. Высокая оценка работы вихревых водосбросов на ГЭС Тери, данная специалистами [9], принимавшими участие в исследованиях и проектировании комплекса водосбросных сооружений гидроузла, указывает на необходимость продолжения детальных исследований циркуляционных течений в гидротехнических сооружениях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ахметов В.К.* Структура и гидродинамическая устойчивость закрученных потоков с зонами рециркуляции. — М.: МГСУ, 2009.
- [2] *Волианик В.В., Зуйков А.Л., Мордасов А.П.* Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [3] *Животовский Б.А.* Водосбросные и сопрягающие сооружения с закруткой потока. — М.: Изд-во РУДН, 1995.
- [4] *Животовский Б.А.* Гидравлика закрученных потоков и их применение в гидротехнике: Дисс. ... докт. техн. наук. — М., 1986.
- [5] *Животовский Б.А.* Экспериментальные исследования закрученных потоков жидкости. — М.: Изд-во УДН, 1982.
- [6] *Billant P., Chomaz J.- M., Huerre P.* Experimental study of vortex breakdown in swirling jets // *J. Fluid Mech.* — 1998. — 376. — P. 183—219.
- [7] *Liang H., Maxworthy T.* An experimental investigation of swirling jets // *J. Fluid Mech.* — 2005. — 525. — P. 115—159.
- [8] *Зуйков А.Л.* Динамика вязких циркуляционных течений в трубах и поверхностных вихрях: Дисс. ... докт. техн. наук. — М., 2009.
- [9] *Родионов В.Б., Финк А.К., Карпинская А.Г.* Водосбросные сооружения гидроузла Тери в Индии: проектные решения и гидравлические исследования. — М.: Фоллиум, 2007.

FEATURES RECIRCULATING FLOW IN HYDRO-CAL FACILITIES

B.A. Zhivotovsky, N.K. Ponomarev

Department of Hydraulics and Hydraulic Structures
Engineering faculty
Peoples' Friendship University of Russia
Michuho-Maklaja str., 6, Moscow, Russia, 117198

At the article features of circulating currents and their use in vortex spillways are considered at design of high-pressure water-engineering systems. Results of special laboratory researches at which carrying out the certain forms of movement replacing each other in certain sequence are recorded are given. At the experiences with the twirled stream similar structures, and also area existence with a contraflow in the central part and its influence on integrated characteristics of a circulating stream in a pipe are found.

Key words: circulation within, cavitation erosion, vortex, vortex spillway.