

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/121TVN115.pdf>

DOI: 10.15862/121TVN115 (<http://dx.doi.org/10.15862/121TVN115>)

**УДК 626-31**

**Животовский Борис Анатольевич**

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»  
Россия, Москва<sup>1</sup>

Профессор кафедры гидравлики и гидротехнических сооружений  
Доктор технических наук  
E-mail: [zbarudn@yandex.ru](mailto:zbarudn@yandex.ru)

**Пономарев Николай Константинович**

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»  
Россия, Москва

Декан инженерного факультета  
Заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнических сооружений  
Кандидат технических наук  
Профессор  
E-mail: [rudneng@mail.ru](mailto:rudneng@mail.ru)

## **Совершенствование гидравлического расчета шахтного вихревого водосброса**

---

<sup>1</sup> 117198, ул. Миклухо-Маклая, д.6

**Аннотация.** Конструкция вихревого шахтного водосброса связана с высокими напорами и скоростями сбросного потока. В этих условиях возникает опасность размыва русла нижнего бьефа и кавитационных разрушений бетонных поверхностей сооружений. Для эффективной борьбы с этими явлениями нужно использовать течение, которое обладало бы свойствами, способствующими устранению указанных проблем. Таким течением в шахтно-вихревом водосбросе является продольно-циркуляционное течение, которое возможно создать искусственным путем придавая осевому течению вращательную компоненту скорости с помощью завихрителя. При расчете и моделировании вихревых систем с продольно – циркуляционными течениями используют критериальные соотношения: число закрутки Хигера-Бэра, параметр закрутки по Животовскому, число Абрамовича и другие. Предложена зависимость числа Абрамовича от параметра закрутки Животовского. Не учет влияния паровоздушного ядра может привести к недостоверным результатам расчёта. Анализ показывает, что затухание закрутки в потоках с воздушным ядром происходит менее интенсивно, чем в потоках без воздушного ядра.

При расчёте давления на стенке проточного водоотводящего тракта вихревого водосброса в качестве основного метода рекомендуется принимать метод изменения потока момента количества движения, как наиболее строгий. Наличие обратного течения в виде зоны рециркуляции, образующейся в продольно-циркуляционном течении сразу после завихрителя при большой интенсивности закрутки, приводит к уменьшению коэффициента расхода и пропускной способности водосброса. Опыт эксплуатации вихревого водосброса на ГЭС Тери позволяет положительно оценить новые инженерные решения, заложенные в основу его конструкции и дать оптимистическую оценку перспектив использования аналогичных решений при создании водосбросных сооружений высоконапорных гидроузлов.

**Ключевые слова:** продольно-циркуляционное течение; поток момента количества движения; расход жидкости; окружная составляющая скорости потока; осевая составляющая скорости потока; полная скорость; давление жидкости на стенки проточного тракта; коэффициент расхода; кавитация; критерии подобия при моделировании; зона рециркуляции; диссипация энергии.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Животовский Б.А., Пономарев Н.К. Совершенствование гидравлического расчета шахтного вихревого водосброса // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015)  
<http://naukovedenie.ru/PDF/121TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/121TVN115

Имеются различные предложения по методике гидравлического расчета шахтного вихревого водосброса [1,3-6,8,9]. Достаточно полное и последовательное изложение методики расчета, доведенной до стадии практических инженерных расчетов представлено в [4,6]. Периодические обзоры по работе сооружений, излагаемые с современных позиций, являются не только полезными, но и необходимыми. Ниже приводится аналитический обзор по отдельным вопросам гидравлического расчета шахтного вихревого водосброса.

## 1. Особенности течения в шахтном вихревом водосбросе

Конструкция вихревого шахтного водосброса связана с высокими напорами и скоростями сбросного потока. В этих условиях возникает опасность размыва русла нижнего бьефа и кавитационных разрушений бетонных поверхностей сооружений. Для эффективной борьбы с этими явлениями нужно использовать течение, которое обладало бы свойствами, способствующими устранению указанных проблем.

Таким течением в шахтно-вихревом водосбросе является продольно-циркуляционное течение, которое возможно создать искусственным путем придавая осевому течению вращательную компоненту скорости с помощью завихрителя.

В создаваемом продольно-циркуляционном течении в отводящем водоводе проявляются его полезные свойства:

- положительный радиальный градиент давления (повышает давление на стенки отводящего водовода, что затрудняет возникновение кавитации);
- повышенная диссипация механической энергии жидкости (снижает скорость потока);
- затухание закрутки вдоль отводящего водовода (уменьшает полную скорость на выходе и одновременно затрудняет появление кавитации);
- замыкание кавитационного факела в толще потока (исключает непосредственное динамическое воздействие факела на обтекаемые элементы конструкции водосброса);
- рассредоточенное гашение энергии потока по длине отводящего водовода (снижает уровень динамического воздействия на конструкцию и скальный массив вихревого водосброса и повышает экологическую безопасность гидроузла).

Комплекс этих свойств, проявляемых в продольно-циркуляционных течениях, являются поистине уникальными для задач гидравлического расчета шахтного вихревого водосброса и повышения надежности его работы. Ни одним из этих свойств осевой поток не обладает.

## 2. Критериальные параметры закрутки

В закрученных потоках наряду с традиционными критериями  $Re$ ,  $Fr$ ,  $E$ ,  $Sn$  используются критериальные параметры, характеризующие интенсивность закрутки в сечениях водовода. Из числа существующих для этой цели критериальных параметров ни одному из них, по той и или иной причине, не отдается предпочтение. Тем не менее для гидравлического расчета необходимо выбрать эти параметры применительно к условиям вихревого шахтного водосброса. Ближе всего для этой цели подходят следующие параметры:

- число закрутки Хигера-Бэра

$$Sn = \frac{M}{RI} = \frac{2\pi \left( \int \rho u V r^2 dr \right)}{R \left( 2\pi \left( \int \rho u v V^2 r dr \right) \right)}; \quad (1)$$

- интегральный параметр закрутки (Животовский Б.А.[6])

$$\Pi = \frac{\tau_u}{\tau_R}; \quad (2)$$

- геометрическая характеристика завихрителя (Абрамович Г.Н.[1])

$$A = \frac{\pi R R_u}{F_{BX}}. \quad (3)$$

Здесь:  $M$  – поток момента количества движения;  $I$  – проекция потока количества движения на продольную ось;  $R$  – внутренний радиус отводящего водовода;  $u, V$  – тангенциальная и осевая компоненты скорости;  $r$  – текущий радиус;  $\tau_R, \tau_u$  – полная и тангенциальная составляющие напряжений поверхностного трения;  $V_R, V_u$  – полная и тангенциальная составляющие скорости у стенки;  $R_u$  – расстояние от центра тяжести ключевого сечения завихрителя до оси отводящего водовода;  $F_{ex}$  – площадь входного сечения водосбросного тракта.

Приоритетный выбор критериальных параметров производится с учетом следующих соображений:

- число закрутки  $Sn$  – на сегодня это наиболее используемый критериальный параметр, проверенный в многочисленных исследованиях [1-6];
- существующий метод расчета вихревого водосброса ориентирован на использование параметра  $\Pi$ , многократно проверенного и имеющего функциональные связи с другими известными критериальными параметрами, такими как число закрутки Хигера-Бэра  $Sn$ , число Россби  $R_o$ , число Анвара  $An$  и другие критерии.

Кроме того, параметр  $\Pi$  обладает тем достоинством, что определен по распределению тангенциальной и продольной скорости, близкому к фактическому (единичным профилям скорости) [3,6], что точнее тех или иных допущений о законе изменения скорости в поперечном сечении водовода.

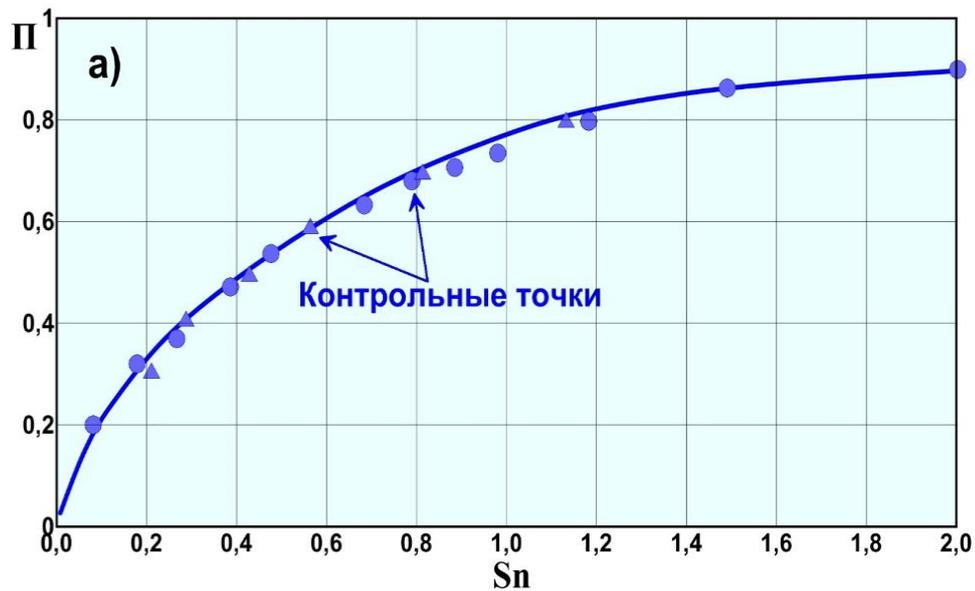
Параметр  $A$  был введен Абрамовичем Г.Н. в качестве меры интенсивности закрутки, обеспечиваемой завихрителем в начальном сечении отводящего водовода. Этот параметр удобно использовать для тех же целей применительно к шахтным вихревым водосбросам.

Связь между критериальными параметрами установлена на основе распределения скоростей (единичных профилей), имеющих теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение. Результаты расчета сведены в таблицу 1 и представлены на рис.2 в виде зависимости  $\Pi = f(Sn)$ .

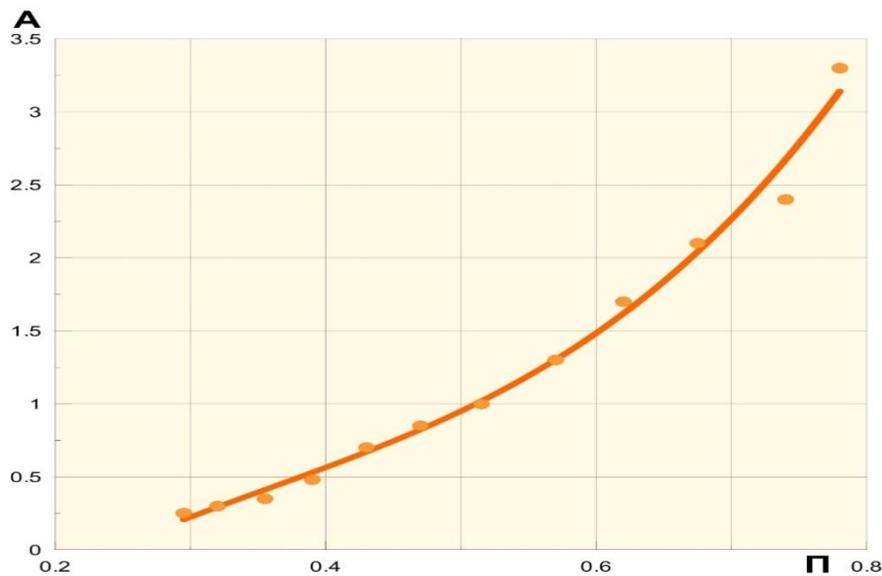
**Таблица 1**

**Расчёт параметра  $\Pi$  (составлена авторами)**

$\Pi_0$	$Sn_0$	$r_0$	$R_r$	$R/2R_r$	$A$
0,3	0,20	0,00	0,500	1,00	0,20
0,4	0,30	0,00	0,500	1,00	0,30
0,5	0,45	0,00	0,500	1,00	0,45
0,6	0,60	0,20	0,480	1,04	0,62
0,7	0,81	0,30	0,455	1,10	0,89
0,8	1,18	0,40	0,420	1,19	1,40
0,9	2,00	0,45	0,400	1,25	2,50



**Рис.1.** Зависимость параметра  $\Pi$  от значений числа закрутки Хигера-Бэра,  $\Pi = f(Sn)$  (разработано авторами)



**Рис.2.** Зависимость геометрической характеристики завихрителя от параметра  $\Pi$ ,  $A = f(\Pi)$  (разработано авторами)

Для установления связи параметра  $\Pi$  с параметром  $A$  преобразуем формулу (3), записав ее в безразмерных единичных величинах

$$A = \frac{\pi \bar{R}_u}{\bar{F}_{BX}} \bar{R} = \pi \bar{R}_u \bar{R} \bar{V}_n = \pi \bar{R}_u \bar{V}_n. \quad (4)$$

Запишем выражение для потока момента количества движения  $N$  в начальном сечении ( $x=0$ ) в безразмерных единичных величинах, вводя обозначение

$$\bar{N} = 2\pi \int \bar{V}_m \bar{V}_u \bar{r}^2 d\bar{r} \quad (5)$$

Замечая, что правые части равенств (4) и (5) представляют одинаковый поток момента количества движения и приравнявая их получим искомую связь

$$A = \frac{\bar{N}}{\pi} \quad (6)$$

Параметр  $N$  вычисляется по формуле (5) по единичным профилям скорости. Результаты расчета сведены в таблицу 2 и представлены в виде зависимости  $N=f(\Pi)$ .

Таблица 2

**Определение значения геометрической характеристики завихрителя  
(составлена авторами)**

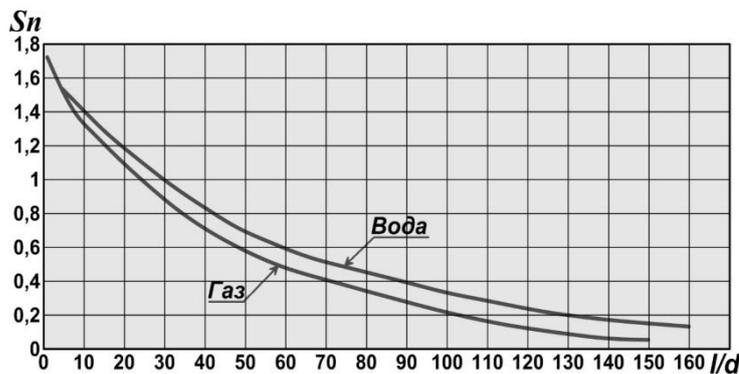
$\Pi$	$N$	$A = N / \pi$	$A^1 = A / k$	Примечание
0,50	1,4	0,45	0,544	$k = 0,9$
0,60	2,0	0,64	0,711	
0,70	3,0	0,95	1,055	
0,80	4,4	1,40	1,555	
0,85	6,0	1,90	2,111	

Проверка параметров завихрителей шахтных водосбросов Туполангского ( $d = 5,0$  м;  $H = 160$  м;  $Q = 170$  м<sup>3</sup>/с; – Узбекистан) и Дзянсю ( $d = 15,0$  м;  $H = 120$  м;  $Q = 2480$  м<sup>3</sup>/с; – Китай) показала, что контрольные точки удовлетворительно совпали с зависимостью  $A = f(\Pi)$ , что позволяет рекомендовать эту кривую для использования в гидравлических расчетах шахтных вихревых водосбросов.

### 3. Влияние паровоздушного ядра

Не учет влияния паровоздушного ядра может привести к недостоверным результатам. В этой связи сформулируем гипотезу: «При разрыве сплошности в центральной области закрученного потока изымается наиболее энергос затратная часть вихря, обусловленная большим градиентом скорости в этой области, что приводит к уменьшению гидравлического сопротивления, то есть к снижению эффективности гашения механической энергии в течениях с разрывом сплошности в виде паровоздушного жгута».

В подтверждение выдвинутой гипотезы рассмотрим зависимость  $S_n = f(1/d)$ , представленную на рис.3. Она получена на основе обобщения многочисленных данных исследований и представлена двумя кривыми: 1 – для несжимаемой жидкости с паровоздушным жгутом; 2 – для сжимаемой жидкости (газа) без паровоздушного жгута.



**Рис.3.** Зависимость числа Хигера-Бэра от отношения  $l/d$ ,  $Sn = f(l/d)$  (разработано авторами)

Из рис.3 видно, что указанные кривые зависимости, приведенные к одинаковой начальной закрутке  $Π_0$  (или  $Sn_0 = 2,0$ ) не совпали между собой. Это свидетельствует о том, что при наличии воздушного жгута эффективность гашения механической энергии жидкости снижается.

Известно, что диссипация механической энергии в закрученном турбулентном потоке вязкой жидкости обусловлена поверхностным трением о стенки отводящего водовода и внутренним трением в вихревом ядре потока, которое здесь особенно велико вследствие больших градиентов скорости, а также турбулентной диффузией. В закрученном потоке разрывом сплошности изымается часть центрально расположенного вихря, на месте которого образуется паровоздушное ядро. При разрыве сплошности изымается наиболее энергозатратная часть закрученного потока, в которой процессы внутреннего трения оказывали существенное влияние на диссипацию механической энергии.

Еще одним косвенным подтверждением снижения гидравлического сопротивления является то, что единичный поток момента количества движения (если условно заполнить паровоздушный жгут движущейся жидкостью) увеличился бы на 5-6%.

Таким образом затухание закрутки в потоках с воздушным ядром происходит менее интенсивно, чем в потоках без воздушного ядра.

Так например, для случая когда начальная закрутка равна  $Sn_0 = 1,0$ , а конечная –  $Sn_0 = 0,3$ , раскрутка потока (трансформация потока от продольно-циркуляционного в осевой) происходит на длине  $Δl = 77$ м для воды (с паровоздушным жгутом) и  $Δl = 57$ м – для газа (разница 25%).

#### 4. Пропускная способность

Одной из задач гидравлического расчета вихревого шахтного водосброса является определение его пропускной способности, которая зависит от начальной закрутки (в сечении  $x=0$  отводящего водовода). Расчет по определению пропускной способности имеет свою специфику, заключающуюся в том, что гидравлические сопротивления в закрученном потоке изменяются по длине отводящего водовода вместе с интенсивностью закрутки, что влияет на пропускную способность  $Q$  и подлежит учету.

Поэтому гидравлические сопротивления отводящего водовода по длине которого гасится основная часть избыточной кинетической энергии потока, определяется суммированием по участкам. Водосбросная система вихревого шахтного водосброса

рассматривается как напорная, находящаяся под действием сил гравитации с локальным разрывом сплошности потока паровоздушным ядром, замыкающимся внутри сооружения.

Для определения расхода такой системы используется известная формула:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}$$

Где коэффициент расхода  $\mu$  равен

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_n + \sum \xi_{вч} + \sum \xi_{вых}}}$$

Здесь:  $\sum \xi_n, \sum \xi_{вч}, \sum \xi_{вых}$  – суммарные коэффициенты сопротивления соответственно в подводящем устройстве, на участках отводящего водовода, на выходе из отводящего водовода.

Для анализа условий при выборе размеров и формы отводящего водовода удобно построить график

$$\mu \omega = \frac{Q}{\sqrt{2gH}} = f(d)$$

Существующий метод расчета пропускной способности широко применяется и корректировки не требует.

### 5. Давление на стенки отводящего водовода

Гидравлические величины взаимосвязаны между собой определенными соотношениями. Поэтому искомую величину возможно определять различными способами. Если результаты расчета идентичны, то это свидетельствует о достоверности полученных выводов. Данное положение относится также к такой важной характеристике как давление на стенки отводящего водовода. Эта величина зависит прежде всего от распределения тангенциальной и осевой скоростей. Поэтому она должна во всех случаях определяться на основе распределения скорости, используя, например, единичные профили скорости [1,6].

Могут быть использованы интегральные соотношения:

а) для удельной кинетической энергии  $E_{OK}$

$$E_{OK} = \left( \frac{\int_0^1 \bar{V}_m (\bar{V}_u + \bar{V}_m) \bar{r} d\bar{r}}{\int_0^1 \bar{V}_m \bar{r} d\bar{r}} \right) \frac{V_{CP}^2}{2g} = B \frac{V_{CP}^2}{2g}$$

Параметр  $B$ , представляющий собой выражение, стоящее в скобках,

$$B = \frac{\int_0^1 \bar{V}_m (\bar{V}_u + \bar{V}_m) \bar{r} d\bar{r}}{\int_0^1 \bar{V}_m \bar{r} d\bar{r}},$$

определен по единичным профилям скорости и представлен в виде графической зависимости  $B = f(\Pi)$  рис.4.



**Рис.4.** График зависимости параметра  $B = f(\Pi)$  (разработано авторами)

б) для расчета давления на стенке  $P_R$  по условию радиального равновесия вращающегося потока используется формула:

$$P_R = P_0 + A^* \frac{V_{CP}^2}{g} \quad (6)$$

Здесь:  $P_0$  – избыточное давление на оси потока или границе паровоздушного ядра.

Параметр  $A^*$  в выражении (6) радиального равновесия определен по единичным профилям скорости и представлен в виде графической зависимости  $A^* = f(\Pi)$  на рис.5.

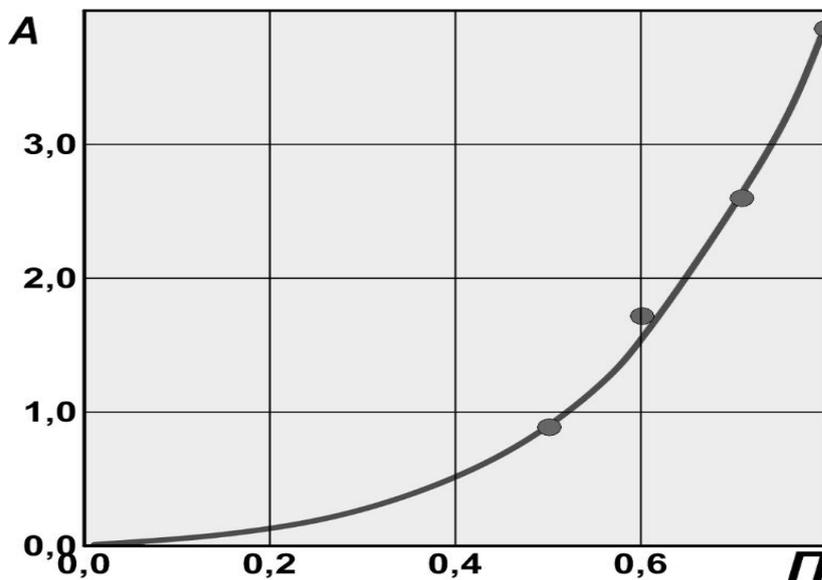


Рис.5. График зависимости  $A^* = f(\Pi)$  (разработано авторами)

в) для единичного потока момента количества движения

$$N = 2\pi \int_0^1 \bar{V}_m \bar{V}_u \bar{r}^2 dr.$$

Параметр  $N$  в этом выражении определяется по единичным профилям скорости и представлен на рис.6 в виде  $N = f(\Pi)$

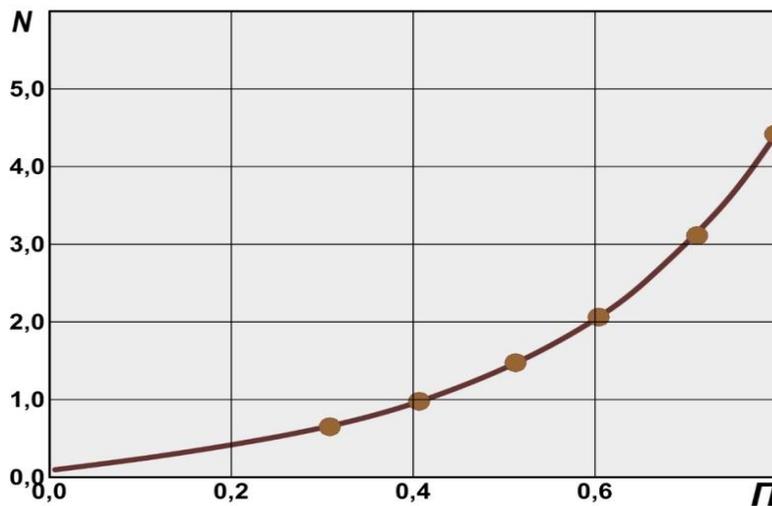


Рис.6. График зависимости  $N = f(\Pi)$  (разработано авторами)

Отметим, что способ определения давления с использованием единичных безразмерных параметров имеет то преимущество, что позволяет учесть распределение скорости близкое к фактическому. Таким образом давление на стенке можно определить следующими способами:

1. по изменению потока момента количества движения (или поверхностного трения – основной метод) [ 3,6 др.];
2. по условию радиального равновесия[6];

3. по гидравлическим сопротивлениям (по изменению удельной энергии).

Расчеты по определению давления на стенки водовода по основному методу, т.е., по изменению потока момента количества движения изложены в [5], расчеты по другим методам сведены в таблицы 3 и 4, а результаты расчетов представлены на рис.7.

На основании проведенных расчетов по трем использованным методикам можно сделать вывод, что результаты идентичны. Следовательно, мы получили еще одно подтверждение достоверности расчетных результатов по определению давления на стенках водовода.

**Таблица 3**

**Определение давления на стенки проточного тракта по изменению удельной энергии  
 (составлена авторами)**

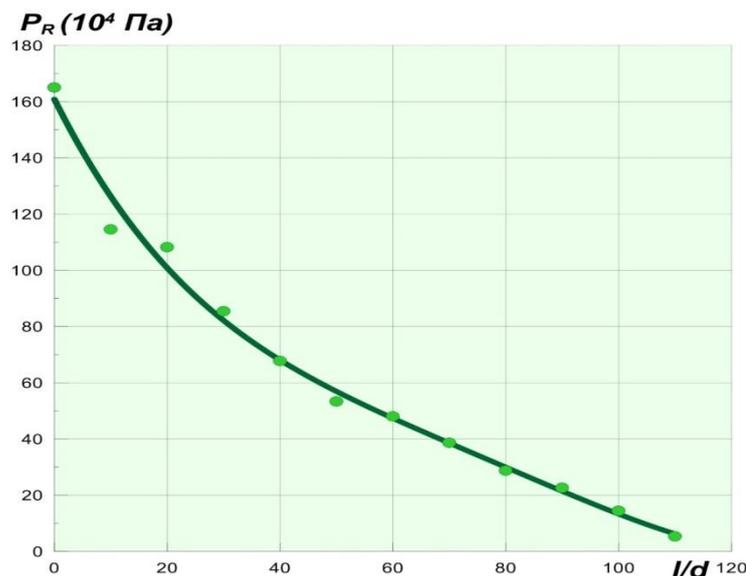
№ сеч.	$\bar{l} = \frac{l}{d}$	$\Pi$	$B$	Полная уд. энер- гия $E$	Кинет. уд. энер- гия $E_{кин}$	$\frac{P_R}{P}$	$P_R$ 10 <sup>4</sup> Па
0	0	0,78	4,6	238,6	124,0	1,44	165,0
1	10	0,74	3,85	183,6	103,6	1,43	114,5
2	20	0,675	2,7	147,6	73,0	1,35	108,2
3	30	0,62	2,15	123,7	58,0	1,30	85,4
4	40	0,57	1,96	105,4	51,2	1,25	67,7
5	50	0,515	1,7	90,9	45,8	1,21	53,3
6	60	0,47	1,32	78,7	37,3	1,18	48,0
7	70	0,43	1,25	68,0	33,7	1,16	38,6
8	80	0,39	1,22	58,4	32,3	1,15	28,7
9	90	0,355	1,20	49,6	31,0	1,10	22,6
10	100	0,32	1,1	41,3	30,0	1,05	14,4
11	110	0,295	1,05	33,6	28,0	1,0	5,35

**Таблица 4**

**Определение давления на стенки по условию радиального равновесия  
 (составлена авторами)**

№ сеч.	$\bar{l} = \frac{l}{d}$	$\Pi$	$A$	$A \frac{V_{CP}^2}{g}$	$\frac{P_R}{\rho g}$
0	0	0,78	3.3	178.0	170.0
1	10	0,74	2.4	129.0	122.0
2	20	0,675	2.1	113.0	106.0
3	30	0,62	1.7	92.0	85.0
4	40	0,57	1.3	70.0	63.0
5	50	0,515	1.0	54.0	49.0
6	60	0,47	0.85	45.8	41.8
7	70	0,43	0.7	37.7	32.7
8	80	0,39	0.48	26.0	26.0
9	90	0,355	0.35	18.9	18.9
10	100	0,32	0.3	16.2	16.2
11	110	0,295	0.25	13.5	13.5

Тем не менее в качестве основного метода рекомендуется принимать метод изменения потока момента количества движения, как наиболее строгий, а поверочные расчеты выполнять с использованием других методов.



**Рис.7.** К определению давления на стенки проточного тракта.  $P_R = f(l / d)$   
 (разработано авторами)

## 6. Обратное течение в отводящем водоводе шахтного вихревого водосброса

В отводящем водоводе шахтного вихревого водосброса при определенных режимах может возникнуть обратное течение в центральной области ограниченной некоторым радиусом.

Это явление объясняется тем, что в продольно-циркуляционном течении потока жидкости при большой начальной закрутке могут одновременно действовать продольные градиенты давления противоположного направления: положительный в центральной области и отрицательный на периферии за границей радиуса.

Для оценки влияния обратного течения на характеристики закрученного потока воспользуемся результатами эксперимента, проведенного в лаборатории гидравлики РУДН [6] и расчетными данными авторов.

Эксперимент проводился в прозрачной трубе диаметром  $d=100\text{мм}$  при числе Рейнольдса  $Re=1,2 \times 10^5$ . Закрутка в начальном сечении составляла  $\Pi_0=0,685$  или  $S_n=0,8$ , а в граничном сечении области обратного течения число закрутки равнялось  $\Pi_{гр}=0,4$  или  $S_n=0,3$ . В эксперименте визуально наблюдалось обратное течение, ограниченное радиусом  $\bar{r}=0,1$  в граничном сечении и расположенным на расстоянии  $l/d=90$ . Осевая компонента скорости меняла в этом створе знак на противоположный, а поток продолжал вращаться в том же направлении.

Существующие методы расчета не учитывают влияния обратного течения на характеристики продольно-циркуляционного течения потока. Между тем необходимо оценить это влияние на такие характеристики как: момент количества движения потока, гидравлическое сопротивление, коэффициент расхода и пропускная способность водосброса, давление на стенки отводящего водовода.

Запишем выражения для потока момент количества движения в граничном сечении в пределах радиуса  $\bar{r}=0,1$ .

$$(MKД)_1 = \rho\pi UV\bar{r}^2 = 0,0015\rho\pi$$

и для полного сечения трубы  $\bar{r}=0,1$

$$(MKД)_1 = \rho\pi UV\bar{r}^2 = 0,45\rho\pi$$

Здесь  $U, V$  – осевая и тангенциальная составляющие скорости (средние значения) определяются по единичным эпюрам скорости [рис. 3.4].

Отношение этих величин равно:

$$\frac{(MKД)_1}{(MKД)} = 0,0033.$$

Видно, что для потока момент количества движения в области обратного течения  $(MKД)_1$  при  $\bar{r}=0,1$  составляет 0,33% от момента  $(MKД)$  для полного сечения при  $\bar{r}=1,0$ . Можно полагать, что не учет столь малой величины практически не влияет на результаты расчета характеристик течения.

Изменение коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  тесно связано с изменением момента количества движения потока  $(MKД)$ . Если приближенно принять также отношение коэффициентов гидравлического сопротивления на участке с обратным течением  $\xi_1$  к соответствующему коэффициенту без обратного течения  $\xi_2$  на той же длине отводящего

участка  $\xi_1/\xi_2=0,33$ , тогда для всего отводящего водовода отношение коэффициентов гидравлического сопротивления будет равно

$$\frac{\xi_1^*}{\xi_2^*} = 1,006 \quad (7)$$

Здесь коэффициенты  $\xi_1^*$  и  $\xi_2^*$  определены расчетным путем. Как видно из приведенного соотношения (7), обратное течение увеличивает коэффициент гидравлического сопротивления на 0,6 %.

Определим отношение коэффициента расхода водосброса  $\mu_1$  с наличием обратного течения (зона рециркуляции) и  $\mu_2$  без обратного течения (без зоны рециркуляции):

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\xi_1}}}{\frac{1}{\sqrt{\xi_2}}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{7,52}}}{\frac{1}{\sqrt{7,65}}} = 1,0083..$$

Таким образом, при наличии обратного течения в виде зоны рециркуляции, образующейся в продольно-циркуляционном течении сразу после завихрителя при большой интенсивности закрутки, коэффициент расхода  $\mu$  и пропускная способность водосброса  $Q$  уменьшаются.

## 7. Натурные данные

Впервые шахтный вихревой водосброс был построен на реке Бхагирати притоке реки Ганг в 2003 г. (Индия). Створ строительства как нельзя лучше подходит к условиям компановки гидроузла, в которых целесообразно использовать схему шахтных вихревых водосбросов. Для обеспечения возможности размещения всего комплекса сооружений, входящих в состав гидроузла, предусмотрено использование строительных тоннелей (4 тоннеля) в эксплуатационный период в качестве отводящих водоводов шахтных вихревых водосбросов. Такое решение существенно снижает затраты и сроки строительства, а также облегчает условия размещения сооружений в створе гидроузла.

Первый опыт эксплуатации вихревого водосброса был получен в 2005-2006 годах. Водосброс проработал 8 месяцев и был отключен. Была произведена инспекция состояния водоводов [7]. В ходе обследования установлено:

- значительных повреждений бетонных поверхностей не обнаружено;
- в ходе эксплуатации наблюдались периодические выбросы водовоздушной смеси, сопровождающиеся хлопками.

По заключению авторов работы [7] первый опыт эксплуатации водосбросов с закруткой потока на ГЭС Тери позволяет положительно оценить новые инженерные решения, заложенные в основу их конструкции и дать оптимистическую оценку перспектив использования аналогичных решений при создании водосбросных сооружений высоконапорных гидроузлов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. Москва: Физматгиз, 1960.
2. Альштуль А.Д., Марголин М.Ш. Обобщенная формула распределения окружных скоростей в вихревых воронках // ИФЖ, 1970 18, 4, 731 – 733.
3. Ахметов В.К. Структура и гидродинамическая устойчивость закрученных потоков с зонами рециркуляции, М., 2009 МГСУ.
4. Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Мордасов А.П. Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях. М., Энергоиздат, 1990
5. Волшаник В.В. Гидравлические характеристики вихревых устройств в гидротехнике, гидроэнергетике и инженерной гидроэкологии. Дис. докт.техн. наук. М., 1997.
6. Животовский Б.А. Водосбросные и сопрягающие сооружения с закруткой потока, М., Изд-во РУДН, 1995.
7. Родионов В.Б., Финк А.К., Карпинская А.Г. Водосбросные сооружения гидроузла Тери В Индии: проектные решения и гидравлические исследования. Гидротехническое строительство. М., 2007, №6.
8. Зуйков А.Л. Гидродинамика циркуляционных течений. М., Изд-во АСВ, 2010.
9. Зуйков А.Л. Динамика вязких циркуляционных течений в трубах и поверхностных воронках. Автореферат дис. ... докт. техн. наук. М., 2010.
10. Животовский Б.А. Гидравлика закрученных потоков и их применение в гидротехнике. Дис. ... докт. техн. наук. М., 1986.
11. Зуйков А.Л., Орехов Г.В., Волшаник В.В. Модель течения Громеки-Бельтрами. «Вестник МГСУ». 2013. №4. с. 150-159.
12. Волшаник В.В., Карелин В.Я., Зуйков А.Л., Орехов Г.В. Инженерная гидравлика закрученных потоков жидкости. «Гидротехническое строительство », 2000, № 11. С. 23-26.

**Рецензент:** Аргал Эдгар Серафимович, заместитель главного инженера, доктор технических наук, ООО «Гидроспецпроект».

**Zhivotovski Boris Anatolyevich**  
Peoples' Friendship University of Russia  
Russia, Moscow  
E-mail: [zbarudn@yandex.ru](mailto:zbarudn@yandex.ru)

**Ponomarev Nikolay Konstantinovich**  
Peoples' Friendship University of Russia  
Russia, Moscow  
E-mail: [rudneng@mail.ru](mailto:rudneng@mail.ru)

## **Improvement of hydraulic calculation of mine vortical spillway**

**Abstract.** The design of a vortex mine spillway is connected with high pressures and speeds of a waste stream. In these conditions there is a danger of washout of the course of the lower byef and cavitation destructions of concrete surfaces of constructions. Under these conditions, there is a risk washout lower pool channel and cavitation damage concrete surfaces structures. To deal effectively with these phenomena should be used flow, which would have properties that help to eliminate these problems. Such flow in the vortex mine spillway is longitudinally circulating flow, which may create artificial means giving axial rotational flow velocity component using the the swirler. In calculating and modeling of vortex systems with longitudinally-circulating flows used criterial ratio: the number of spin Heeger-Baer, option twist on Givotovsky, number Abramovich and others. Proposed dependence of the number Abramovich from the parameter of the spin by Zhivotovsky. Failure to account for the effect of the steam-core can lead to unreliable results of calculation. The analysis shows that the damping of the spin in the flow with air core occurs less intensively than in streams without an air core.

In calculating pressure on the wall of the flow path of a water vortex spillway as the main method is recommended to take a method of changing the flow of angular momentum, as the most severe. The presence of reverse flow in the form of a recirculation zone formed in the longitudinally circulating flow immediately after the swirl at high swirling intensity, reduces the discharge coefficient and the capacity of the spillway. Operating experience vortex spillway at HPP Teri allows positively evaluate new engineering solutions incorporated in a basis of its design and give an optimistic assessment of the prospects for the use of similar solutions in creating high-pressure hydro spillway structures.

**Keywords:** longitudinally-circulating flow; the flow of angular momentum; flow rate; the circumferential component of the flow velocity; the axial component of the flow velocity; full speed; the fluid pressure on the walls of the flow path; the flow coefficient; cavitation; similarity criteria in the simulation area recycling; energy dissipation.

## REFERENCES

1. Abramovich G.N. Teoriya turbulentnykh struy. Moskva: Fizmatgiz, 1960.
2. Al'shtul' A.D., Margolin M.Sh. Obobshchennaya formula raspredeleniya okruzhnykh skorostey v vikhrevykh voronkakh // IFZh, 1970 18, 4, 731 – 733.
3. Akhmetov V.K. Struktura i gidrodinamicheskaya ustoychivost' zakruchennykh potokov s zonami retsirkulyatsii, M., 2009 MGSU.
4. Volshanik V.V., Zuykov A.L., Mordasov A.P. Zakruchennyye potoki v gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh. M., Energoizdat, 1990
5. Volshanik V.V. Gidravlicheskie kharakteristiki vikhrevykh ustroystv v gidrotekhnike, gidroenergetike i inzhenernoy gidroekologii. Dis. dokt.tekhn. nauk. M., 1997.
6. Zhivotovskiy B.A. Vodosbrosnye i sopryagayushchie sooruzheniya s zakrutkoy potoka, M., Izd-vo RUDN, 1995.
7. Rodionov V.B., Fink A.K., Karpinskaya A.G. Vodosbrosnye sooruzheniya gidrouzla Teri V Indii: proektnye resheniya i gidravlicheskie issledovaniya. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. M., 2007, №6.
8. Zuykov A.L. Gidrodinamika tsirkulyatsionnykh techeniy. M., Izd-vo ASV, 2010.
9. Zuykov A.L. Dinamika vyazkikh tsirkulyatsionnykh techeniy v trubakh i poverkhnostnykh voronkakh. Avtoreferat dis. ... dokt. tekhn. nauk. M., 2010.
10. Zhivotovskiy B.A. Gidravlika zakruchennykh potokov i ikh primeneniye v gidrotekhnike. Dis. ... dokt. tekhn. nauk. M., 1986.
11. Zuykov A.L., Orekhov G.V., Volshanik V.V. Model' techeniya Gromeki-Bel'trami. «Vestnik MGSU». 2013. №4. s. 150-159.
12. Volshanik V.V., Karelin V.Ya., Zuykov A.L., Orekhov G.V. Inzhenernaya gidravlika zakruchennykh potokov zhidkosti. "Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo", 2000, № 11. S. 23-26.