

## МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ

УДК 626-31

DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-2-142-153

### СОПРЯЖЕНИЕ ВИХРЕВОГО ВОДОСБРОСА С НИЖНИМ БЬЕФОМ ПУТЕМ ОТБРОСА СТРУИ

Н.К. ПОНОМАРЕВ, Л.Е. ЩЕСНЯК

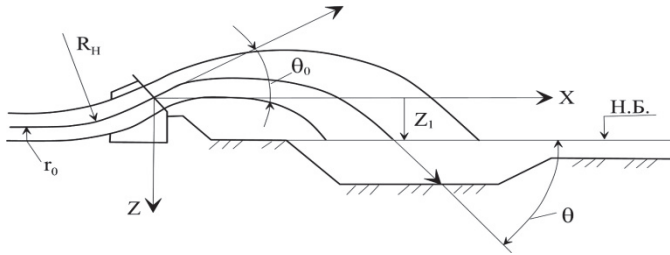
Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198*(поступила в редакцию: 01 декабря 2017 г.; принята к публикации: 05 марта 2018 г.)*

В современной практике гидротехнического строительства напоры гидроузлов достигают  $H \geq 200$  м. В этих условиях наиболее эффективным водосбросным сооружением является вихревой шахтный водосброс. В данной статье авторы рассматривают сопряжение закрученного потока на выходе из отводящего водовода с нижним бьефом путем отброса струи с остаточной закруткой. В схеме с отбросом струи остаточная закрутка потока при выпуске из вихревого водосброса способствует расширению струи в воздухе, уменьшению удельного расхода, а также уменьшает динамические нагрузки на нижний бьеф. Проведено сравнение со струей, отброшенной с носка водосливной плотины, при одинаковых скоростных параметрах (т.е. при скорости на носке 20–25 м/с). Получена формула, достаточно просто определяющая плановое очертание отброшенной струи. Предложена схема сопряжения струи с поверхностью нижнего бьефа, а также расчетная схема к определению удельных расходов ниспадающей закрученной струи. Отброс закрученной струи от сооружения позволяет избежать недостатков, возникающих при схеме с длинным отводящим водоводом, связанных с высокой динамической нагрузкой при распаде течения в пределах проточного тракта, и погасить механическую энергию потока путем его аэрации и распыления в атмосфере, а также в месте падения в воронке размыва на дне нижнего бьефа.

**Ключевые слова:** вихревой шахтный водосброс, параметр закрутки, остаточная закрутка, нижний бьеф, число Фруда, водовоздушная смесь, тангенциальная скорость, отброс струи

**Введение.** 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. Как следствие осложняются технические проблемы сопряжения с нижним бьефом, решение которых требует новых подходов. К числу основных проблем относятся: защита русла реки и береговых склонов от обрушения и защита обтекаемой бетонной поверхности от кавитации [1–3]. Необходимо оценивать условия сопряжения вихревого шахтного водосброса с нижним бьефом с учетом особенностей выпускаемого из сооружения потока, как то: наличия остаточной закрутки, больших удельных расходов ( $q = 200\text{--}250$  м<sup>3</sup>/с), сравнительно умеренной для высоконапорных сооружений средней продольной скорости на выходе из отводящего водовода ( $V_{cp} = 20\text{--}25$  м/с) после гашения избыточной энергии потока внутри сооружения.

В этой статье авторы рассматривают сопряжение потока путем отброса струи с носка отводящего водовода (рис. 1).



**Рис. 1. Схема отброса струи**  
[Fig. 1. Jet drop scheme]

В схеме с отбросом струи остаточная закрутка потока при выпуске из водосбора играет положительную роль, способствуя расширению струи после выхода из вихревого водосбора и уменьшению удельных расходов, а также воздействует на нижний бьеф после расширения струи в воздухе, что уменьшает динамические нагрузки. В последнем случае с нижним бьефом взаимодействует водовоздушная смесь (с малым удельным весом и плотностью) по расширенной площади, которая до 20–25 раз (при  $\Pi = 0,35$ ) может превосходить первоначальную площадь живого сечения струи. Столь интенсивное расширение связано с вынужденным движением частиц по касательному направлению к окружности, на которой они вращались до выхода из отводящего водовода. Такое движение обусловлено тем, что после выхода из отводящего водовода оно продолжается в воздушной среде с существенно меньшей плотностью  $\rho$  и динамической вязкостью  $\mu$ .

Заметим, что методы расчета рассматриваемых струй отсутствуют. Здесь правомерно также использовать инженерный метод расчета применительно к вихревым водосборам, который приводится ниже.

**Сопряжение вихревого водосбора с нижним бьефом путем отброса струи.** Рассмотрим модель струи. Положим, что расширяющееся пространство струи заполняется водовоздушной смесью с плотностью, уменьшающейся вдоль продольной оси. В струю проникает воздух через ее боковые границы, который смешивается с частицами жидкости, образуя двухфазную среду – водовоздушную смесь.

Вследствие трения о воздух скорость частиц жидкости уменьшается. Влияние трения можно учесть с помощью поправочного коэффициента  $K$  в соответствующих формулах. К ним относятся формулы, содержащие продольную скорость, которая в 3–5 раз превосходит скорость в касательном направлении [10].

Свойства жидкости в струе существенно отличаются от свойств воды в отводящем канале. Будем полагать, что процесс расширения струи после выхода из вихревого водосбора и насыщения ее воздухом определяется в основном остаточной закруткой  $\Pi$ , а дополнительный эффект от влияния на этот процесс распада осевой струи при отсутствии закрутки идет в запас прочности (его в первом приближении можно не учитывать).

Погрешность принятия такой предпосылки можно оценить по увеличению площади поперечного сечения в конце струи при наличии закрутки и без нее.

Можно предположить, что влияние от распада осевой струи без закрутки на рассматриваемые процессы незначительно.

Проведем сравнение со струей, отброшенной с носка водосливной плотины. Для такой струи [2] рекомендуется принимать  $K = 1,0$  при числах Фруда  $Fr < 35$  и  $K = 0,8–0,9$  – при числах Фруда  $Fr > 35$ . В нашем случае числа Фруда незначительны и изменяются в пределах  $Fr = 5–10$ . Однако учитывая, что струя с остаточной закруткой расширяется более интенсивно (и следовательно трение о воздух увеличивается), можно, несмотря на небольшие числа Фруда, принять значения  $K = 0,9–0,95$ .

При отбросе струи с носка водосливной плотины без закрутки потока (т.е. при скорости на носке  $V = 20–25$  м/с) она расширяется менее интенсивно, что существенно меньше, чем для струи с остаточной закруткой.

Сформулируем требования к выходному участку отводящего водовода вихревого водосброса – начальному участку струи, которые можно свести к следующему:

1) отметка дна выходного сечения приподнятого носка должна быть не менее отметки потолка горизонтального конечного участка отводящего водовода (рис. 1) – для исключения смены режимов работы (напорного – безнапорного) при регулировании сбросных расходов и для облегчения условий выпуска воздуха. Эти режимы подлежат специальному рассмотрению;

2) угол наклона оси водовода в конце носка к горизонту должен составлять  $\theta_0 = 30^\circ–35^\circ$  – для обеспечения максимального отброса струи;

3) радиус закругления оси водовода на носке должен находиться в пределах  $R_H / r_0 \geq 3,0–4,0$  ( $r_0$  – радиус отводящего водовода) – для обеспечения угла наклона струи к горизонту, равного углу наклона оси водовода  $\theta_0$  [2];

4) остаточная закрутка на выходе из отводящего водовода должна составлять  $\Pi = 0,1–0,35$  ( $\Pi$  – параметр закрутки [1], характеризующий остаточную закрутку) и находится из расчета вихревого водосброса.

Отдельные параметры струи определяются по аналогии со струей, отбрасываемой с носка водосливной плотины [2]. В частности, для осевой струйки, имеющей только осевую скорость, и наименьшей тангенциальной скорости ( $V_u = 0$ ) в первом приближении можно использовать апробированные существующие зависимости, по которым находят дальность отброса струи  $L$  и угол входа центральной струйки  $\theta$  на отметке нижнего бьефа (рис. 1).

$$L = K * \frac{V_m^2 * \sin 2\theta_0}{2 * g} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{Z_1 * 2 * g}{V_m^2 * \sin^2 \theta_0}} \right), \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние трения о воздух  $K = (0,9–0,95)$ ;  $Z_1$  – превышение центра выходного сечения водовода над расчетным уровнем нижнего бьефа;  $\theta_0$  – угол между горизонтальной плоскостью и осью водовода на выходе из отводящего водовода вихревого водосброса.

$$\operatorname{tg} \theta = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \theta_0 + \frac{Z_1 * 2 * g}{(V_m * \cos \theta_0)^2}}. \quad (2)$$

Выясним условия расширения струи, для чего выберем произвольное сечение. Будем полагать, что в этом сечении продольная скорость  $V_0 = \text{const}$  равна средней продольной скорости  $V_{cp} = 4Q/\pi d^2$  и постоянна по сечению, а окружная скорость  $V_u$  подчиняется закону вращения твердого тела или параболическому закону в зависимости от остаточной закрутки  $\Pi$  в конце водовода. Экспе-

риментально установлено, что при  $\Pi < 0,2$  окружная скорость изменяется по закону вращения твердого тела, а при  $0,25 < \Pi < 0,35$  – по параболическому закону [2; 4]. Таким образом, граничные условия в начальном сечении струи будем рассматривать для двух случаев.

Случай I при  $\Pi < 0,2$ :

$$\begin{aligned} V_0 &= const, \\ V_u &= \bar{r}^n \cdot V_{u0}. \end{aligned} \tag{3}$$

Случай II при  $0,25 < \Pi < 0,35$ :

$$\begin{aligned} V_0 &= const, \\ V_u &= V_0 \cdot \Pi \cdot \bar{r}^{-n}, \end{aligned} \tag{3a}$$

где  $\bar{r} = r/r_0$  – безразмерный радиус;  $V_{u0}$  – окружная скорость на границе потока в выходном сечении водовода (определяется по остаточной закрутке на выходе из отводящего водовода).

Экспериментально установлено, что значение  $n$  в формулах (3), (3a) равно:

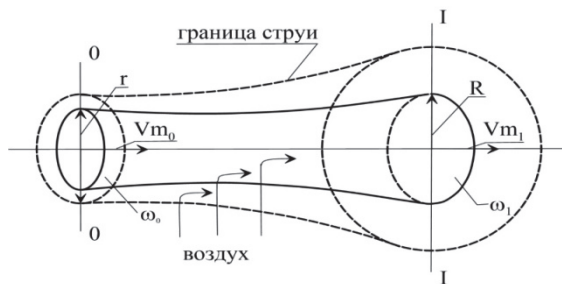
$n = 1$  при  $\Pi < 0,2$ ,

$n = 0,6$  при  $\Pi < 0,25$ ,

$n = 0,4$  при  $\Pi < 0,3$ .

Заметим, что принятые предпосылки (3), (3a) близки к фактической картины распределения скорости.

За время  $t$  через начальное сечение струи  $\omega_0$  (рис. 2) и произвольное сечение струи  $\omega$  проходит одинаковая масса воды.



**Рис. 2. Расчетная схема**  
**[Fig. 2. Design diagram]**

Будем полагать, что плотность водовоздушной смеси в данном сечении струи есть величина постоянная, что близко к реальности.

$$\begin{aligned} \int_0^{r_0} \rho_0 2\pi r dr Vm_0 &= \int_0^R \rho 2\pi r dr Vm_1. \\ \frac{\rho}{\rho_0} &= \frac{\int_0^{r_0} r dr}{\int_0^R r dr} = \frac{r_0^2}{R^2} = \frac{\bar{r}_0^2}{R^2}. \end{aligned} \tag{4}$$

Граничными условиями для боковых границ струи являются  $\bar{r}_0 = 1$ ,  $R_{zp} = R$ . Здесь  $\rho_0$  и  $\rho$  – плотность водовоздушной смеси в начальном и произвольном сечении струи ( $\rho_0 = \text{const}$ );  $V_x$  – горизонтальная проекция продольной скорости частиц воды (без учета трения о воздух)  $V_x = V_0 \cos \theta_0$ .

Радиусы  $r$  и  $R$  связаны соотношением

$$R = \frac{r}{\cos \alpha} = r \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha}, \quad (4a)$$

где  $\text{tg} \alpha$  (угол скоса  $\alpha$ ) можно определить из треугольника, одним катетом которого является расстояние, пройденное частицей воды за время  $t$  по перпендикулярному направлению касательной после выхода из водовода, а другим катетом – радиус  $r$  (рис. 2).

$$\text{tg} \alpha = \frac{V_u t}{r} = \frac{V_0 \Pi t r^{-n}}{r_0 r} \quad t = \frac{V_0 \Pi}{r_0} r^{-(n-1)} t. \quad (4б)$$

Здесь для  $V_u$  тангенциальной скорости принято распределение

$$V_u = V_0 \cdot \Pi \cdot \bar{r}^{-n} \quad (n \leq 1,0), \quad (4в)$$

которое дает хорошее совпадение с экспериментом.

Подставляя (4в) в (4б) получим

$$\frac{R}{r} = \frac{\bar{R}}{r} = \left[ 1 + (k_1 t)^2 r^{-2(n-1)} \right]^{0,5}, \quad (4г)$$

где  $\bar{R} = \frac{R}{r_0}$ ;  $k_1 = \frac{V_0 \Pi}{r_0}$ .

Время  $t$  определяется из формулы

$$t = x V_0 \cos \theta_0 \sqrt{kt}, \quad (4д)$$

где  $x$  – горизонтальное расстояние до рассматриваемого поперечного сечения от начала струи (считая по центральной струйке).

При  $\bar{r} = 1$  и  $\bar{R} = \bar{R}_{zp}$ . (граничный радиус)

$$\left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)_{zp} = \frac{1}{\bar{R}^2}. \quad (4е)$$

Здесь относительная плотность водовоздушной смеси  $\left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)_{zp}$  понимается

как плотность на границе струи.

Выясним, как распределяется плотность смеси в сечении струи. С этой целью используем (4г) и (4е), получим:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left( \frac{\bar{r}}{\bar{R}} \right)^2 = \frac{1}{\left[ 1 + (k_1 t)^2 r^{-2(n-1)} \right]}. \quad (5)$$

С учетом (5) и (4г) получим выражение для отношения удельного веса водовоздушной смеси  $\gamma_{см}$  к удельному весу воды  $\gamma_в$ .

$$\frac{\gamma_{см}}{\gamma_в} = \frac{1}{1 + \left( \frac{V_{u0}t}{r_0} \right)^2}, \quad (6)$$

где

$$t = \frac{l}{\sqrt{K} \cdot V_m \cos \theta_0}; \quad (6a)$$

$l$  – расстояние от носка до центра произвольного сечения струи по горизонтали.

Из (6) и (6a) видно, что удельный вес водовоздушной смеси в сечении струи постоянен и изменяется при переходе от сечения к сечению по длине струи. Можно, однако, предположить, что содержание воды в водовоздушной

смеси, т.е. величина  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_в}$  в центральной области поперечного сечения струи,

будет несколько больше, т.к. при расширении струи в центральную область из периферийной вместе с воздухом поступает и водовоздушная смесь, увеличивая содержание воды в смеси. С помощью формул (6) и (6a) можно установить ха-

рактер изменения  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_в}$  вдоль струи. Расчет изменения величины  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_в}$  для ха-

рактерных параметров струи выполнен в табл. 1. Из формул (4) и (4б) имеем  $R = r\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}$ . Приведем эту формулу к виду, удобному для расчета. Граничный радиус в конечном сечении струи:

$$R_{к(зр)} = r_0 \sqrt{1 + \left( \frac{V_{u0}t}{r_0} \right)^2}. \quad (7)$$

Полученная формула позволяет достаточно просто рассчитать плановое очертание отброшенной струи  $X = V_m \sqrt{K} \cos \theta_0 t = Lt$ .

Параметры струи влияют на удельные расходы. С определенной предосторожностью будем полагать, что струя воздействует на нижний бьеф по расчетной площади, которая равна площади круга концевое сечения струи с радиусом  $R_k$ , вычисленной по параметрам центральной струйки (рис. 2). Погрешность такого предположения по сравнению с площадью следа струи на свободной поверхности нижнего бьефа составляет около 5% и идет в запас при расчетах.

Выясним, как распределяются удельные расходы. С этой целью в расчетном концевом сечении струи выделим вертикальную элементарную площадку (рис. 4), положение которой характеризуется расстоянием  $R$  от оси. Площадь площадки равна  $\Delta\omega = b\Delta R$ . Принимая ширину площадки равной единице длины  $\Delta R = 1$  и подставляя выражение  $b = 2\sqrt{R_k^2 - R^2}$ , имеем:

$$\Delta\omega = 2\sqrt{R_k^2 - R^2}. \quad (8)$$

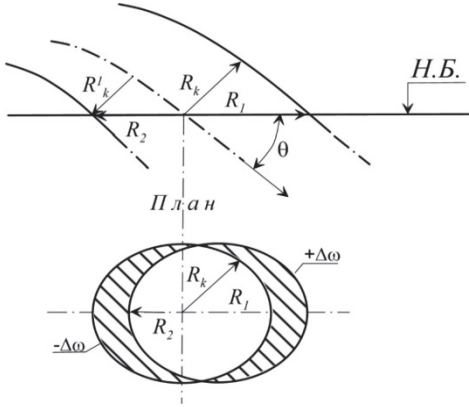
Расход, собираемый с этой площадки от ниспадающей струи будет представлять собой удельный расход  $q$  на данном радиусе. С учетом полученного

выше равенства  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_е} = \text{const}$  в данном поперечном сечении и удельного расхода воды,

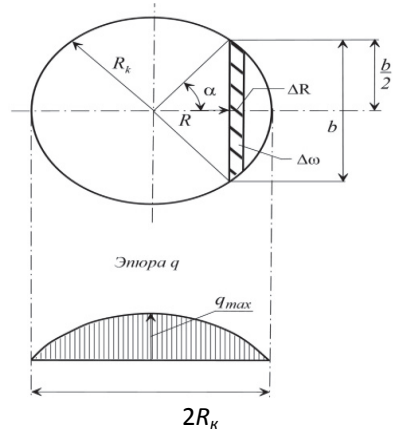
собираемого с единицы площади концевое сечения  $q_\omega = \frac{Q}{\pi R_K^2}$ , можно записать:

$$q = \Sigma \Delta \omega \cdot q_\omega = \frac{2Q}{\pi R_K} \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R_K}\right)^2}. \quad (9)$$

Из формулы видно, что удельный расход  $q$  в отводящем русле имеет максимальное значение на оси струи и равен нулю при  $R = R_K$  на ее границе. Максимальные значения удельного расхода для вихревых водосбросов могут изменяться в пределах  $q_{\max} = 50\text{--}70$  м/с, что является приемлемым. Эпюра  $q$  (рис. 4) имеет параболическую форму, что позволяет устраивать яму размыва с переменной глубиной  $h_я$  по длине и ширине отводящего русла. Расчет глубины ямы размыва производится по полученной эпюре  $q$  на основе известных расчетных методов.



**Рис. 3. Схема сопряжения струи с поверхностью нижнего бьефа**  
[Fig. 3. The scheme of interaction of the jet with the surface of the downstream]



**Рис. 4. Расчетная схема к определению удельных расходов**  
[Fig. 4. The calculated scheme to definition of specific rate of flow]

Найдем для нашего случая дальность отлета струи:

$$L = K * \frac{V_m^2 * \sin 2\theta_0}{2 * g} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{Z_1 * 2 * g}{V_m^2 * \sin^2 \theta_0}} \right) = 31,72 \text{ м},$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние трения о воздух  $K = (0,9\text{--}0,95)$ ;  $Z_1$  – превышение центра выходного сечения водовода над расчетным уровнем нижнего бьефа;  $Z_1 = 4,5$  м;  $\theta_0$  – угол между горизонтальной плоскостью и осью водовода на выходе из отводящего водовода вихревого водосброса ( $\theta_0 = 30^\circ$ ).

Найдем тангенс угла входа центральной струйки:

$$\text{tg } \theta = \sqrt{\text{tg}^2 \theta_0 + \frac{Z_1 * 2 * g}{(V_m * \cos \theta_0)^2}} = 0,83,$$

$$V_0 = 18,08 \text{ м/с},$$

$$\Pi = 0,265,$$

следовательно в нашем случае используем формулу (3а) для случая II (при  $0,25 < II < 0,35$ ):

$$V_0 = const,$$

$$V_u = V_0 \cdot II \cdot r^{-n},$$

$$n = 0,6 \text{ при } II < 0,25,$$

$$n = 0,4 \text{ при } II < 0,3.$$

Принимаем  $n = 0,5$  при  $II = 0,265$ :

$$V_u = V_0 \cdot II \cdot r^{-n} = 18,08 \cdot 0,265 \cdot 1^{0,5} = 4,79 \text{ м/с.}$$

Рассчитаем изменение величины  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_г}$  вдоль струи.

Таблица 1

Определение зависимости  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_г} = f\left(\frac{l}{L}; II\right)$

[Numerical Determination of Dependence  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_г} = f\left(\frac{l}{L}; II\right)$ ]

$l, \text{ м}$	$l/L$	$t, \text{ с}$	$\frac{\gamma_{см}}{\gamma_г}$
6,34	0,2	0,43	0,81
12,69	0,4	0,85	0,55
19,03	0,6	1,28	0,35
25,38	0,8	1,71	0,23
31,72	1,0	2,13	0,162

Содержание воды в водовоздушной смеси составляет 16,2%.

Из формул (3) и (3б) имеем граничный радиус в конечном сечении струи:

$$R_k = 4,5 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4,79}{4,5} \cdot 2,13\right)^2} = 11,82 \text{ м,}$$

$$\Delta\omega = 2\sqrt{R_k^2 - R^2} = 2\sqrt{11,82^2 - 4,5^2} = 21,86 \text{ м}^3.$$

Удельный расход в отводящем русле:

$$q = \Sigma\Delta\omega \cdot q_\omega = \frac{2Q}{\pi R_k} \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R_k}\right)^2} = \frac{2 \cdot 1150}{3,14 \cdot 11,82} \sqrt{1 - \left(\frac{4,5}{11,82}\right)^2} = 57,30 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Отношение площадей конечного и начального сечения струи:

$$\frac{\omega_k}{\omega_0} = \left(\frac{R_k}{r_0}\right)^2 = \left(\frac{11,82}{4,5}\right)^2 = 6,9 \text{ или отношение радиусов } \frac{R_k}{r_0} = \frac{11,82}{4,5} = 2,627,$$

$$\omega_k = 438,70.$$



Выясним, как изменяется конечный радиус струи  $R_K$  при следующих, характерных для вихревого водосброса, параметрах (табл. 2, рис. 5):  $\Pi = 0,3$ ;  $V_{cp} = 23$  м/с;  $Vu = 7,23$  м/с;  $d = 9$  м.

Таблица 2

$L$	$L/d$	$z_1, \text{ м}$	$t$	$\frac{\gamma_{cm}}{\gamma_e}$	$\omega_K$	$R_K$
27	3	9	1,43	0,16	399,73	11,28
36	4	118	1,91	0,096	662,34	14,52
45	5	27	2,38	0,064	994,26	17,79

$$\frac{\omega_K}{\omega_0} = \left(\frac{R_K}{r_0}\right)^2 = \left(\frac{11,28}{4,5}\right)^2 = 6,283 \text{ или отношение радиусов } \frac{R_K}{r_0} = \frac{11,28}{4,5} = 2,507,$$

$$\frac{\omega_K}{\omega_0} = \left(\frac{R_K}{r_0}\right)^2 = \left(\frac{14,52}{4,5}\right)^2 = 10,41 \text{ или отношение радиусов } \frac{R_K}{r_0} = \frac{14,52}{4,5} = 3,227,$$

$$\frac{\omega_K}{\omega_0} = \left(\frac{R_K}{r_0}\right)^2 = \left(\frac{17,79}{4,5}\right)^2 = 15,63 \text{ или отношение радиусов } \frac{R_K}{r_0} = \frac{27,06}{4,5} = 3,95$$

при  $\Pi = 0,2$ ;  $V_{cp} = 23$  м/с;  $Vu = 4,69$  м/с опыт показывает, что  $d = 8\text{--}10$  м оптимален для таких водосбросов.

Принимаем  $d = 9$  м.

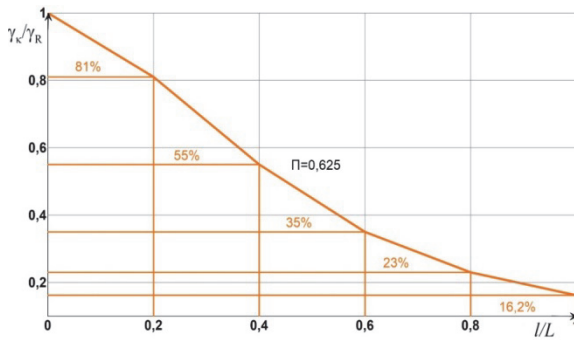


Рис. 5. Зависимость  $\frac{\gamma_{cm}}{\gamma_e} = f\left(\frac{l}{L}; \Pi\right)$

[Fig. 5. Relationship  $\frac{\gamma_{cm}}{\gamma_e} = f\left(\frac{l}{L}; \Pi\right)$ ]

Таблица 3

$L$	$L/d$	$z_1, \text{ м}$	$t$	$\frac{\gamma_{cm}}{\gamma_e}$	$\omega_K$	$R_K$
27	3	9	1,43	0,31	204,90	8,076
36	4	18	1,91	0,20	315,42	10,02
45	5	27	2,38	0,14	454,65	12,03

$$\frac{\omega_{\kappa}}{\omega_0} = \left( \frac{R_{\kappa}}{r_0} \right)^2 = \left( \frac{8,076}{4,5} \right)^2 = 3,22 \text{ или отношение радиусов } \frac{R_{\kappa}}{r_0} = \frac{9,71}{4,5} = 1,795,$$

$$\frac{\omega_{\kappa}}{\omega_0} = \left( \frac{R_{\kappa}}{r_0} \right)^2 = \left( \frac{10,02}{4,5} \right)^2 = 4,958 \text{ или отношение радиусов } \frac{R_{\kappa}}{r_0} = \frac{18,65}{4,5} = 2,227,$$

$$\frac{\omega_{\kappa}}{\omega_0} = \left( \frac{R_{\kappa}}{r_0} \right)^2 = \left( \frac{12,03}{4,5} \right)^2 = 7,147 \text{ или отношение радиусов } \frac{R_{\kappa}}{r_0} = \frac{27,68}{4,5} = 2,67.$$

**Выводы.** Обзор существующих исследований показывает, что методы расчета струи с остаточной закруткой и ее сопряжения с нижним бьефом отсутствуют.

Разработан и предложен метод расчета рассматриваемых струй, основанный на теоретическом рассмотрении. Для проверки полученных результатов требуется постановка специального эксперимента.

Преимущество выпуска струи в воздухе с остаточной закруткой заключается в том, что струя сначала расширяется в воздухе, превращаясь в водовоздушную смесь, плотность которой уменьшается по длине струи, и в результате струя взаимодействует с нижним бьефом на большей площади (за счет ее расширения и меньшей плотности водовоздушной смеси), что уменьшает динамическое воздействие на нижний бьеф.

© Пономарев Н.К., Щесняк Л.Е., 2018

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Животовский Б.А. Водосбросные и сопрягающие сооружения с закруткой потока. М.: Изд-во РУДН, 1995.
2. Слисский С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: Энергия, 1979.
3. Волианник В.В., Зуйков А.Л., Мордасов А.П. Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях. М.: Энергоиздат, 1990.
4. Щукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М.: Машиностроение, 1982.
5. A. H. Algifri, R. K. Bhardwaj, Y. V. N. Rao (December 1988). Eddy viscosity in decaying swirl flow in a pipe. *Journal Applied Scientific Research*, Springer Netherlands, Vol. 45, No 4.
6. Osami Kitoh. (1991). Experimental study of turbulent swirling flow in a straight pipe. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, Vol 225.
7. Senoo Yasutoshi, Nagata Tetuzou. (1990). Vortex flow in long pipes with different roughness. *Bulletin of JSME (The Japan Society of Mechanical Engineers)* [Journal Detail], 15 (90), 1514–1521.
8. Лунаци М.Э., Новикова И.С. К вопросу об определении гидравлических характеристик водосбросных сооружений с закруткой потока // Гидротехническое строительство. НТА «Энергопрогресс», 1995. № 9.
9. Руководство по расчету высоконапорных вихревых водосбросов. М.: Союзгипроводхоз, 1984.
10. Кривченко А.С., Остроумов С.Н. Водосбросное устройство для напорных вододерживающих сооружений // Бюллетень изобретений (БИ). 1970. № 17.
11. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1987.

**Об авторах:**

**Пonomарев Николай Константинович** – кандидат технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Научные интересы:* гидравлика сооружений, речная гидравлика, проблемы использования водных ресурсов. *Контактная информация:* e-mail – ponomarev\_nk@rudn.university

**Щесняк Леонид Евгеньевич** – аспирант департамента архитектуры и строительства инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Научные интересы:* гидравлика сооружений, речная гидравлика. *Контактная информация:* e-mail – schesnyak\_le@rudn.university

**Для цитирования:**

Пonomарев Н.К., Щесняк Л.Е. Сопряжение вихревого водосброса с нижним бьефом путем отброса струи // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 2. С. 142–153. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-2-142-153.

## THE PAIRING OF A SWIRLING SPILLWAY TO THE LOWER POOL THROUGH THE THROWN JETS

N.K. PONOMAREV, L.E. SCHESNYAK

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

(received: December 01, 2017; accepted: March 05, 2018)

In the modern practice of hydraulic engineering pressure hydrosystems reach  $H \geq 200$  m. In these conditions the most efficient spillway structure is the vortex shaft spillway. In this paper, the authors consider the conjugation of the swirled flow at the outlet of the discharge conduit with downstream by thrown jet with a residual twist. In the scheme with jet drop, the residual twist of the flow during the release from the vortex spillway contributes to the expansion of the jet in the air, reducing the specific flow rate, as well as reducing the dynamic loads on the lower bed. The comparison with the jet thrown from the sock of the drainage dam at the same speed parameters (i.e. at the speed of 20–25 m/s on the lip) is carried out. The formula obtained is simple enough to determine the planned outline of the discarded jet. The scheme of conjugation of the jet with the surface of the lower tail water, as well as the calculation scheme to determine the specific discharge of the downward swirling jet.

**Keywords:** vortex shaft spillway, setting twist, the residual twist, the downstream, the Froude number, water-air mixture, tangential velocity, thrown jets

### References

1. Zhivotovsky B.A. Spillway and the interfacing facilities with the spin-current. M.: PFUR Publ., 1995.
2. Slaski S.M. Hydraulic analysis of high pressure hydraulic engineering structures. Moscow: Energy, 1979.
3. Volshanik V.V., Zuykov A.L., Mordasov A.P. Swirling flows in hydraulic structures. Moscow: Energoizdat, 1990.
4. Shchukin V.K., Khalatov A.A. Heat exchange, mass transfer and hydrodynamics of swirling-tion flows in axisymmetric channels. M.: Mechanical Engineering, 1982.
5. A. H. Algifri, R. K. Bhardwaj, Y. V. N. Rao. (December 1988). Eddy viscosity in decaying swirl flow in a pipe. *Journal Applied Scientific Research*, Springer Netherlands, Vol 45, No 4.
6. Osami Kitoh. (1991). Experimental study of turbulent swirling flow in a straight pipe. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, Vol 225.

7. Yasutoshi Senoo, Nagata Tetuzou. (1990). Vortex flow in long pipes with different roughness. *Bulletin of JSME (the Japan Society of Mechanical Engineers)* [Journal Detail], 15 (90), p. 1514–1521.

8. Lunati, M.E., Novikov I.S. (1995). To the question about the determination of hydraulic characteristics of spillway structures with the swirling flow. NTA Energoprogress, *Journal of Hydraulic Engineering*, No 9.

9. Guidelines for the calculation of high-pressure vortex spillways. M.: Soushi-provokes, 1984.

10. Krivchenko A.C., Ostroumov S.N. A water discharge device for pressure water-retaining structures // *Byulleten' izobretenii (BI)* [Bulletin of inventions (BI)], 1970, No. 17.

11. Hydraulic calculations of spillway hydraulic structures. A special allowance. Moscow: Energoatomizdat, 1987.

**About the authors:**

**Nikolaj K. Ponomarev** – Candidate of Technical Science, Professor of Department of Architecture and Civil Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Scientific interests:* hydraulics of structures, river hydraulics, problems of water resources. *Contact information:* e-mail – ponomarev\_nk@rudn.university

**Leonid E. Schesnyak** – PhD Student of Department of Architecture and Civil Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Scientific interests:* hydraulics of structures, river hydraulics. *Contact information:* e-mail – schesnyak\_le@rudn.university

**For citation:**

Ponomarev N.K., Schesnyak L.E. (2018). The pairing of a swirling spillway to the lower pool through the thrown garbage. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14 (2), 142–153. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-2-142-153.