



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-59-66

УДК 626-31

К ВОПРОСУ О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДОЛЬНО-ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Н.К. Пономарев, Л.Е. Щесняк

Российский университет дружбы народов
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

В последнее время в практике гидротехнического строительства применяются водосбросы с продольно-циркуляционным течением. Отмеченные свойства продольно-циркуляционных течений служат уникальным примером совместимости типа течения с технологическим назначением водосбросного сооружения. Гидравлические характеристики течения (пропускная способность, распределение скорости, распределение давления, прогноз кавитации и др.) определяются на основе использования методов расчета, разработанных в упомянутых исследованиях, а именно: для продольно-осевого течения используются известные стандартные методы расчета; продольно-циркуляционного течения, взаимодействующие с твердыми границами водосброса; продольно-циркуляционного течения, в виде закрученной струи в водной среде или в воздухе; течение, возникающее при взаимодействии однонаправленных продольно-циркуляционных потоков; течение, возникающее в результате взаимодействия противоположно закрученных коаксиальных потоков. В данной работе авторы рассматривают продольно-циркуляционное течение вязкой несжимаемой жидкости в закрытом канале и в струе с использованием вурфа скоростей, связывающего между собой три компоненты скорости U , V и W . Вурф позволяет не только проследить принадлежность некоторого параметра тому или иному процессу, характер его изменения, но и определить «полноту» ряда показателей, относящихся к нему.

Ключевые слова: шахтные вихревые водосбросы, продольно-циркуляционное течение, вурф скоростей, тангенциальная скорость, параметр закрутки

Введение

Применение закрученных потоков в задачах гидротехнического строительства — перспективное направление. В современных компоновках высоконапорных гидроузлов широко внедряются и эксплуатируются водосбросы с закрученными потоками (вихревые водосбросы). Тем не менее, многие аспекты динамики вихревых структур все еще остаются не до конца изученными. В этой ситуации особо важную роль играет физический эксперимент и методы численного моделирования. В данной статье авторы рассматривают вихревое течение вязкой несжимаемой жидкости в закрытом канале и в струе с использованием вурфа скоростей, связывающего между собой три компоненты скорости U , V и W .

При рассмотрении течения данного типа применительно к схеме шахтных вихревых водосбросов, т.е. продольно-циркуляционные течения в закрытом канале, переходящее на выходе в безграничное пространство, затопленное той же

жидкостью, можно предположить, что параметры течения связаны между собой определенными функциональными соотношениями.

Для характеристики интенсивности закрутки выберем нормированные параметры:

— для закрытого канала — по радиусу выходного сечения R и средней продольной скорости на выходе V_0 ;

— для струи — по половине радиуса $R/2$ той же скорости в начальном сечении струи;

Примем гипотезу о том, что все изменения в течении, связанные с изменением граничных условий в начальном сечении, происходят на короткой длине $l/d \leq 1,0-2,0$.

Используя результаты исследований полученных в работах [1–4] будем рассматривать продольно-циркуляционное течение вязкой несжимаемой жидкости в закрытом канале и в струе с использованием вурфа скоростей, связывающего между собой три компоненты скорости U , V и W

$$W = - \frac{V(V+U)}{\left[V + \frac{1}{(1-D)}U \right]} \quad (1)$$

Вурф скоростей (1) также как дифференциальные уравнения движения содержит константу D , которую можно определить используя опытные данные, например единичные профили тангенциальной скорости, приведенные в работе [2], а также по зависимости $\Pi = f(D)$ (рис. 1). Расчеты по определению этих величин для различных значений закрутки сведены в таблицу (табл. 1). Далее представлены расчеты для других условий и закруток (табл. 2). Сравнение полученного распределения тангенциальной скорости (по уравнениям вурфа скоростей) с базовыми данными, т.е. с единичными профилями скорости [2] (рис. 2) показывает их удовлетворительное согласование.

Таблица 1

Распределение тангенциальной скорости при закрутках ($\Pi = 0,3; 0,5; 0,8$)
[Distribution of tangential velocity at various twist degrees ($P = 0,3; 0,5; 0,8$)]

\bar{r}	W	U		V	$V(V+U)$	$-\left[V + \frac{1}{(1-D)}U \right]$	W
При $\Pi = 0,3, D = 8,3$ [At $P = 0,3, D = 8,3$]							
0,2	0,2	1,0		0,02	0,02	0,10	0,2
0,4	0,3	1,0		0,03	0,03	0,10	0,3
0,6	0,32	1,0		0,032	0,032	0,10	0,32
0,8	0,35	1,0		0,035	0,035	0,10	0,35
1,0	0,36	1,0		0,036	0,035	0,10	0,36
При $\Pi = 0,5, D = 7,2$							
0,2	0,50	1,0		0,05	0,052	0,11	0,47
0,4	0,78	1,0		0,078	0,084	0,11	0,76
0,6	0,76	1,0		0,076	0,082	0,11	0,75
0,8	0,66	1,0		0,066	0,070	0,11	0,63
1,0	0,59	1,0		0,055	0,062	0,11	0,56

\bar{r}	W	U		V	$V(V+U)$	$-\left[V + \frac{1}{(1-D)}U\right]$	W
При $\Pi = 0,8, D = 4,2$							
$r \leq 0,4$ область паровоздушного жгута [$r \leq 0,4$ air-steam harness area]							
0,4	2,0	1,0		0,2	0,24	0,11	2,18
0,6	2,12	1,0		0,215	0,256	0,11	2,32
0,8	1,85	1,0		0,185	0,22	0,11	2,0
1,0	1,75	1,0		0,175	0,205	0,11	1,86

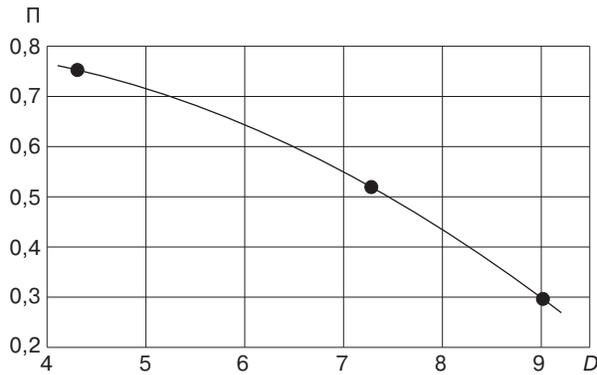


Рис. 1. Зависимость $\Pi = f(D)$
[Fig. 1. $\Pi = f(D)$ relationship]

В рассматриваемом течении выходное сечение водовода, из которого поток выпускается в затопленное пространство в виде закрученной струи, — одновременно начальное сечение струи, т.е. служит связующим сечением при переходе от одних граничных условий (с твердыми границами) к условиям открытого потока.



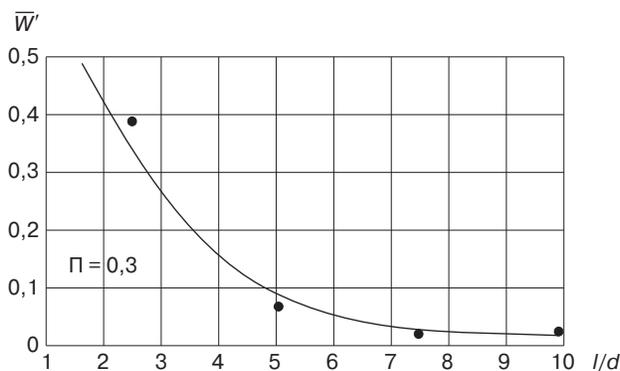
Рис. 2. Распределение безразмерной тангенциальной скорости в выходном сечении водовода
[Fig. 2. Distribution of dimensionless tangential velocity in outlet section of conduit]

При анализе расчетных и экспериментальных данных было замечено, что константа D в произвольных точках данного сечения практически постоянна, а при переходе от одного сечения к другому — изменяется. Важной характеристикой в рассматриваемых течениях является связь параметра закрутки с константой D . Именно два эти параметра ответственны за формирование структур потока. Другая важная характеристика — изменение максимальной продольной U_{\max} и тангенциальной скорости W_{\max} .

Таблица 2

Распределение тангенциальной скорости W' (по уравнениям вурфа скоростей) (рис. 3)
[Tangential velocity distribution W' (by wurf equations of velocities)]

l/d	U_{\max}/U_0	$W_{\max}/U_0 = \bar{W}_{\max}$	$V/U_0 = 0,1\bar{W}_{\max}$	$-V(V + U_{\max})$	$\left[V + \frac{1}{(1-D)} \bar{U}_{\max} \right]$	\bar{W}'
2,5	0,6	0,32	0,032	0,032	0,0856	0,38
5,0	0,47	0,08	0,008	0,008	0,1176	0,07
7,5	0,38	0,052	0,0052	0,0052	0,1124	0,04
10,0	0,32	0,034	0,0034	0,0034	0,1122	0,004



Условные обозначения:

— расчет по вурфу [calculation for a wurf];

• — эксперимент [experiment]

Рис. 3. Сравнение распределения тангенциальной скорости (по уравнениям вурфа скоростей) с базовыми данными, т.е. с единичными профилями скорости

[Fig. 3. Comparison of tangential velocity distribution (according to wurf equations of velocities) with basic data, i.e. with unit velocity profiles]

Гидравлический расчет распределения скорости в закрытом канале удобно вести в такой последовательности:

- 1) устанавливаются исходные данные, определяемые известными способами:
 - средняя скорость U_0 в отводящем водоводе;
 - параметр закрутки Π_0 в сечении на выходе из водовода;
 - диаметр водовода;
- 2) по зависимости $\Pi = f(D)$ определяется значение постоянной D (см. рис. 1);
- 3) находится распределение тангенциальной скорости для данных значений Π и D (см. табл. 1, 3);
- 4) проверяется достоверность полученного профиля тангенциальной скорости путем сопоставления его с опытными профилями скорости [1] (см. рис. 2).

Определение константы D в начальном сечении струи
[Determination the D constants in the initial section of jet]

l/d	U_{\max}/U_0	$W_{\max}/U_0 = \bar{W}_{\max}$	$V/U_0 = 0,1\bar{W}_{\max}$	$\bar{U}_{\max}\bar{W}_{\max}$	$\bar{U}_{\max} + \bar{W}_{\max} + \bar{V}$	D
2,5	0,6	0,32	0,032	0,192	0,95	7,3
5,0	0,47	0,08	0,008	0,038	0,56	9,4
7,5	0,38	0,052	0,0052	0,197	0,48	8,89
10,0	0,32	0,034	0,0034	0,0108	0,35	10,07
20,0	0,17	0,011	0,0011	0,0017	0,18	6,5
Среднее значение константы принимаем $D = 9,5$ [The average value of the constant is $D = 9,5$]						

Гидравлический расчет течения в закрытом канале или в затопленной струе имеет свои особенности, поэтому их нужно рассчитывать отдельно. Указанные течения связаны общим сечением (сечением выхода из закрытого канала) одновременно являющимися начальным сечением затопленной струи.

Расчет затопленной струи удобно вести в такой последовательности.

Устанавливаются исходные данные:

- средняя скорость U_0 в отводящем водоводе;
- параметр закрутки Π_0 в сечении струи. Для струи используется параметр закрутки, учитывающий отсутствие твердых границ течения. Таким служит параметр закрутки Хигера—Бэра в модифицированном виде S'_n , где линейные размеры нормированы по половине радиуса $R/2$, а не по радиусу R , как это принято для параметра Хигера—Бэра, т.е.

$$S'_n = 2 S_n. \quad (2)$$

С учетом этого интенсивность закрутки S'_n определяется по зависимости (рис. 4)

$$S'_n = f(\Pi). \quad (3)$$

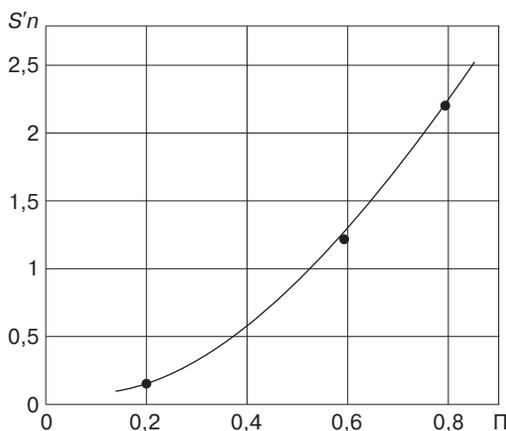


Рис. 4. Зависимость $S'_n = f(\Pi)$
[Fig. 4. $S'_n = f(\Pi)$ relationship]

При одинаковой интенсивности закрутки передаваемой затопленной струе в начальном сечении значение S'_n в 2 раза больше, чем значение S_n . Таким образом, зависимость $S'_n = f(\Pi)$ отражает условия течения для сечения выхода из закрытого канала через величину Π , относящуюся к закрытому каналу и величину S'_n , относящуюся к затопленной струе.

Течение в затопленной струе совсем иное, чем в закрытом канале и требует верификации, которое можно провести на основе опытных и расчетных данных. Такие данные для слабо закрученных струй приводятся в работе Л.Г. Лойцянского [5], что представляет интерес для авторского исследования, так как из вихревого водосброса также вытекает слабо закрученная струя с остаточной закруткой $\Pi \leq 0,3-0,35$.

Следует отметить, что такая интенсивность закрутки слабо влияет на меридиональные течения в струе [6] и поэтому результаты, полученные для одной произвольной закрутки в пределах области слабо закрученных струй, можно распространить на весь класс таких струй.

Выводы

Благодаря использованию вурфа скоростей и канона пропорциональности, связывающего между собой три компонента скорости U , V и W удалось получить явные аналитические решения в более простых формах — дифференциальных и интегрально-дифференциальных. Этот канон был выбран удовлетворяющим закону сохранения энергии, что позволило наложить ограничения на функцию $\Psi = \Psi(x, r)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пономарев Н.К. К вопросу о закрученном движении вязкой жидкости в трубе // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 3. 2012. С. 30–38.
- [2] Животовский Б.А. Водосбросные и сопрягающие сооружения с закруткой потока. М.: Изд-во ИПК РУДН, 1995. С. 190.
- [3] Животовский Б.А., Пономарев Н.К. Сопряжение шахтных водосбросов с нижним бьефом в условиях высоких напоров // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. № 1. С. 1–13. Doi:10.15862/122TVN115. URL: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vo> (дата обращения: 16.10.2017).
- [4] Животовский Б.А., Пономарев Н.К. Совершенствование гидравлического расчета шахтного вихревого водосброса // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. № 1. С. 1–17. Doi:10.15862/121TVN115. URL: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vo> (дата обращения: 16.10.2017).
- [5] Лойцянский Л.Г. Распространение закрученной струи в безграничном пространстве, затопленном той же жидкостью // Прикладная математика и механика. АН СССР [ОТН]. 1953. Т. 17. С. 3–16.
- [6] Зуйков А.Л., Орехов Г.В., Волишаник В.В. Распределение азимутальных скоростей в ламинарном контрвихревом течении // Вестник МГСУ. 2013. С. 150–161

© Пономарев Н.К., Щесняк Л.Е., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 28 октября 2017

Дата принятия к публикации: 10 января 2018

Для цитирования:

Пономарев Н.К., Шесняк Л.Е. К вопросу о гидравлическом расчете основных параметров продольно-циркуляционных течений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 59–66. DOI 10.22363/2312-8143-2017-19-1-59-66

Сведения об авторах:

Пономарев Николай Константинович — кандидат технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* гидравлика сооружений, речная гидравлика, проблемы использования водных ресурсов. *Контактная информация:* e-mail: ponomarev_nk@rudn.university, rudneng@mail.ru

Шесняк Леонид Евгеньевич — аспирант департамента архитектуры и строительства инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* гидравлика, гидравлика сооружений, речная гидравлика. *Контактная информация:* e-mail: schesnyak_le@rudn.university

ON HYDRAULIC ANALYSIS OF THE MAIN PARAMETERS OF LONGITUDINAL-CIRCULATING FLOW

N.K. Ponomarev, L.E. Schesnyak

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

Recently in practice of engineering hydraulic structures spillways with a longitudinal-circulating flow are applied. The distinguished properties of longitudinal-circulating flows are a unique example of compatibility of flow type with technological purpose of a spillway structure. The hydraulic characteristics of flow (throughput capacity, velocity distribution, pressure distribution, cavitation analysis, etc.) are determined on the basis of the calculation methods developed in the above studies, namely for: longitudinal flow using the known standard calculation methods [1]; longitudinal-circulating flow interacting with solid boundaries of spillway [1–4]; longitudinal-circulating flow in the form of a swirling stream in the aquatic environment or in the air [2; 3]; the flow arising from the interaction of unidirectional longitudinal-circulating flows [4; 5]; the flow arising from the interaction of oppositely swirling coaxial flows [3]. In this paper, the authors consider the longitudinal-circulating flow of viscous incompressible fluid in a closed channel and in a jet using a velocity wurf linking the three components of velocity U , V and W .

Key words: vortex shaft spillway, longitudinal-circulating flow, velocity wurf, tangential velocity, twist parameter

REFERENCES

- [1] Ponomarev N.K. On the problem of twirled movement of viscous liquid in a pipe. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2012. № 3. 2012. P. 30–38. (In Russ.).
- [2] Zhivotovski B.A. *Vodosbrosnye i sopryagayushchie sooruzheniya s zakrutkoj potoka*. [Spillway and grade-control structures with flow twist]. Moscow: IPK RUDN publ., 1995. 190 p. (In Russ.).

- [3] Zhivotovski B.A., Ponomarev N.K. Conjugation of mine spillway lower pool under conditions of high pressures. *Naukovedenie*. 2015. 7(1). 1–13. (In Russ.). Doi: 10.15862/122TVN115. Available from: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vo> (Accessed 16.10.2017). (In Russ.).
- [4] Zhivotovski B.A., Ponomarev N.K. Improvement of hydraulic calculation of mine vortical spillway. *Naukovedenie*. 2015. 7(1). 1–17. (In Russ.). Doi: 10.15862/121TVN115. Available from: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vo> (Accessed: 16.10.2017). (In Russ.).
- [5] Lojcyanskij L.G. Rasprostranenie zakruchennoj strui v bezgranichnom prostranstve, zatoplennom toj zhe zhidkost'yu [Swirling stream propagation in unbounded space flooded with the same fluid]. *Prikladnaya Matematika i Mekhanika AN SSSR [OTN]*. 1953. No. 17. P. 3–16. (In Russ.).

Article history:

Received: October 28, 2017

Accepted: January 10, 2018

For citation:

Ponomarev N.K., Schesnyak L.E. (2018). On hydraulic analysis of the main parameters of longitudinal-circulating flow. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(1), 59–66. DOI 10.22363/2312-8143-2017-19-1-59-66

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