УДК 532.543+627.131

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧНОГО ПОТОКА
ДЛЯ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИДРОТУРБИН В МАЛЫХ РЕКАХ**

© Н. А. Федоров

Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова
Россия, Чувашская Республика, 428015 г. Чебоксары, пр. Московский, 15.

Тел.: +7 (8352) 45 21 24 (доб. 2471).

Email: niknadin@yandex.ru

Для исследования эффективности преобразования энергии водного потока свободно поточными гидротурбинами при выполнении натурных испытаний необходимо определить распределения скоростей в водном потоке по его глубине. Особенно это актуально, когда глубина потока соизмерима с высотой гидротурбины, а для оценки эффективности гидротурбины необходимо правильно определить, среднюю скорость потока. Предложено определять скоростные характеристики участка речного потока через его максимальную скорость на примере реки Большая Кокшага (респ. Марий Эл) с применением известных теоретических зависимостей.

Ключевые слова: средняя скорость, коэффициент Кориолиса, энергия потока, русловой поток, гидротурбина.

Введение

После разработки и изготовления модели свободно поточной гидротурбины необходимо ее исследовать и определить эффективность ее работы при обтекании потоком. Это можно сделать, как правило, в бассейне для опытов, а также в натуральных речных потоках. Результаты, полученные при исследовании обтекания модели гидротурбины равномерным потоком в опытном бассейне позволяют сравнить их с теоретическими расчетами, но не позволяют учесть всю динамичность руслового потока, и характер течения. Исследования модели гидротурбины в натурном потоке позволяет оценить работу будущей свободнопоточной гидротурбины в русловых потоках с неравномерно распределенными скоростями по глубине. Натурные испытания для исследуемых моделей гидротурбин проводились на реке Большая Кокшага в республике Марий Эл [1].

Кинетическая энергия водного потока

Установки, использующие скоростной напор, называют свободно поточными ГЭС [2]. Каждая такая свободно поточная установка характеризуется КПД η , которая определяется как отношение полученной энергии свободно поточной установки к полной кинетической энергии потока, проходящей через гидротурбину. Для некоторых гидротурбин, использующих скоростной напор, этот коэффициент может достигать до 0.37 [3].

Кинетическая энергия потока, проходящего через гидротурбину, зависит от распределения осредненных скоростей по глубине потока, которое подчиняется определенному гидравлическому закону. Поэтому необходимо знать закон распределения скоростей по глубине, что позволит ввести поправочный коэффициент Кориолиса α для определения кинетической энергии.

Удельная кинетическая энергии для всего потока, или скоростной напор, выражается зависимостью

$$H = \alpha V^2 / 2g, \quad (1)$$

где α – коэффициент Кориолиса, V – средняя скорость потока, g – ускорение свободного падения.

Мощность потока определяется:

$$N = \alpha \rho S V^3 / 2, \quad (2)$$

где α – коэффициент Кориолиса, V – средняя скорость потока; S – ометаемая площадь турбины; ρ – плотность воды.

Таким образом, задача нахождения удельной кинетической энергии и мощности потока сводится к определению средней скорости потока и к нахождению коэффициента Кориолиса.

Коэффициент Кориолиса

Коэффициент Кориолиса α – это безразмерная величина, которая определяется как отношение кинетической энергии потока, протекающей в единицу времени через данное живое сечение, к кинетической энергии потока, вычисленной в предположении, что скорости во всех точках живого сечения равны средней скорости потока. В среднем, коэффициент Кориолиса для движения воды в реках и каналах может достигать 1.25 [4] и определяется при известном распределении скоростей следующей зависимостью:

$$\alpha = \int_0^1 \left(\frac{u}{V} \right)^3 \frac{\partial S}{S}, \quad (3)$$

где V – средняя скорость потока, U – скорость потока в сечении S .

Применение этой зависимости требует знать законы распределения скоростей в потоке, а это требует выполнение натурных замеров при помощи приборов для измерения локальных скоростей потока.

Г. В. Железняков при обобщении данных о коэффициентах α для рек предложил формулу [5].

$$\alpha = 1 + 0.88 \left(0.34 + \frac{1 + \sqrt{g}/C}{2.3 + 0.3\sqrt{g}/C} \right), \quad (4)$$

где C – коэффициент Шези, g – ускорение свободного падения.

Коэффициент Шези входящий формулу (4), как видно из [6] можно определить по различным зависимостям. Часть формул, для определения коэффициента Шези требуют определения коэффициента шероховатости n . По мнению автора [7] определение коэффициента шероховатости связано с большими погрешностями до 35%, (а в некоторых случаях вовсе не пригодны), т.к. сами коэффициенты определяются по натурным данным с помощью формулы Шези для равномерного движения. Надежность получения коэффициента Шези в этом случае недостаточная. В [8] показано преимущество эквивалентной шероховатости, входящей в формулу для определения коэффициента гидравлического трения, по сравнению с коэффициентом шероховатости n Маннинга-Павловского. Таким образом, из предложенных формул для определения коэффициента Шези, воспользуемся зависимостью, которая отвечает условию подтверждения применимости на основании опытных данных.

Коэффициент Шези предложено в [6] определять в зависимости от средней скорости в русле, средней глубины H и ширины потока B :

$$C/\sqrt{g} = 5.25(V/\sqrt{3gv})^{1/2}(H/B)^{1/6}, \quad (5)$$

где v – коэффициент вязкости, V – средняя скорость потока, H – средняя глубина потока, B – ширины потока.

Данная формула получена по результатам обработки полевых испытаний на 9 гидрометрических створах рек сложенных мелким и средним песком [6, табл. 4.1], в предположении о независимости коэффициента Шези от изменения диаметра донных частиц внутри фракций мелкого и среднего песка. Средние скорости рек на исследуемых створах при этом начинались от 0.21 м/с. Данную зависимость можно считать надежной для определения коэффициента Шези всего руслового потока. При переходе к определению скоростных характеристик руслового потока на участке проведения испытаний, можно с аналогией применимости формулы Шези для определения средней скорости на вертикали потока, применить формулу (5) для определения средней скорости на исследуемом участке. Уравнение Шези для вертикали потока можно использовать при отношении ширины русла к глубине потока больше 10. Все же, для повышения точности определения коэффициента Шези желательно располагать полигон на участке равный средней глубине всего потока. Для реки Б. Кокшага, при ширине реки 60–70 м и максимальной глубине

потока в меженный период 1.7 м определить такое место не сложно выполнив замеры глубин поперек русла реки.

Итак для определения коэффициента Шези воспользуемся зависимостью (5) как подтвержденную для равнинных рек сложенных мелким и средним песком и отражающую характер изменения гидравлического сопротивления русла реки при переходе от безгрядовой формы к донно-грядовой форме.

Определение средней и максимальной скорости потока

Определение средней скорости потока или профиля скорости в сечении потока в натурных условиях, требует некоторых технических возможностей и инструментария. Способ, предложенный в статье для определения средней и максимальной скорости потока, подразумевает использование доступного способа измерения скоростных характеристик потока с применением известных теоретических зависимостей, не прибегая к дорогостоящему оборудованию.

Существуют различные способы и приборы для измерения скорости течения воды [4; 9]. Наиболее простые и доступные из этих способов – использование затопленных поплавков и поплавков интеграторов. К сожалению, способ определения средней скорости потока с помощью поплавков интеграторов, имеет погрешность измерения до 10%. Так как определяемая мощность потока находится в кубической зависимости от средней скорости, то не точность средней скорости может привести к большим ошибкам. Достаточно просто и надежно можно определить максимальную скорость потока реки с помощью затопленного поплавка [4].

Определить среднюю скорость потока, можно применив связь между максимальной и средней скоростями через показатель степени n в степенном профиле скоростей [10]:

$$u_m/V = 1 + n, \quad (6)$$

где: u_m – максимальная скорость потока на вертикали, V – средняя скорость потока, n – показатель степени, возьмем равным для плоских потоков в не зависимости от шероховатости [10].

$$n = 1.76\sqrt{\lambda}, \quad (7)$$

где: λ – коэффициент гидравлического трения.

Указанная формула (7) получена из теоретических зависимостей и достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Для определения коэффициента гидравлического трения на участке исследования можно воспользоваться взаимосвязью коэффициента Шези с гидравлическим сопротивлением русла для равномерных открытых водотоков:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}, \quad (8)$$

Известно, что максимальная скорость по вертикали руслового потока расположена не на поверхности, а на некотором заглублении. Глубину затопления поплавка в водном потоке можно определить с учетом предположения авторами [11], что вблизи динамической оси водного потока, существует область по высоте с практически постоянной продольной скоростью равной максимальной скорости. Причем эта область располагается на расстоянии $0.8-0.9 h$ водного потока. Такое предположение подтверждается характером типичного распределения стандартов вертикальных пульсаций скорости по глубине потока [12, рис. 2–3], где стандарт пульсации постепенно уменьшается до $0.8 h$ и затем сохраняется без изменения практически до свободной поверхности. Широкий интервал области водного потока, на которой расположена максимальная скорость, можно объяснить наличием вблизи динамической оси потока структуры турбулентности отличной от структуры турбулентности описываемым по логарифмическому распределению скорости [13].

С другой стороны, зная степенной закон распределения скорости (9) для турбулентного потока можно определить по формуле (3) применительно к вертикали потока коэффициент Кориолиса.

$$\frac{u}{u_m} = \left(\frac{y}{H}\right)^n, \quad (9)$$

где u_m – максимальная скорость потока на вертикали, U – скорость потока в сечении, y – расстояние от дна русла.

Таким образом, располагая данными о геометрических параметрах реки и максимальной скоростью на вертикали руслового потока, можно определить мощность.

Алгоритм расчета

Расчет мощностной характеристики руслового потока на участке реки, где производились исследования моделей гидротурбин, выполнен для реки Большая Кокшага, расположенной в республике Марий Эл. Участок естественного русла реки характеризуется с постоянным размером, формой, шероховатостью, свободной поверхностью по длине потока, поэтому данный участок реки можно рассматривать с достаточной степенью точности как с равномерным движением. Ширина реки составит 71 м, максимальная глубина реки 1.7 м, длина прямого участка русла реки составляет 1.2 км. Дно реки песчанное с крупностью песка не более 0.5 мм. Все натурные испытания проводились в тихую безветренную погоду. Измерение максимальной скорости на исследуемых участках производилось с помощью затопленного поплавка.

Алгоритм расчета следующий:

1) По формуле (5) в первоначальном приближении задается средняя скорость реки и определяется коэффициент Шези.

2) По формулам (6–8) уточняется средняя скорость потока на исследуемом участке при известной измеренной максимальной скорости потока.

3) Полученное значение средней скорости сравнивается с первоначальным приближением и в случае необходимости расчеты повторяются пока не будет достигнута требуемая точность.

4) По формуле (3) определится коэффициент Кориолиса.

5) По формуле (2) определяется мощность на участке руслового потока.

Результаты расчетов. Для средней глубины потока $H = 1.2$ м и измеренной максимальной скорости $u_m = 0.45$ м/с на исследуемом участке единичной ширины, получены следующие результаты: коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0.085$, средняя скорость потока по вертикали $V = 0.297$ м/с, показатель степи $n = 0.513$, коэффициент Кориодиса $\alpha = 1.637$ для вертикали потока вычисленный по закону распределения скорости, коэффициент Кориолиса $\alpha = 1.268$ вычисленный по формуле (4), мощность потока единичной ширины $N = 25.83$ Вт.

Сопоставления результатов расчетов коэффициента Кориолиса для исследуемого участка по расчетным формулам (3) и (4) показало, что коэффициент Кориолиса по формуле (4) дает заниженный результат. Причину такого разногласия можно обосновать тем, что формула (4) применяется для целого русла реки, а по формуле (3), коэффициент Кориолиса определен для распределения скорости на вертикале. Также можно отметить, что степенное распределение скоростей не применимо для придонной области [14] и в области близкой к поверхности потока на глубине порядка $0.1 H$ от поверхности. Следовательно, необходимо модель гидротурбины располагать в потоке на высоте $0.2-0.9 H$.

Выводы

Мощность руслового потока с неравномерно распределенными скоростями по глубине можно определить, зная максимальную скорость потока на вертикали исследуемого участка и геометрические параметры реки, используя зависимость (5) и степенной закон распределения скоростей по вертикали. Важно правильно определить участок руслового потока, на котором будут произведены исследования эффективности работы гидротурбины, и располагать модель гидротурбины на высоте $0.2-0.9 H$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кабинета Министров Чувашской Республики в рамках научного проекта №17-48-210286.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Н. А. Обтекание гидротурбины с лопастями простой формы // Гидродинамика больших скоростей и кораблестроение: сб. тр. Междунар. летней научной школы-конф., посв. 155-летию со дня рождения академика

- А. Н. Крылова. Чебоксары: изд-во Чуваш. гос. ун-та, 2018. С. 127–132.
2. Февралев А. В. Проектирование гидроэлектростанций на малых реках : учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Н. Новгород: ННГАСУ. 2014. 181 с.
 3. Блинов Б. С. Гирляндная ГЭС. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1963. 64 с.
 4. Железняков Г. В., Неговская Т. А., Овчаров Е. Е. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока / под ред. Г. В. Железнякова. М.: Колос, 1984. 205 с.
 5. Железняков Г. В. Пропускная способность русел каналов и рек. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 311 с.
 6. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 184 с.
 7. Барышников Н. Б. Гидравлические сопротивления речных русел. СПб.: изд-во РГТМУ. 2003.
 8. Рылова И. А., Боровков В. С. Эквивалентная шероховатость напорных и безнапорных водоводов // Вестник МГСУ. 2013. №4. С. 181.
 9. Слабожанин Г. Д. Гидрометрия. Учебное пособие по гидрологии. Томск: изд-во Томск. Гос. архит.-строит. ун-та, 2014. 58 с.
 10. Скребков Г. П. Степенное распределение скоростей в плоских и круглых турбулентных потоках. М.: Гидротехническое строительство, 2011. №7. С. 90–95.
 11. Скребков Г. П., Федоров Н. А., Побережная Т. Г. Кинематическая особенность плоских турбулентных потоков вблизи динамической оси // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: мат-лы III Междунар. (IX Всерос.) конф. Чебоксары, 2016. С. 496–504.
 12. Боровков В. С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 286 с.
 13. Скребков Г. П., Федоров Н. А. Интегральные и локальные величины коэффициентов турбулентного профиля скорости // Вест. МГСУ. №4. 2013. С. 201–208.
 14. Высоцкий Л. И. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки: монография. Изд. 2-е, доп. СПб.: Лань, 2015. 665 с.

Поступила в редакцию 12.04.2019 г.

EXPERIMENTAL STUDIES OF CHARACTERISTICS OF RIVER FLOW FOR CALCULATION OF THE EFFICIENCY OF THE TURBINES ON SMALL RIVERS

© N. A. Fedorov

*Chuvash State University
15 Moskovsky Avenue, 428015 Cheboksary, Russia.*

Phone: +7 (835) 245 21 24.

**Email: niknadin@yandex.ru*

In order to study the operation of river installations that convert energy of water flow into mechanical energy, it is necessary to know the distribution of flow velocities by depth. This is important, when the size of the turbines is close to the depth of the river. When the distribution of velocities by depth is known, the average flow rate and Coriolis coefficient for the river section can be calculated. Tests of models of hydraulic turbines were carried out on the Bolshaya Kokshaga River in the Mari El republic. The author G. V. Zheleznyakov proposed to determine the Coriolis coefficient for the entire flow by the empirical formula. To do this, it is required to find Chezy's coefficient. There are many formulas for determining Chezy's coefficient. The author of the article applied Grishanin's formula to determine Chezy's coefficient, which is confirmed by the study of flat rivers. To determine the average flow rate, one can use the maximum and average velocity coupling formula and the exponent n in the power velocity profile. The exponent n depends on the coefficient of hydraulic friction and determined by a known theoretical formula. Calculation of Chezy's coefficient by Grishanin's formula makes it possible to determine the coefficient of hydraulic friction; this will allow one to form expression, which describes distribution of flow velocity by depth. It is proposed to determine Coriolis coefficient knowing the law of distribution of flow velocity by depth. Coriolis coefficient determined by the formula of G. V. Zheleznyakov gives understated results. It is proposed to determine maximum speed using a submersible float. It is important to determine correctly the place in the river flow for performing the tests.

Keywords: average speed, Coriolis coefficient, flow energy, channel flow, hydraulic turbine.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Fedorov N. A. Gidrodinamika bol'shikh skorostei i korablestroenie: sb. tr. Mezhdunar. letnei nauchnoi shkoly-konf., posv. 155-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A. N. Krylova. Cheboksary: izd-vo Chuvash. gos. un-ta, 2018. Pp. 127–132.
2. Fevralev A. V. Proektirovanie gidroelektrostantsii na malykh rekakh : ucheb. posobie. 2 ed., pererab. i dop. [Designing hydroelectric power plants on small rivers: textbook. 2nd Ed., revised and enlarged]. N. Novgorod: NNGASU. 2014.
3. Blinov B. S. Girlyandnaya GES [String hydroelectric power plant]. M.-L.: Gosenergoizdat. 1963.
4. Zheleznyakov G. V., Negovskaya T. A., Ovcharov E. E. Gidrologiya, gidrometriya i regulirovanie stoka [Hydrology, hydrometry and flow control]. Ed. G. V. Zheleznyakova. Moscow: Kolos, 1984.
5. Zheleznyakov G. V. Propusknaya sposobnost' rusel kanalov i rek [Capacity of channel beds and riverbeds]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981.
6. Grishanin K. V. Gidravlicheskie soprotivleniya estestvennykh rusel [Hydraulic resistance of natural channels]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992.
7. Baryshnikov N. B. Gidravlicheskie soprotivleniya rechnykh rusel [Hydraulic resistance of riverbeds]. Saint Petersburg: izd-vo RGGMU. 2003.
8. Rylova I. A., Borovkov V. S. Vestnik MGSU. 2013. No. 4. Pp. 181.
9. Slabozhanin G. D. Gidrometriya. Uchebnoe posobie po gidrologii [Hydrometry. Textbook of hydrology]. Tomsk: izd-vo Tomsk. Gos. arkhitekt.-stroit. un-ta, 2014.
10. Skrebkov G. P. Stepennoe raspredelenie skorostei v ploskikh i kruglykh turbulentnykh potokakh [Exponential distribution of velocities in flat and round turbulent flows]. Moscow: Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo, 2011. No. 7. Pp. 90–95.
11. Skrebkov G. P., Fedorov N. Novoe v arkhitekture, proektirovanii stroitel'nykh konstruktov i rekonstruktsii: mat-ly III Mezhdunar. (IX Vseros.) konf. Cheboksary, 2016. Pp. 496–504.
12. Borovkov V. S. Ruslovye protsessy i dinamika rechnykh potokov na urbanizirovannykh territoriyakh [Channel processes and dynamics of river flows in urban areas]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989.
13. Skrebkov G. P., Fedorov N. A. Vest. MGSU. No. 4. 2013. Pp. 201–208.
14. Vysotskii L. I. Prodol'no-odnorodnye osrednennye turbulentnye potoki: monografiya. 2 ed. dop. [Longitudinal homogeneous averaged turbulent flows: monograph. 2nd Ed. enlarged]. Saint Petersburg: Lan', 2015.

Received 12.04.2019.