

БЕСПЛОТИННЫЕ ГЭС, КАК ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

*Гетманов В.Н., Блинов В.В., Гончаров Н.Ф., Комаров С.Г.,
Макаров И.Р., Мандрик М.С.*

ПК «Энергетика и экология», г. Новосибирск

В работе рассмотрены особенности и возможности бесплотинного способа извлечения энергии из потоков воды с помощью турбин поперечного типа, приведены данные экспериментов на реках с реальными устройствами киловаттного диапазона мощности.

Бесплотинная энергетика, как экологически чистый, возобновляемый источник энергии

Использование энергии рек как источника электрической энергии актуально в связи с большой мощностью водяных потоков. При этом важным достоинством гидроэнергетики является способность выполнять пиковые нагрузки, кардинально перестраивая выдаваемую в сеть мощность за считанные минуты.

В настоящее время способы производства энергии преобразуются, увеличивая свою эффективность и экологическую чистоту. При этом возобновляемые источники энергии развиваются опережающими темпами.

Важной частью преобразования гидроэнергетики является развитие её бесплотинных методов. Их экологичность состоит в ликвидации таких, например, недостатков плотинной энергетики, как затопление больших территорий и накопление в водохранилищах вредных веществ; кавитационные эффекты, уничтожающие фитопланктон и омертвляющие реку.

Бесплотинная энергетика не требует строительства дорогостоящих плотин, не препятствует прохождению рыб и лодок и является экономически приемлемым и экологически чистым способом извлечения энергии из потоков воды, в полной мере сохраняющим жизнь в реке и качество воды.

Бесплотинные ГЭС способны заменить бензоагрегаты, требующие подвоза дорогостоящего топлива в труднодоступные места, что в ряде случаев позволяет исключить строительство капиталоемких линий электропередачи.

Отдельная погружная бесплотинная микро-ГЭС может быть введена в поток и извлечена из него с помощью лебёдок, размещается на дне реки в полностью затопленном положении, легко транспортируется и обеспечивает электропитанием, холодной и горячей водой небольшую группу людей. Поставленная каскадом вдоль течения реки группа бесплотинных ГЭС может генерировать энергию большой мощности [1,2].

Особенности метода бесплотинной энергетики

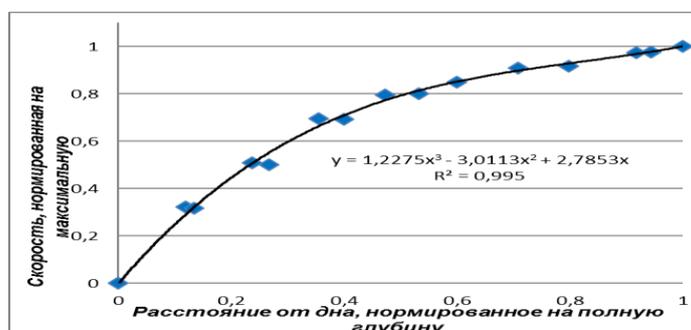


Рис. 1. Экспериментальный профиль скоростей воды в речном потоке, от дна к поверхности реки. Глубина и скорость даны в относительных единицах.

Распределение скоростей потока по глубине реки

Измерения проведены с помощью модернизированной гидромеханической вертушки ГР-99 [3], тарированной в диапазоне от 0,1 до 5 м/с с погрешностью $\pm 1\%$. Измерения на глубине проведены в центре потока. Данные оцифровки скорости в зависимости от глубины реки в относительных единицах, приведены на (рис. 1).

На (рис. 1) обобщены данные трёх экспериментов на реке Чемал Республики Алтай, что оправдано ввиду однородности условий. Глубина реки H_0 в этих экспериментах, находилась в пределах от 0,8 м до 1,3 м, ширина центральной, скоростной части потока, составляла 5-6 м, полная ширина реки, без мелководных крыльев - 12-15 м, максимальная скорость потока на его поверхности V_0 находилась в пределах 2,5-3 м/с.

Средняя по глубине скорость потока на его оси $\langle V(H) \rangle = 0,69 V_0$, средняя величина куба скорости, определяющая мощность потока, $\langle V^3(H) \rangle = 0,43 V_0^3$.

Распределение скоростей и глубин потока по ширине реки

На (рис. 2) приведена зависимость двух величин: скорости потока V на его поверхности и глубины потока H от его ширины B . Данные получены экспериментально и представлены в относительных единицах. Погрешность измерений около 5%.

При $0,1 < B < 0,9$, то есть, вне зоны мелководных и медленных крыльев, содержится основная часть потока, средняя по ширине скорость потока на его поверхности $V_b = 0,78V_0$, а средняя по сечению:

$$\langle V \rangle = 0,69V_0 \frac{\sum (V \cdot H)}{\sum H} = 0,56V_0. \quad 1)$$

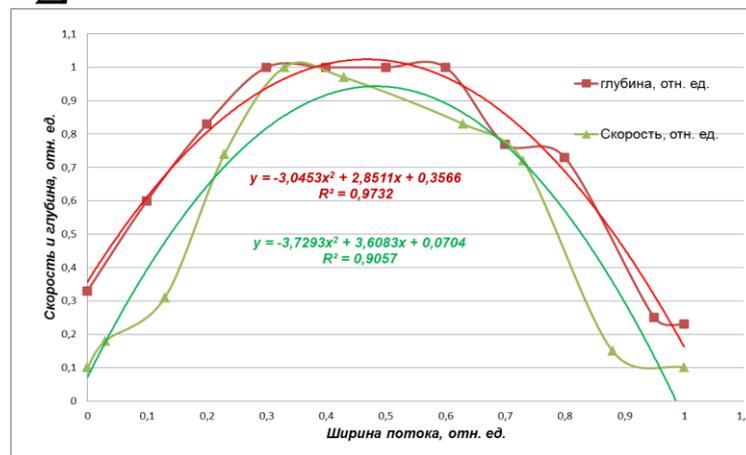


Рис. 2. Распределения скоростей на поверхности потока и его глубины по ширине реки, данные в относительных единицах. Показаны экспериментальные и аппроксимирующие кривые.

Из этой зависимости (рис. 2) следует, что в центральной части потока, в зоне $0,25 < B < 0,75$, то есть, в половине его ширины на поверхности, содержится доля 0,84 от его полной мощности, то есть мощности зоны $(0-1)V_0$. Поэтому эффективный размер турбины, извлекающей основную часть мощности потока, составляет примерно половину высоты H_0 и половину ширины B_0 его быстрого тока на поверхности, а площадь перекрытия потока турбиной:

$$S_p \approx \frac{H_0}{2} \times \frac{B_0}{2}, \quad 2)$$

Поток воды через сечение потока, учитывающего его форму, соответствует выражению:

$$Q [m^3 / c] = 0,56V_0 S_T, \quad 3)$$

где V_0 - скорость на поверхности в середине потока, взятая по абсолютной величине, то есть выраженная в м/с, S_T - площадь сечения потока, учитывающая его форму, коэффициент $\approx 0,56$, согласно (1), учитывает экспериментальную зависимости скорости от ширины и глубины потока, обрезанного по ширине на уровне $0,1$ его глубины.

Мощность потоков воды на турбину

Турбина, ось которой направлена поперёк потока, находится в его середине и имеет диаметр равный половине глубины, т.е. расположенная в диапазоне от $0,25$ до $0,75$ глубины реки H_0 (см. ось x согласно (рис. 3)), находится в зоне скоростей потока от $0,5$ до $0,9$ от её максимального значения на поверхности (см. ось Y). Назовём это положение центральным.

Учитывая, что мощность потока пропорциональна третьей степени скорости, получим, что в таком положении турбина, (рис. 2), принимает на себя около $0,6$ полной мощности потока реки W_0 :

$$\sum_{0,5}^{0,9} V^3 / \sum_0^1 V^3 = 0,61. \quad (4)$$

Задавая положение турбины в скоростном ядре потока в относительных единицах глубины и ширины и полагая, что турбина площадью (2) может свободно разместиться в ядре потока, то есть сужение потока ко дну в рабочей зоне турбины незначительно, и используя данные о скоростях из (рис. 1 и 2), можно получить относительные величины потоков мощности W_M на турбину в данном её положении:

$$W = \left\langle (V/V_0)^3 \right\rangle_Y \times \left\langle (V/V_0)^3 \right\rangle_B \times W_0, \quad (5)$$

где используются средние значения величин V^3 , усреднённые по высоте Y и ширине B зоны турбины, $W_0 = \rho S_T \left\langle (V/V_0)^3 \right\rangle / 2$ - полная мощность в ядре потока. Распределения мощности по ширине и глубине потока в (4) считаются независимыми. Максимально возможная извлекаемая мощность потока $W_{II} = 0,59W_M$, где коэффициент $K \approx 0,59$ соответствует формуле Н.Е. Жуковского [4]. Результаты расчётов соответствуют данным (рис. 1,2) и представлены в (табл. 1).

Таблица 1. Извлекаемая мощность потока в трёх положениях турбины

Положение турбины	По глубине, Y	По ширине, B	$\langle V/V_0 \rangle^3 >_Y$	$\langle V/V_0 \rangle^3 >_B$	W_M/W_0	W_{II}/W_0
Центральное	0,25-0,75	0,25-0,5	0,61	0,84	0,51	0,3
Рабочее	0,35-0,85	0,25-0,75	0,72	0,84	0,6	0,35
Высокое	0,45-0,95	0,25-0,75	0,8	0,84	0,67	0,4

Относительные величины мощности скоростного ядра потока W_M , поступающей на турбину S_P , и предельно извлекаемой турбиной мощности W_{II} в трёх её положениях в потоке, согласно (4). Глубина отсчитана от дна и нормирована на полную глубину потока, ширина берётся от берега и нормирована на полную ширину скоростной части потока. (Практически достигнутая эффективность извлечения энергии из потока для турбин поперечного типа в наших экспериментах в полтора - два раза ниже указанной максимальной W_{II}).

Практическая реализация элементов бесплотинной энергетики на реках Горного Алтая. Описание установки



Рис. 3. Внешний вид реальной установки на берегу реки Чемалка Республики Алтай, май 2014 года.

На (рис. 3) видны: 1 - несущий каркас, установленный на две лыжи из герметизированных труб диаметром 80 мм и длиной $3,45\text{ м}$; 2 - сориентированная параллельно лыжам турбина из четырёх одинаковых секций диаметром 500 мм и длиной 598 мм из листовой стали-3 толщиной 2 мм , сваренных аргонодуговой сваркой по торцам, каждая из которых повернута относительно соседней на 90 градусов, для выравнивания вращающего усилия потока при вращении турбины; 3 - листы формирователя потока, затеняющего нижнюю часть турбины от набегающего потока воды, длиной 1700 мм и общей шириной 3 м . Формирователь, также, под действием потока воды, прижимает установку ко дну реки, стабилизируя, тем самым её положение [1]. Ось турбины поднята на высоту 600 мм от опоры и затенена формирователем на размер $0,55$ своего радиуса. Подвеска турбины проведена с помощью подшипниковых узлов с уплотнением на основе трущейся пары: автомобильные сальники – тройное металлизированное покрытие (никель, медь, хром), нанесённое на стальную основу. Используются сферические двухрядные подшипники типа 1207 , выдерживающие нагрузку до 1200 кг в динамике.

Геометрия лопастей гидротурбины разработана в ПК «Энергетика и экология», г. Новосибирск [5,6], метод компоновки гидроагрегата защищён патентом РФ [1].

Достоинства применяемой турбины состоят не только в её достаточно высокой эффективности и простоте изготовления, но и в устойчивости к внешним воздействиям, связанным, например, с ударами о турбину плывущего топляка и иных предметов.

Виден также электромеханический блок (4 на рис. 3), установленный на торце турбины, которая является мотором для электрогенератора. Его сигнал передаётся на берег с помощью электрического кабеля, выведенного над уровнем реки через вертикальную трубу (5 на рис. 3).

Турбина отъюстирована с электромеханическим блоком 4 с помощью люнета 1 и передаёт вращательный момент на ось генератора через модифицированную муфту автомобиля Нива и мультипликатор $ЗМП-31,5$ с передаточным числом $31,5:1$ и мощностью до $2,2\text{ кВт}$ [7].

Электромеханический блок.

Генератор, трансформатор и система регулировки.

Для выработки электроэнергии используется стандартный автомобильный генератор $G\ 288E$, со следующими заводскими характеристиками:

- рабочее напряжение $28В$, с регулятором 11.3702 ;

- номинальные нагрузка 30 A , мощность 840 Вт ; частота вращения 1900 об/мин ;
- ток самоограничения 47 A , максимальная частота вращения - 5000 об/мин ;
- максимальная мощность $1,3\text{ кВт}$, вес 10 кг ;
- минимальная частота, доступная стабилизации, 1180 об/мин .

Режим генератора был модифицирован. Электрическая схема приведена на (рис. 4).

Генератор находился в потоке воды и был герметизирован, связан с блоком трансформатора и управления с помощью силовых и управляющих кабелей. Был разработан новый регулятор на двух транзисторах $KT3102$ и $KT827$, и подстроечном резисторе $СП-35А$, позволивший работать в режиме до $70В$. В новом варианте выпрямленный ток подавался только на регулятор напряжений (кабель 1) а в нагрузку подавался переменный трёхфазный ток, который проходя через трансформатор, повышал уровень напряжения в $141/37=3,8$ раза. Затем напряжение выпрямлялось и к нему добавлялось выпрямленное напряжение генератора, что с учётом индуктивной связи обмоток генератора и трансформатора повышало уровень напряжения суммарно в $5,3$ раза, и подавалось в нагрузку как однофазное, постоянное с регулируемой амплитудой до 220 В . (Для трансформатора использовался корпус стандартного трёхфазного трансформатора $ОСМ-Т\ 380/220В \times 50Гц$ мощностью около $2,5\text{ кВт}$, с новой намоткой.)

С целью стабилизации напряжения в нагрузке и повышения эффективности работы генератора, взятое с генератора выпрямленное напряжение I с помощью регулятора напряжений подавалось в обмотку подмагничивания ($R_{AB}=3,7\text{ Ом}$) через реостат РП, а амплитуда напряжения регулировалась подстройкой сопротивления реостата и резистора реле - регулятора. В рабочем режиме мощность цепи подмагничивания была близка к 100 Вт , основная часть которой выделялась в реостате.

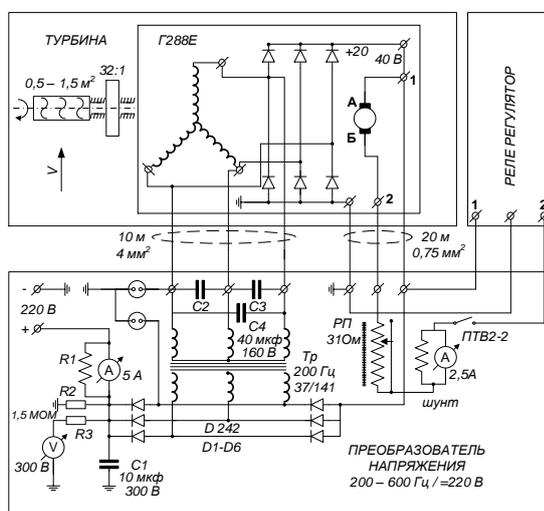


Рис. 4. Схема микро-ГЭС электрическая, принципиальная

Регулятор мог также по линии 1-2 стартовый импульс в обмотку подмагничивания с помощью батарейки $4,5В$, однако в практической работе в реке наблюдался самозапуск генератора на остаточной намагниченности.

К.п.д. преобразования механической энергии.

Режимы работы системы генератор - трансформатор тщательно исследовались на специальном стенде. Полный к.п.д. преобразования механической энергии турбины в электрическую определяется сочетанием к.п.д. систем передачи и преобразования этой мощности. Измеренные данные собраны в (табл. 2).

Таблица 2. К.п.д. преобразования механической энергии в электрическую.

Узел	Трение в осях	Юстирующая муфта	Мультипликатор	Генератор-трансформатор	Кабель	Общий к.п.д.
К.п.д.	0,99	0,95-0,97	0,97	0,59*	0,98	0,53-0,54

- При мощности в нагрузке около 700 Вт

Ввод - вывод установки в поток

Установка вводилась в поток с помощью стальных тросов диаметром 6 мм и двух стандартных лебёдок, с допустимой нагрузкой до 500 кг, закреплённых на двух берегах, и фиксировалась в выбранном положении с помощью каната диаметром 10 мм, закреплённым на торцах несущих лыж и на стопорном колу, вбитому в грунт на берегу. Натяжение каната при вводе в поток было небольшим, в связи со стабилизирующим действием формирователя, прижимающим установку ко дну с силой около 100 кг и компенсирующим опрокидывающий момент. В рабочем положении канат натягивался, что указывало на уменьшение контакта опорных лыж с поверхностью, которые занимали, по-видимому, положение хорды с опорой в крайних точках. В таком положении, со снятым стопорным канатом, установка ненадолго оставалась в покое, но в среднем, из-за вибраций, понемногу начинала смещаться по течению.

Положение турбины в потоке

Как видно по отметке уровня воды на выводной трубе (рис. 5), расстояние от точки опоры установки до поверхности реки $h \approx 1,1$ м, а известная ширина опоры 3,45 м.

По характеру перемещения установки поперёк реки было установлено, что ложе реки в центральной части имеет малую кривизну дна и протяжённость не намного превышающую ширину опоры. Поэтому форма дна реки в области расположения установки в потоке в своём сечении может восприниматься, как трапеция, нижняя грань которой имеет протяжённость $L \approx (4,5-5)$ м.



Рис. 5. Бесплотинная ГЭС в потоке воды

Сопоставляя этот размер с (рис. 2), получим, что этой протяжённости ровного дна соответствует 0,3 от полной ширины центральной, скоростной части потока V_0 , а положение турбины в потоке по его ширине характеризуется координатами от $0,25V_0$ до $0,55V_0$. При этом $0,3V_0 \approx 4,5$ м, поэтому $V_0 \approx 15$ м – ширина потока без его мелководной части. Поскольку ось турбины удалена от дна на 0,6 м, а её диаметр равен 0,5 м, то она расположена в зоне от 0,35 м до 0,85 м, отсчитанных от дна, или от $0,32h$ до $0,77h$, в единицах полной глубины потока. Найденные координаты положения турбины позволяют с помощью (рис. 1 и 2) рассчитать мощность потока, поступающего в зону турбины. Площадь турбины составляет $1,17/5=0,23$ от площади центральной зоны потока $S=L \cdot h$, или 0,12 от полной площади потока реки.

Измерение механической мощности и к.п.д. турбины в потоке

В данном эксперименте полная электрическая мощность генератора в максимуме достигала 760 Вт , из которых около 90 Вт уходили в систему подмагничивания, а 670 Вт в нагрузку.

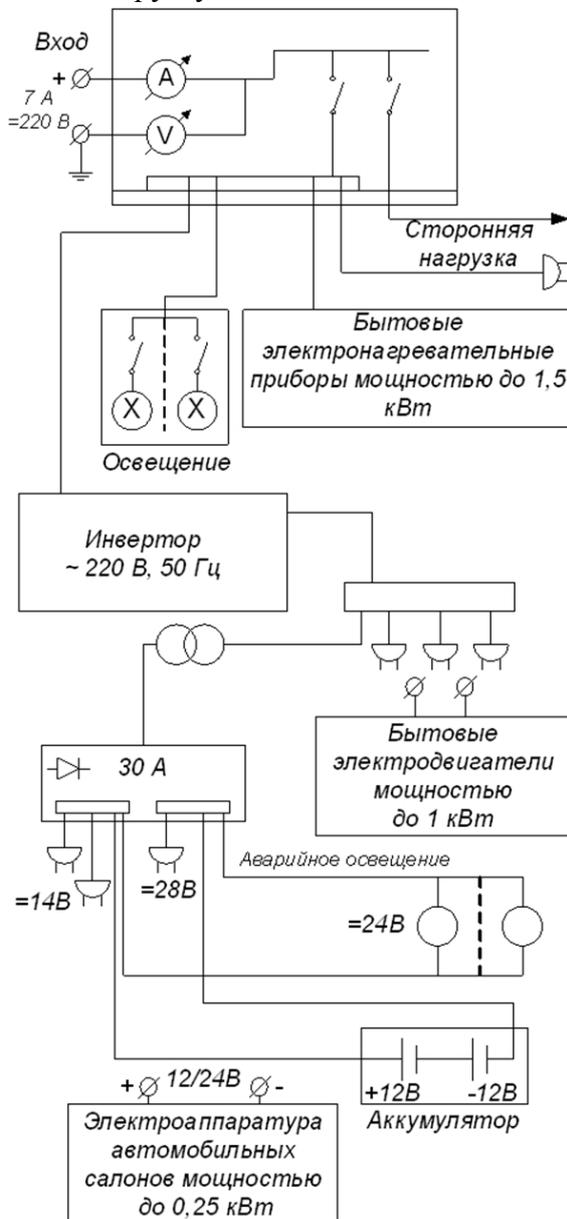


Рис. 6. Блок-схема сети потребителей

ка с установленной в него турбиной, усреднена по ширине турбины и по глубине её верхней половины, см. (рис. 1,2).

Аналогичные результаты по мощности $\approx 1 \text{ кВт/м}^2$ были получены нами ранее, в экспериментах на этой же реке с турбинами площадью $0,5 \text{ м}^2$ и $1,5 \text{ м}^2$ [2,9,10]. Поэтому для извлечения большой энергии из рек необходимо использовать каскады турбин, через которые поток проходит многократно.

На (рис. 6) приведена блок-схема возможного варианта сети потребителя, которая подключена к микро-гэс (или группе микро-гэс) однофазной линией передачи $=220 \text{ В}$, что позволяет удалять потребителя от реки вплоть до 1000 м с малыми потерями мощности. Сеть $=220 \text{ В}$ разветвляется на стороннюю нагрузку, электронагревательные приборы и освещение, не требующие преобразования формы сигнала. Также к

Механическая мощность турбины определялась из электрической делением её на к.п.д. преобразования энергии и равна: $W_T = 760/0,53 = 1430 \text{ Вт}$, что соответствует мощности с единицы поверхности сечения турбины - $1,43/1,17 = 1,2 \text{ кВт/м}^2$. Скорость свободного потока $V_0 \approx 2,5 \text{ м/с}$, а после установки турбины, на входе в формирователь, $V \approx 2,2 \text{ м/с}$; расчётная мощность потока на турбину $W_T = \rho S_p \langle V^3 \rangle / 2$, с усреднением куба скорости потока на турбину по её сечению. Согласно данным (рис. 1 и 2), в рабочем положении (от $0,3$ до $0,6$ по ширине и $0,32$ до $0,77$ по глубине), средние значения кубов относительной скорости равны: по глубине - $0,5V_0^3$, а по ширине - $0,87V_0^3$. Поэтому $\langle V^3 \rangle = 0,5 \cdot 0,87V_0^3 = 0,435 \cdot (2,5)^3$. Тогда: $W_T = \rho S_p \langle V^3 \rangle / 2 = 0,5 \cdot 1000 \cdot 1,2 \cdot 0,435(2,5)^3 = 4,07 \text{ кВт}$. Поэтому к.п.д. турбины равен $\square \approx 1,43/4,07 = 0,35 (\pm 0,04)$.

Полученное значение соотнесено с полной мощностью невозмущённого потока проходящего через площадь сечения всей турбины. Полученный к.п.д. турбины близок к значению $\square \approx 0,4$ указанному Б.С. Блиновым для данного типа турбин [8] и в $1,7$ раза превышает данные [5], полученные для данного типа турбин в экспериментах с моделями без формирователя потока.

Быстроходность турбины в максимуме мощности

$$Z = 2\pi R / V = 1,58 / (2,2 * 0,86 * 0,954) = 0,88$$

где скорость V в центре поверхности пото-

входу сети подключается инвертор, создающий однофазное переменное напряжение $\approx 220V \cdot 50Гц$, которое используется по прямому назначению, и далее, через понижающий трансформатор, создаёт низковольтную сеть, способную работать на электроаппаратуру автомобильных салонов, аварийное освещение и на зарядку аккумуляторов на $\approx (12-24) В$.

Основные экспериментальные результаты

- С использованием турбины диаметром $0,5 м$ и длиной $2,3 м$, площадью $1,2 м^2$, получена максимальная электрическая мощность $P \approx 760 Вт$ при частоте вращения турбины $\approx 1 Гц$ и быстроходности $0,9$. Вес установки $\approx 250 кг$.

- Использование формирователя потока площадью $3 \cdot 1,7 = 5,1 м^2$, установленного под углом 12° к плоскости опоры, позволило добиться устойчивого положения установки в потоке и обеспечило удобства при её вводе в поток. Затенённость нижней части турбины формирователем составляла $0,55$ от её радиуса.

- К.П.Д. системы преобразования механической энергии в электрическую $K_\varepsilon \approx 0,53$;

- Механическая мощность самой турбины $P \approx 760/0,53 = 1430 Вт$; или $1,43/1,17 = 1,2 кВт$ на $1 м^2$ сцепления с потоком;

- Скорость свободного потока $V_0 \approx 2,5 м/с$, после установки турбины $V_1 \approx 2,2 м/с$;

- Расчётная мощность потока на турбину $\approx 4,1 кВт$. Поэтому к.п.д. турбины равен $\eta \approx 1,43/4,1 = 0,35 (\pm 0,04)$. Полученное значение соотнесено с полной мощностью невозмущённого потока, проходящего через площадь сечения всей турбины.

- Зарегистрированные в экспериментах на реке значения эффективной быстроходности около $0,9$ и к.п.д. около $0,4$ соответствуют представлениям о работе турбины в режиме циркуляции скорости при несимметричном обтекании лопаток турбины [5], при идеальной реализации которого $Z=2/3$, а $\eta \approx 0,59$.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Макаренко Ю.Ф. за изготовление гидротурбины, Гетманову Я.В. – за помощь в оформлении текста статьи.

Литература

1. Пат. 2187691 (РФ). Русловой гидроагрегат / Блинов В.В., Гетманов В.Н., Комаров С.Г., Горяев Е.П. Действует с 13.03.2000, зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ 20.08.2002. Бюлл. №23.
2. Гетманов В.Н. Экспериментальное исследование работы погружных микро-ГЭС и пути достижения высокого уровня мощности – Материалы первого международного форума REENFOR-2013: «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности» – 22-23 октября 2013 – Москва, Россия – С. 120–123.
3. Илларионов В.И., Бурцев П.Н. Руководство по поверке гидрологических приборов. - Л.: «Гидрологическое издательство» – 1966.
4. Жуковский Н.Е. Ветряная мельница типа НЕЖ. – М. – Л.: «Изд. ОНТП СССР, ПСС», – 1937 – 5.
5. Быковский Ф.А., Ведерников Е.Ф., Новиков Ю.М. Исследование роторов поперечного типа для бесплотинных ГЭС // Изв. Академии наук СССР, Энергетика – 1996 – 5 – С.138–143.
6. Новиков Ю.М. Парокрылый моментосбалансированный ротор поперечной турбины. А.С. 1786280// Б.И. – 1993 – 1.
7. Мотор-редукторы планетарные типа ЗМП // К.: «Час», ОКП 416172, – 1991 – 15 С.
8. Блинов Б.С. Гирляндная электростанция // Журнал «Радио» – 1961 – 6 – С.64–65.
9. Гетманов В.Н. Индивидуальная энергоустановка мощностью 1 кВт на основе бесплотинной микро-ГЭС // Новосибирск: Изд. Президиума СО РАН, Основные результаты по региональной программе «Сибирь» – 2001– С. 51–52.
10. Гетманов В.Н. Бесплотинная микро-ГЭС мощностью 1,5 кВт – Научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий», 19-20 марта 2013 – Новосибирск, Россия – 5 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.itp.nsc.ru/conferences/mzhz/files/S05_Getmanov.pdf 5