

НАПЛАВНАЯ МИНИ-ГЭС БАРАБАННОГО ТИПА: ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ

© 2015 г. А.Г. Солоницын, Е.Н. Пинко

Наряду с ВЭУ, дизель-генераторами, солнечными установками, и др. – мини-ГЭС, в общем случае, являются равноправной генерирующей составляющей локальных энергетических систем (ЛоЭС). Предложенная наплавная мини-ГЭС барабанного типа (НБ мини-ГЭС) для работы в составе ЛоЭС является альтернативой существующим реализациям. По ряду причин строительство плотинных ГЭС с годовым регулированием стока и даже деривационных ГЭС для удаленных территорий представляется во многих случаях затруднительным: расположение их на территории заповедников, заиленные аллювиальные устьевые участки основных рек (поселки часто расположены на побережье); малое потребление энергии; инвестиционные ограничения. Поэтому внимание было обращено на горные притоки рек, имеющие большой уклон каменистых русел с индикаторной паводковой скоростью потока до 4 м/с и наличием микроводопадов. Для преодоления недостатков, присущих как плотинным, так и деривационным ГЭС, в статье предлагается и исследуется наплавная мини-ГЭС барабанного типа для работы в составе локальных энергетических систем (ЛоЭС). В представленном технологическом решении для НБ мини-ГЭС рассматриваются русловой барабанный модуль (РБМ) и береговой щитовой модуль (БЩМ). Приводится классификация гидроагрегата (РБМ) с оценкой его характеристик и скоростных качеств. Целесообразность установки НБ мини-ГЭС рассматривается на основании расчета эффективной мощности водяного потока на примере реки Бикин (с. Красный Яр, Приморский край). Полученное значение мощности при положении нижнего края РБМ на уровне поверхности воды говорит о вероятной целесообразности установки НБ мини-ГЭС в рассматриваемом и подобных местах.

Ключевые слова: наплавная мини-ГЭС барабанного типа, НБ мини-ГЭС, локальные энергетические системы, гидроагрегат, русловой барабанный модуль (РБМ), береговой щитовой модуль (БЩМ).

In addition to wind power plants, diesel generators, solar plants, etc. mini hydro power plants in general, are an equal generating part of local energy systems (LoES). The proposed floating mini hydro power plant of a drum type (FD MiniHydro) to work in the LoES is an alternative device to existing implementations. For several reasons, the building of hydropower plants with an annual flow regulation and diversion hydropower plants even for remote areas seems in many cases difficult: they are located on the territory of nature reserves, alluvial estuaries of major rivers become silted (the villages are often located on the coast); energy consumption is low; investment is restricted. Therefore, attention has been drawn to the mountain tributaries of rivers with steep slopes of rocky beds with indicator flood flow rate of up to 4 m/s and the presence micro waterfalls. To overcome disadvantages of the dam and derivational hydropower plants, in the article there is proposed and investigated a floating mini hydro power plants of a drum type to work in the local energy systems (LoES). In the present technological solutions for FD MiniHydro power plants, there is considered riverbed drum unit (RDU) and coastal shield module (SCM). Also in custody there is presented classification of the hydraulic unit (RDU) with evaluation of its performance and speed qualities. The feasibility of installing FD MiniHydro is considered on the basis of the calculation of the water flow effective capacity on the example of the Bikin River, the village of Krasny Yar, Primorsky Krai. The resulting power value at the position of the lower RDU edge at the water level indicates the likely feasibility of the installing FD MiniHydro in this and similar areas.

Key words: Floating Drum Type MiniHydro Power Station, FD MiniHydro, local energy systems, hydroelectric, riverbed drum unit (RDU), a coastal shield module (SCM).

Введение. Начиная с 2002 года, в Инженерной школе ДВФУ (ДВПИ им. В. Куйбышева, ДВГТУ) разработаны основы «Концепции локальных энергетических систем (ЛоЭС) для удалённых территорий с максимальным использованием ВИЭ» [1–5, и др.]. За основу принят исследовательский подход, исключающий контекстуальное деление источников энергии на возобновляемые и

топливные – вариант технологической реализации не является определяющим для конечного пользователя. Потребителя интересуют конечные энергетические и экономические характеристики энергообъекта, расположенного в его районе, поселке. Таким образом, все дальнейшие разработки осуществлялись по принципу «от потребителя»: исследуется энергоизолированный объект (поселок,

горнорудная разработка, и т.д.) в части характера потребления и наличия местных энергоресурсов. Далее принимается комплексное решение по мощности и технологическому составу будущей ЛоЭС. Данный подход имеет практическую реализацию [6, 7].

При проведении элементов инженерно-геологических изысканий в окрестностях посёлков на о. Сахалин, на Курилах, в Приморском крае, нами был определён ряд перспективных гидростворов для установки мини-ГЭС. В частности, шесть из них – в Тернейском районе Приморского края [8]. По ряду причин: расположение их на территории заповедников, заиленные аллювиальные устьевые участки основных рек (посёлки часто расположены на побережье); малое потребление энергии; инвестиционные ограничения – строительство плотинных ГЭС с годовым регулированием стока и даже деривационных ГЭС представляется во многих случаях затруднительным. Поэтому внимание было обращено на горные притоки рек, имеющие большой уклон каменистых русел с индикаторной паводковой скоростью потока до 4 м/с и наличием микроводопадов.

В результате, для данных створов была предложена наплавная мини-ГЭС для работы в составе ЛоЭС [9], которая по комплексу решений является альтернативой существующим реализациям.

Наплавная мини-ГЭС барабанного типа, НБ мини-ГЭС (Floating Drum Type MiniHydro Power Station, FD MiniHydro) – ГЭС, агрегат которой обладает положительной плавучестью и расположен непосредственно в русле. ГЭС, рабочим органом которой является лопастной барабан, совмещающий функции герметичного корпуса, рабочего органа (водяного колеса), поплавка, генератора и охладителя. НБ мини-ГЭС предназначена для преобразования энергии свободного потока воды (рек, сбросов ГЭС и других гидротехнических сооружений) в механическую энергию вращения барабана и дальнейшего генерирования электроэнергии.

Технологическое решение. НБ мини-ГЭС состоит из руслового барабанного модуля (РБМ) и берегового щитового модуля (БЩМ). РБМ предназначен для преобразования энергии свободного потока воды в электрический ток, в нём также может помещаться минимум оборудования для управления мини-ГЭС.

На берегах устанавливаются бетонные основания – быки. Быки с лебедками и тросы предназначены для удержания и перемещения РБМ. Один трос и бык – эвакуационно-страховочные. Длина тросов изменяется с помощью лебёдок так, чтобы РБМ был установлен в русле в рабочем положении. При этом продольная ось РБМ располагается перпендикулярно направлению потока. Возможен вариант «архимедова винта», когда ось РБМ направляется по потоку.

На одном из берегов, выше уровня максимального подтопления, сооружается фундаментное основание для БЩМ. В БЩМ размещен генераторный щит с устройствами защиты и автоматики генератора и установленного в этом же модуле преобразователя, предназначенного для преобразования электроэнергии в нужный промышленный стандарт, а также выключатель с соответствующими устройствами защиты и автоматики для подключения преобразователя к сети.

Корпус РБМ, вращающийся на неподвижном валу, с установленным в нем генератором и необходимой автоматикой, доставляется к месту установки без лопастей, опорных элементов, дышел и досок. Механическая связь генератора с валом осуществляется посредством демфирующе-центрирующих муфт. Конечная сборка РБМ производится на берегу водоема в непосредственной близости от кромки воды либо с частичным подтоплением. На противоположной стороне от генератора расположен балласт, вес которого равен весу генератора. Имеется несколько вариантов компоновки РБМ.

РБМ в рабочем положении не подвержен механическому разрушению и не теряет работоспособности при воздействии посторонних крупных

предметов, которые проходят под корпусом и лопастями. Предполагается разработка РБМ повышенной надежности с ориентировочным сроком службы не менее 100 000 часов при средней наработке на отказ около 10 000 часов (один сезон). Может быть использован герметичный балластный танк для устранения чрезмерной плавучести (глиссирования). В корпусе может быть размещен жидкий непроводящий хладагент, возможно заполнение инертными газами либо двуокисью углерода через ниппель для снижения коррозии.

РБМ работает в условиях произвольных уровней воды в водоёме. Направляющие доски, установленные на дышлах, в штатном режиме (высокий уровень воды) выполняют роль концентраторов потока в зону РБМ и позиционируются по конкретной обстановке. При низком уровне нижние ребра досок, имеющие соответствующие площадь опоры и конфигурацию, выполняют также функции донных упоров, не допускающих посадку лопастей на дно водоема.

РБМ преобразует энергию потока в механическую энергию вращения корпуса посредством лопастей. Энергия вращения корпуса преобразуется в электроэнергию в генераторе (показан вариант магнитоэлектрического СГ), узлы которого конструктивно могут являться одновременно узлами корпуса, и передаётся по силовому кабелю на генераторный щит. Кроме силовых кабелей, РБМ и БЩМ могут быть связаны другими кабелями, по которым передаются сигналы для контроля параметров РБМ:

- температура обмоток генератора, давление и влажность в полости корпуса;
- управление работой генератора.

В частности, регулирование тока возбуждения при использовании зависимой системы возбуждения. Контроль состояния изоляции;

- контроль вибраций и угла наклона по поперечной оси (заваливание). Разъемное соединение РБМ и генераторного щита обеспечивает их неразрушающее разъединение в случае

непредвиденного критического смещения РБМ в русле с автоматической блокировкой выдачи электроэнергии. В данном случае нагрузку берут на себя маневренные генерирующие мощности ЛоЭС. При этом генераторный щит исполнен таким образом, что обеспечивает мягкое, бестолчковое подключение нагрузки с последующим шунтированием полупроводниковых приборов в установившемся режиме для исключения гидродинамических ударов. Береговой модуль выдает потребителю только целесообразное количество энергии для данных мгновенных условий: динамическое регулирование выходной мощности.

Расположение БЩМ на берегу снижает вес рулевой части устройства, повышает надежность РБМ, облегчает обслуживание устройств защиты и автоматики. Возможно фиксированное крепление РБМ (гидроагрегата), при условии обустройства искусственного створа на стойках, принимающих нагрузки от осей РБМ. В этом случае барабан удаляется из потока лебедкой путем вертикального подъема по направляющим несущим стойкам. При таком расположении ГЭС в зоне большого естественного уклона (водопад) возможно получение дополнительной энергии за счет увеличения скорости потока перед РБМ. Однако данный полустационарный вариант является более затратным.

Результаты расчета и их обсуждение. Для определения целесообразности установки НБ мини-ГЭС на каком-либо участке реки необходимо знать, во-первых, эффективную мощность водяного потока в том его сечении, в которое входят лопасти водяного колеса. Во-вторых, требуется знать коэффициент полезного действия водяного двигателя.

Выполним расчет эффективной мощности водяного потока применительно к среднему течению реки Бикин, пост № 100 с. Красный Яр [10] (таблица 1).

В этом месте может быть установлен РБМ с размерами, приведенными в таблице 2. В том числе, учтены габариты транспортных средств.

Таблица 1 – Среднегодовые значения расхода Q по посту №100, Красный Яр, м³/с

Среднегодовой расход	Наибольший расход	Наименьший открытого русла (1 раз в 10 лет)	Наименьший в зимний период
160	947	75,5	8,25

Таблица 2 – Габариты барабанного модуля НБ мини-ГЭС, м

Длина барабана, L	Диаметр барабана, D _т	Ширина лопасти, B	Возможная осадка, H
10,0	3,0	1,5	До 3,0

При равномерном распределении скорости водяного потока v по его поперечному сечению S эта мощность определяется известным выражением [9]:

$$N_e = \frac{1}{2} \rho S v^3, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, ≈ 1000 кг/м³.

Примем, что лопасти лежат в плоскостях, в которых расположена ось водяного колеса, причём эта ось направлена перпендикулярно скорости водяного потока. Если длина лопастей равна L , а их ширина – B , и при этом лопасть погружается в воду на всю ширину, то выражение (1) принимает вид:

$$N_e = \frac{1}{2} \rho L B v^3. \quad (2)$$

Примем скорость водяного потока v в сечении S , где проходят лопасти водяного колеса, равной 4 м/с (что справедливо для узкой горловины, где ширина реки составляет 20 м), а расход через сечение – 120 м³/с. Дополнительный напор, создаваемый перед РБМ под нагрузкой, на данном этапе не учитывается. Увеличение скорости потока от уменьшения сечения русла вследствие осадки РБМ не учитывается. Таким образом, принимается наилучший, чисто кинетический вариант.

Из (2) находим эффективную мощность этой части водяного потока $N_e = 480$ кВт. Такое значение мощности при положении нижнего края РБМ на уровне поверхности воды говорит о вероятной целесообразности установки НБ мини-ГЭС рассматриваемого типа в рассматриваемом и подобных местах (при

заглублении РБМ до уровня оси вращения $N_e = 960$ кВт). Но предварительно следует определить, какую долю эффективной мощности водяного потока можно преобразовать в механическую мощность водяного двигателя предлагаемого вида. Данная оценка, включая варианты оптимизации движителя, произведена и будет представлена в последующих публикациях.

Классификация гидроагрегата.

Гидроагрегат (РБМ) относится к низконапорным гидротурбинам. Максимальный напор не должен превышать 6–7 метров, иначе габариты турбины не соответствуют параметрам русла малых рек (расход редко превышает 1000 м³/с). Агрегат относится к малым турбинам, мощность не превышает 1 МВт.

Скоростные качества определяются быстроходностью n_s , как число оборотов турбины n , развивающей мощность NT в 1 кВт при напоре H в 1 м [11]. При принятии величин (2) действующего напора, равной максимальной осадке по уровню оси вращения 3 м, скорости вращения холостого хода – 20 об/мин, мощности турбины $PT = 100$ кВт, быстроходность равна:

$$n_s = \frac{n \sqrt{N_T}}{H^4 \sqrt{H}} \approx 51.$$

Это превышает усредненные значения 2–35 для односплоевых ковшовых (Pelton) турбин: их оптимальная быстроходность обычно составляет 10–17. Однако быстроходность многоспловых ковшовых турбин намного выше и

составляет при 4–6 соплах 65–80 [11]. Данное значение довольно относительно. Так, при поднятии либо опускании РБМ над уровнем поверхности воды этот параметр изменяется (до 25,5 при $H = B = 1,5$ м). Также параметр изменяется в зависимости от скорости течения реки. Это ставит вопрос обеспечения довольно постоянной скорости вращения под нагрузкой вне зависимости от конкретных гидрологических условий.

Заключение. Данный тип можно считать свободнопоточным многосопловым ковшовым агрегатом активного (кинетического) типа:

– агрегат имеет конечное количество лопастей;

– агрегат может быть рассмотрен как многосопловый: одновременно омываются несколько лопастей, расположенных на половине и более окружности барабана – в зависимости от осадки, напора и отдаваемой мощности;

– на практике лопасти должны иметь предпочтительно ковшовое исполнение для улучшения энергетических характеристик и расщепления струи при входе;

– вращение обусловлено, в основном, движущимся, кинетическим потоком воды, скорость которого определяется, в большей степени, скоростью незаторможенного потока v в русле, особенно, на холостом ходу и малых нагрузках. При предельных мощностях, а следовательно, напорах, растет потенциальная энергетическая составляющая. Другими словами, агрегат является неявно выраженным кинетическим;

– с гидротехнической точки зрения, отсутствует понятие регулирования стока водоема (в употребляемом для плотинных и деривационных ГЭС смысле) за счет изменения напора в зависимости от мгновенной мощности потребителя, скорости потока в данный момент и других мыслимых условий;

– отсутствуют понятия верхнего и нижнего бьефов;

– принцип частичного (до 50–60%) перекрытия русла выполняет в широких пределах регулирующие функции без дополнительных проектных и

строительных затрат за счет обтекания РБМ как препятствия.

Литература

1. Солоницын, А.Г. Электроснабжение удаленных территорий России. Выход есть – ЛоЭС / А.Г. Солоницын // Сборник трудов / Дальневосточное отделение РИА. – Вып. 9. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. – С. 26–31.

2. Солоницын, А.Г. Локальные энергосистемы и локальная энергетика в России / А.Г. Солоницын // Международная научно-практическая конференция "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" (Санкт-Петербург, 30 мая – 2 июня 2005 г.): сборник трудов. – Т. 1. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 272–273.

3. Беккер, А.Т. Локальные энергетические системы для удаленных территорий с широким использованием бестопливных источников. Техно-экономическая концепция / А.Т. Беккер, А.Г. Солоницын // Депонирование ВИНТИ, 2005. – 37 с.

4. Solonitsyn A.G. Prospects of Local Power Development with the Maximized Use of Renewables in Russia's Far East // Microgrids for Local Energy Supply to Remote Areas and Islands in APEC Region/ APEC Energy Working Group, Expert Group on New and Renewable Energy Technologies (EGNRET). APEC Project No. S EWG 15 11A Piloting Smart / Micro Grid Projects for Insular and Remote Locaties in APEC Economies/ Produced by Institute of Lifelong Education for Asia Pacific Economic Cooperation Secretariat// APEC#: 212-RE-04.3. – November, 2012. – P. 24–28.

5. Pipko E.N. Wind and Hydro Potential at the Russian Pacific Coast for the Needs of Local Energy Development // Microgrids for Local Energy Supply to Remote Areas and Islands in APEC Region/ APEC Energy Working Group, Expert Group on New and Renewable Energy Technologies (EGNRET). APEC Project No. S EWG 15 11A Piloting Smart / Micro Grid Projects for Insular and Remote Locaties in APEC Economies/

Produced by Institute of Lifelong Education for Asia Pacific Economic Cooperation Secretariat// APEC#: 212-RE-04.3. – November, 2012. – P. 29–32.

6. Обоснование инвестиций в строительство Дальневосточной ВЭС. Пояснительная записка 101/13-08-05-1-ПЗ / под рук. А.Г. Солоницына ООО НПО «Гидротекс», шифр проекта № 1673, 2009.

7. Проект 22/10-ПЗ ветродизельной локальной энергосистемы (ВД ЛоЭС «Головнино») установленной мощностью 885 кВт в рамках ДП «Курилы» «Развитие источников нетрадиционной энергетики на Курильских островах». Вторая очередь, о. Кунашир, с. Головнино» / под рук. А.Г. Солоницына Архив ООО НПО «Гидротекс», инв. номера 1977–1992, 2010.

8. Отчет по научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе (НИОКТР) «Программа развития локальной энергетики КГУП «Примтеплоэнерго» на период 2012–2020 гг.» / под рук. А.Г. Солоницына Инв. № 2733 24/12.04-НИОКТР НПО «Гидротекс». Заказчик: КГУП «Примтеплоэнерго», 2013.

9. Солоницын, А.Г. Наплавная мини-ГЭС барабанного типа (НБ мини-ГЭС) / А.Г. Солоницын, А.Т. Беккер // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2005. – № 9 (29). – С. 47–51.

10. Росгидромет. Данные по посту № 100 р. Бикин – с. Красный Яр. Отм. нуля поста 124,37 м. БС.

References

1. Solonicyn A.G. Jelektrosnabzhenie udalennyh territorij Rossii. Vyhod est' – LoJeS [Power supply of Russian remote areas. Local power grid is a solution], *Sbornik trudov. Dal'nevostochnoe otdelenie RIA*, Issue 9, Vladivostok, Izd-vo DVG TU, 2004, pp. 26–31.

2. Solonicyn A.G. Lokal'nye jenergo-sistemy i lokal'naja jenergetika v Rossii [The local power grid and local power engineering in Russia], *Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija "Issledovanie, razrabotka i primenenie vysokih tehnologij v*

promyshlennosti", Sankt-Peterburg, 30 maja – 2 ijunja 2005 g. Sbornik trudov, Vol. 1, pp. 272–273.

3. Bekker A.T., Solonicyn A.G. Lokal'nye jenergeticheskie sistemy dlja udalennyh territorij s shirokim ispol'zovaniem bestoplivnyh istochnikov. Tehniko-jekonomiceskaja koncepcija [Local energy systems for remote areas with extensive use of non-fuel sources. Technical and economic concept.], *Deponirovanie VINITI*, 2005, 37 p.

4. Solonitsyn A.G. Prospects of Local Power Development with the Maximized Use of Renewables in Russia's Far East // *Microgrids for Local Energy Supply to Remote Areas and Islands in APEC Region/ APEC Energy Working Group, Expert Group on New and Renewable Energy Technologies (EGNRET)*. APEC Project No. S EWG 15 11A Piloting Smart / Micro Grid Projects for Insular and Remote Locaties in APEC Economies/ Produced by Institute of Lifelong Education for Asia Pacific Economic Cooperation Secretariat// APEC#: 212-RE-04.3, November, 2012, pp. 24–28.

5. Pipko E.N. Wind and Hydro Potential at the Russian Pacific Coast for the Needs of Local Energy Development // *Microgrids for Local Energy Supply to Remote Areas and Islands in APEC Region/ APEC Energy Working Group, Expert Group on New and Renewable Energy Technologies (EGNRET)*. APEC Project No. S EWG 15 11A Piloting Smart / Micro Grid Projects for Insular and Remote Locaties in APEC Economies/ Produced by Institute of Lifelong Education for Asia Pacific Economic Cooperation Secretariat// APEC#: 212-RE-04.3, November, 2012, pp. 29–32.

6. Solonicyn A.G. Obosnovanie investicij v stroitel'stvo Dal'nevostochnoj VJeC [Substantiation of investments in building Far East wind power stations], *Pojasnitel'naja zapiska 101/13-08-05-1-PZ. ООО НПО «Гидротекс», shifr proekta No. 1673*, 2009.

7. Solonicyn A.G. Proekt 22/10-PZ vetrodizel'noj lokal'noj jenergosistemy (VD LoJeS «Golovnino») ustanovlennoj moshhnost'ju 885 kVt v ramkah DP «Kurily» «Razvitie istochnikov netradicionnoj jenergetiki na Kuril'skih ostrovah». Vtoraja

ochered', o. Kunashir, s. Golovnino» [The draft of 22/10 PZ-wind-diesel local power system (Local wind-diesel power system "Golovnino") of 885 kW installed capacity within DP "the Kurils" "The development of alternative energy sources in the Kuril Islands." Second part, the island of Kunashir, Golovnino village.], Arhiv OOO NPO «Gidroteks», inv. nomera 1977–1992, 2010.

8. Solonicyna A.G. Otchet po nauchno-issledovatel'skoj i opytno-konstruktorskoj rabote (NIOKTR) «Programma razvitija lokal'noj jenergetiki KGUP «Primteplojenergo» na period 2012–2020 gg.» [Report on the research and development work "The development program of local energy of KGUP" Primteplojenergo "for the period 2012- 2020."], Inv. No. 2733 24/12.04-NIOKTR NPO «Gidroteks». Zakazchik: KGUP «Primteplojenergo», 2013.

9. Solonicyn A.G., Bekker A.T. Naplavnaja mini-GJeS barabannogo tipa (NB mini-GJeS) [Floating mini hydro power plant of drum type], *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Al'ternativnaja jenergetika i jekologija»*, No. 9 (29), 2005, pp. 47–51.

10. Rosgidromet. Dannye po postu No. 100 r. Bikin, s. Krasnyj Jar, Otm. nulja posta 124,37m. BS [Roshydromet. Data on No. 100 post Bikin River – village of Krasny Yar. Mark of post zero is 124,37 m. BS].

Сведения об авторах

Солоницын Александр Геннадьевич – ведущий инженер Инженерной школы, Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток, Россия).

Тел.: 8(914)706-78-33. E-mail: solonitsyn@gin.infosys.ru.

Пипко Елена Николаевна – аспирант Инженерной школы, Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток, Россия). Тел.: 8(914)792-64-03.

E-mail: pipko.elena@gmail.com.

Information about the authors

Solonitsyn Aleksander Gennadievich – Senior Engineer of the Engineering School, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russia). Phone: 8(914)706-78-33.

E-mail: solonitsyn@gin.infosys.ru.

Pipko Elena Nikolaevna – postgraduate student of the Engineering School, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russia). Phone: 8(914)792-64-03.

E-mail: pipko.elena@gmail.com.