

УДК 621.311

О ВЫБОРЕ ТИПА МИКРОГЭС И ЕЕ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

© 2014 Е.А. Спирин, А.А. Никитин, М.П. Головин, В.В. Карпенко

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Поступила в редакцию 24.03.2014

В статье проведен анализ возможности и эффективного использования микроГЭС (до 100 кВт) и миниГЭС (до 5 МВт), реализуемых в виде тех или иных инженерных решений. С их помощью можно обеспечить электроэнергией население отдаленных и горных районов, а также фермерские хозяйства. Это значительно дешевле и выгоднее, чем строительство линий электропередач или эксплуатация дизельных установок.

Ключевые слова: микроГЭС, генератор, турбина, плотина, напор, мощность

В плотинных ГЭС концентрация напора воды создается посредством установки плотины, полностью перегораживающей реку и поднимающей уровень воды в ней на необходимую отметку. Деривационная безнапорная ГЭС использует часть расхода реки, источник ее потенциальной энергии – только перепад высот в рукаве [1, 2]. Свободнопоточные ГЭС используют кинетическую энергию потока реки. Погружные микроГЭС круглогодичного действия удобны для небольших поселков, геологических партий и фермерских хозяйств.

Рассмотрим влияние основных характеристик ГЭС различных типов на их эффективность. Мощность гидроэлектростанции зависит от параметров водного потока реки, характеристик станции, и ее энергоустановок [3]:

$$N_{\text{ГЭС}} = n_{\text{эу}} \rho g Q_p K_Q H \eta_{\text{эу}} \quad (1)$$

где $N_{\text{ГЭС}}$ – установленная мощность гидроэлектростанции; $n_{\text{эу}}$ – количество энергоустановок; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; Q_p – расчетный расход реки; K_Q – коэффициент расхода (отношение расхода воды Q , проходящего через ГЭС, к расчетному расходу реки Q_p), для плотинной ГЭС коэффициент расхода равен единице, а для деривационной

значительно меньше единицы; H – полезный напор (напор нетто); $\eta_{\text{эу}}$ – КПД энергоустановки.

Если значение установленной мощности ГЭС и расчетный расход реки определены, то следующим этапом будет выбор энергоагрегата. В зависимости от требуемой мощности и расхода реки возможно множество решений, реализующих выработку требуемого объема электроэнергии, что достигается за счет вариации типов и количества устанавливаемых энергоагрегатов, выбор оптимального количества которых можно свести к решению задачи оптимизации. Общепринятым показателем, характеризующим экономическую целесообразность того или иного решения при проектировании микроГЭС, является стоимость одного киловатта устанавливаемой мощности, и наиболее эффективное решение соответствует минимальному значению этого показателя:

$$C_{\text{кВт}} = \frac{C_{\Sigma}}{N_{\text{ГЭС}}} \rightarrow \min \quad (2)$$

где $C_{\text{кВт}}$ – стоимость 1 кВт устанавливаемой мощности; C_{Σ} – суммарные капиталовложения, затраченные на изготовление, доставку и установку микроГЭС; $N_{\text{ГЭС}}$ – суммарная мощность микроГЭС.

Суммарные капиталовложения C_{Σ} можно описать в виде конечной суммы произведений стоимостных показателей на весовые коэффициенты:

$$C_{\Sigma} = \sum_{p=1}^n (c_p \cdot q_p) \quad (3)$$

Спирин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, старший преподаватель. E-mail: spirin-evgeniy@yandex.ru

Никитин Александр Анатольевич, кандидат технических наук, профессор. E-mail: aannikitin@yandex.ru

Головин Михаил Петрович, кандидат технических наук, профессор. E-mail: mpgolovin@gmail.com

Карпенко Валерий Витальевич, аспирант

где p – номер соответствующего показателя; n – количество показателей, характеризующих стоимость микроГЭС; c_p – удельная стоимость p -ого показателя; q_p – весовой коэффициент p -ого показателя.

Стоимость деривационной микроГЭС в основном определяется стоимостью ее гидроагрегатов и деривации. В этом случае согласно формуле (3) стоимость деривационной микроГЭС можно описать следующим образом:

$$C_{ДГЭС} = c_1(q_1) \cdot q_1 \cdot n_{эу} + c_2(D, M) \cdot q_2 = \\ = CN(N_{га}, N_g) + c_L(N_g, i) \quad (4)$$

где $c_1(q_1)$ – стоимость 1 кВт мощности энергоблока; q_1 – номинальная мощность энергоблока (кВт); $n_{эу}$ – количество энергоблоков; $c_2(D, M)$ – стоимость 1 метра трубопровода (зависит от диаметра и материала); q_2 – длина трубопровода в метрах, $c_L(N_g, i)$ – суммарная стоимость деривации (зависит от установленной мощности ГЭС и уклона местности).

Выбор параметров трубопровода является задачей оптимизацией. В качестве целевой функции можно использовать зависимость стоимости деривационного трубопровода от длины, диаметра и материала трубопровода, а также, от затрат на доставку, монтаж, эксплуатацию и др. Задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: найти оптимальные значения диаметра и длины деривационного трубопровода при которых выполняется уравнение (2) и целевая функция достигает минимума:

$$C_{тр} = f(d, L, \text{материал}) \rightarrow \min \quad (5)$$

где d – диаметр трубопровода; L – длина трубопровода; $C_{тр}$ – стоимость трубопровода длиной L и диаметром d , изготовленного из данного материала с учетом доставки, монтажа и эксплуатации.

Связь между длиной, диаметром трубопровода и полезным напором H можно найти из уравнения Бернулли:

$$H = Li + \Delta z_{0-1} + \Delta z_{2-4} - (\xi_{эз} + \lambda \frac{L}{d} + \xi_3 + \xi_{омс}) \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4} \quad (6)$$

где H – полезный напор:

$$H = \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) - \left(z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} \right) \quad (7)$$

При выбранной мощности энергоагрегата напор и расход будут постоянными величинами, в этом случае уравнение (6) будет иметь бесконечное множество решений (d_i и L_i). Из этого множества можно найти оптимальные значения диаметра и длины деривационного трубопровода, обеспечивающие минимум целевой функции (5). Выполнив задачу оптимизации по целевой функции (5) при разных значениях напора, расхода и коэффициента расхода, и выбрав среди полученных результатов вариант с наименьшей стоимостью, получим решение задачи оптимизации для всей микроГЭС, а варьируя значение среднего уклона можно выбрать участок реки для расположения микроГЭС. Задачу оптимизации для всей деривационной микроГЭС можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} C_{ДГЭС} = f(d, L, C_i^m, H, K_Q, i, n_{эу}) \rightarrow \min \\ N_{ГЭС} = n_{эу} \rho g Q_p K_Q H \eta_{эу} \\ H = Li + \Delta z_{0-1} + \Delta z_{2-4} - (\xi_{эз} + \lambda \frac{L}{d} + \xi_3 + \xi_{омс}) \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4} \end{cases} \quad (8)$$

Для решения задачи, описанной системой уравнений (8) разработан алгоритм и его программная реализация.

Основную долю стоимости деривационных микроГЭС составляет цена деривационного рукава, требующего для обеспечения напора большой длины из-за малого уклона. Существенное влияние на стоимость 1 кВт установленной мощности оказывает уклон местности. С увеличением мощности микроГЭС стоимость ее 1 кВт снижается, что обеспечивает широкий поиск наиболее эффективного варианта.

Модель эффективного применения плотинной ГЭС. Основная часть стоимости плотинной ГЭС состоит из стоимостей: гидроагрегатов, плотины, экологического ущерба от затопления земель. Тогда согласно формуле (3) стоимость плотинной ГЭС можно описать следующим образом:

$$C_{ПГЭС} = c_1 \cdot q_1 + c_2 \cdot q_1 + c_3 \cdot q_3 \quad (9)$$

где c_1 – стоимость 1 кВт мощности энергоблока; q_1 – количество киловатт устанавливаемой мощности; c_2 – стоимость строительства плотины, отнесенная к 1 кВт; c_3 – стоимость одного квадратного метра затопленных земель; q_3 – площадь затопления.

Так как плотинные ГЭС обычно применяются для больших мощностей, и стоимость каждой плотины зависит от местных условий, то для эффективного применения данной методики необходим целый ряд сведений и материалов, характеризующих условия строительства. Приведем некоторые данные о стоимости строительства малых ГЭС, найденные в сети интернет. Стоимость Солонешенской МГЭС инвесторы оценивают в 150 млн. рублей [4]. Половина этой суммы – стоимость оборудования, остальные – строительные работы. Планируемая мощность станции – 1,2 МВт, срок окупаемости – 7 лет. Особенностью Солонешенской МГЭС является то что она бесплотинного типа, что позволяет снизить затраты и минимизировать воздействие на гидрологический режим реки Ануй. Солонешенская МГЭС является одной из пяти МГЭС, строящихся по программе «40 мегаватт». Общая генерирующая мощность этих станций должна составить 31,6 МВт. Солонешенская станция наименее затратная. Общая стоимость пяти МГЭС составит более 3,5 млрд. рублей, а если

брать во внимание, что работы будут продолжаться до 2018 г., то с учетом изменения цен сумма приблизится к 4 млрд. рублей. Ачалукская ГЭС (Ингушетия) находится в стадии строительства, ввод был запланирован на 2008 г., но не осуществлён. Новая дата ввода неизвестна. ГЭС расположена на 55-м километре действующего магистрального канала Алхан-Чуртской межреспубликанской оросительной системы, вблизи села Нижние Ачалуки Малгобекского района. Проектная мощность, по разным источникам, 13,5-15 МВт, среднегодовая выработка 49,68 млн. кВт.ч. Общая стоимость строительства оценивается в 586,8 млн.руб. (в ценах 2005 г.). На участке реки Мульты от Нижне-Мультинского озера до села Мульты (Усть-Коксинский район) в 2011 г. планировалось построить каскад из 6 гидростанций с установленной мощностью 34,5 МВт. Средняя высота плотин составит 3-4 м. Стоимость проекта – 3,2 млрд. руб. Начало строительства намечено на середину 2011 г. Сроки строительства – 78 месяцев.

Таблица 1. Стоимость ГЭС

Наименование ГЭС	Мощность, МВт	Общая стоимость строительства, млн.	Стоимость 1 кВт установленной мощности, тыс. руб
Солонешенская МГЭС	1,2	150	125
Ачалукская ГЭС	15	587 (в ценах 2005 г.)	39
Мультинский каскад	34,5	3200	94

По данным Минэнерго срок окупаемости малых ГЭС составляет 8-10 лет в централизованной системе при удельных капиталовложениях (1500 \$ за 1 Квт), в автономной энергосистеме: 3-5 лет (2000 \$ за 1 КВт). Стоимость гидроэнергетического оборудования для малой ГЭС в России: 300-1200 \$ за 1 кВт, за рубежом – 1500-1800 \$ за 1 кВт. Что касается различий в стоимости строительства малой ГЭС и классической, то все зависит от конкретного проекта. К примеру, Нижне-Бурейская ГЭС мощностью 320 МВт оценивается в 31 млрд. руб. Малая ГЭС в среднем может стоить от 400 млн. до 2 млрд. руб.

Основными компонентами свободнопоточной ГЭС являются: генератор, турбина, передаточный механизм, несущая конструкция, система автоматического регулирования, защитное устройство [4]. Следовательно, стоимость свободнопоточной ГЭС можно записать в виде формулы:

$$C_{сГЭС} = c_1 \cdot q_1 + c_2 \cdot q_2 + c_3 \cdot q_1 + c_4 \cdot q_2$$

(13)

где c_1 – стоимость 1 кВт мощности генератора; q_1 – количество киловатт устанавливаемой мощности; c_2 – стоимость 1 квадратного метра площади сечения турбины в плоскости нормальной к набегающему потоку (площадь сечения турбины); q_2 – площадь сечения турбины; c_3 – стоимость передаточного механизма в расчете на 1 кВт; c_4 – стоимость несущей конструкции в расчете на единицу площади сечения турбины.

Результатом вычисления значений функции (13) будет облако точек, соответствующих решениям, обеспечивающим заданную мощность различными вариантами микроГЭС. Поиск оптимального решения сводится к выбору микроГЭС с минимальной стоимостью и номинальной частотой вращения генератора, максимально близкой к частоте вращения турбины [5]. Использование передаточного механизма позволит сдвинуть оптимальное решение ближе к номинальной частоте вращения турбины, при этом стоимость редуктора составит не более 10% от

стоимости микроГЭС. Как показали исследования модели [6], стоимость микроГЭС зависит от параметров генераторов, а также целесообразности применения, в ряде случаев, редукторов. Рассмотрим модель использования микроГЭС в типичном удаленном населенном пункте Красноярского края. Результаты расчета полной стоимости деривационной микроГЭС мощностью 5,4 кВт приведены в табл. 2, из которой видно, что стоимость микроГЭС определяется величиной уклона и с его увеличением стоимость деривационной микроГЭС уменьшается.

Так, увеличение уклона с 0,16% на р. Кизир до 0,575% на р. Малый Абакан приводит более чем к пятикратному снижению стоимости микроГЭС 4,745 млн. руб./24,32 млн. руб. Результаты расчета стоимости свободнопоточной микроГЭС приведены в табл. 3. Результаты расчета стоимости деривационной микроГЭС с учетом стоимости деривационного трубопровода приведены в табл. 4. Результаты расчетов стоимости свободнопоточной микроГЭС мощностью 50 кВт приведены в табл. 5.

Таблица 2. Стоимость деривационной микроГЭС мощностью 5,4 кВт

Река	Уклон, %	Стоимость ГЭС с трубопроводом (сталь/полиэтилен), млн.руб.	Стоимость 1 кВт мощности (сталь/полиэтилен) млн.руб./кВт
Сисим, пос. Березовая	0,26	12,76/14,89	2,36/2,75
Агул, село Петропаловка	0,33	9,38/10,93	1,73/2,02
Абакан, п. Райков	0,133	31,23/40,86	5,78/7,56
Абакан, г. Абаза	0,19	19,55/23,59	3,62/4,36
Кизир, село Иммисское	0,16	24,32/31,60	4,50/5,85
Кан, пос. Кан-Оклаер	0,47	6,12/6,76	1,13/1,125
Мал. Абакан	0,575	4,745/5,23	0,87/0,96

Таблица 3. Стоимость свободнопоточной микроГЭС мощностью 5,4 кВт

Река	Скорость реки, м/с	Стоимость ГЭС, млн.руб.	Стоимость 1 кВт мощности, млн.руб. / кВт	Количество агрегатов, штук
Сисим, пос. Березовая	2	0,336	0,062	1
Агул, село Петропавловка	2	0,336	0,062	1
Абакан, п. Райков	2	0,336	0,062	1
Абакан, г. Абаза	2	0,336	0,062	1
Кизир, село Иммисское	2,5	0,276	0,051	1
Кан, пос. Кан-Оклаер	2,5	0,276	0,051	1
Мал. Абакан	3,0	0,251	0,046	1

Таблица 4. Стоимость деривационной микроГЭС мощностью 50 кВт

Река	Уклон, %	Стоимость ГЭС с трубопроводом (сталь/полиэтилен), млн.руб.	Стоимость 1 кВт мощности, млн.руб./кВт
Сисим, пос. Березовая	0,26	46/106	0,9/2,13
Агул, село Петропавловка	0,33	34/77	0,68/1,54
Абакан, п. Райков	0,133	157/365	3,14/7,3
Абакан, г. Абаза	0,19	75/174	1,5/3,5
Кизир, Село Иммисское	0,16	104/240	2/4,8
Кан, Пос. Кан-Оклаер	0,47	22/50	0,45/1
Мал. Абакан	0,575	18/37	0,36/0,75

Таблица 5. Стоимости свободнопоточной микроГЭС мощностью 50 кВт

Река	Скорость реки, м/с	Стоимость ГЭС, млн.руб.	Стоимость 1 кВт мощности, млн.руб./кВт	Количество агрегатов, штук
Сисим, пос. Березовая	2	5,9	0,12	5
Казыр, м. ст. Казыр	2	5,9	0,12	5
Агул, с. Петропавловка	2	5,9	0,12	5
Абакан, п. Райков	2	5,9	0,12	5
Абакан, г. Абаза	2	5,9	0,12	5
Кизир, село Имисское	2,5	4,9	0,099	5
Кан, пос. Кан-Оклаер	2,5	4,9	0,099	5
Мал. Абакан	3,0	4,6	0,093	5

Сравнение результатов расчетов, приведенных в табл. 2-5, позволяет сделать вывод, что свободнопоточные микроГЭС для рассмотренных выше рек при их уклонах имеют существенные преимущества над деривационными. Так, минимальная стоимость деривационной ГЭС мощностью 5,4 кВт, соответствующая максимальному уклону реки (р. Малый Абакан), составляет 4,74 млн. руб., а стоимость свободнопоточной – 0,25 млн. руб. При мощности электростанции в 50 кВт минимальная стоимость деривационной ГЭС составит 18 млн. руб., а свободнопоточной – 4,6 млн. руб.

Выводы:

1. Для эффективного использования гидрологического потенциала малых рек России необходимо комбинировать деривационные и свободнопоточные типы ГЭС.

2. Свободнопоточные микроГЭС мощностью до 100 кВт могут эффективно применяться на реках с уклоном местности не более 10%.

3. При мощностях свыше 100 кВт и уклонах не менее 10% стоимость деривационной ГЭС становится выгодней прочих.

4. Строительство напорных плотин в малой гидроэнергетике может быть оправданным только при использовании плотин переливного типа высотой не более 5 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ушаков, В.Я. Современная и перспективная энергетика. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 468 с.
2. Чугаев, Р.Р. Гидротехнические сооружения. – М.: Высшая школа, 1978. 352 с.
3. Кривченко, Г.И. Гидравлические машины. – М.: Энергия, 1978. 320 с.
4. Московская Инжиниринговая компания «Энергия» официально заявила о начале работ по строительству в Алтайском крае первой малой гидроэлектростанции [Электронный ресурс] // Издательский дом «Алтапресс» [Официальный сайт]. URL: <http://altapress.ru/story/86749> (дата обращения: 18.03.2014 г.).
5. Электрогенераторы ВИНДЭК для ветряков и микро ГЭС [Электронный ресурс] // научно-исследовательский центр «Виндэк» [Официальный сайт]. URL: http://rosinmn.ru/elektro/alternator_windec.htm (Дата обращения: 15.03.2014 г.).
6. Спирин, Е.А. Повышение энергетических характеристик ортогональной турбины // Машиностроение. – Красноярск: ИПЦ СФУ, 2008. С. 97-103.

ABOUT THE CHOICE OF MICROHYDROELECTRIC POWER STATION TYPE AND ITS OPTIMUM CAPACITIES DEPENDING ON HYDROLOGICAL PARAMETERS

© 2014 E.A. Spirin, A.A. Nikitin, M.P. Golovin, V.V. Karpenko

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

In article the analysis of opportunity and effective use of microhydroelectric power station (up to 100 kW) and minihydroelectric power station (up to 5 MWt), realized in the form of these or those engineering decisions is carried out. With their help it is possible to provide with the electric power the population of the remote and mountain areas, and also farms. It is much cheaper and more favorable, than construction of power lines or operation of diesel machines.

Key words: microhydroelectric power station, generator, turbine, dam, pressure, power

Evgeniy Spirin, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer. E-mail: spirin-evgeniy@yandex.ru; Alexander Nikitin, Candidate of Technical Sciences, Professor. E-mail: aannikitin@yandex.ru; Mikhail Golovin, Candidate of Technical Sciences, Professor. E-mail: mpgolovin@gmail.com; Valeriy Karpenko, Post-graduate Student