

УДК 620.92

Г.Н.ПЕТРОВ, Х.М.АХМЕДОВ, М.ИЛОЛОВ, С.РАСУЛОВ, А.С.КОДИРОВ,
Дж.Ш.РАХМАТОВ

**СХЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОСВОЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
РЕКИ КАРАТАГ**

Центр инновационного развития науки и новых технологий

АН Республики Таджикистан

Поступила в редакцию 17.09.2020 г.

Выполнен анализ эффективности освоения гидроресурсов рек с использованием экономических, экологических и технических критериев. Показано, что в современных условиях Таджикистана наиболее оптимальным является строительство мини и малых деривационных ГЭС средней и малой мощности. Результаты подтверждены на конкретном примере реки Каратаг.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, гидроэнергия, ГЭС с плотинами, деривационные ГЭС, каскады ГЭС, критерии эффективности, технический критерий эффективности, экологически чистая энергетика, экономический критерий эффективности, экологический критерий эффективности.

Как источник альтернативной энергии деривационные ГЭС имеют немало преимуществ. Это экологичные и достаточно мощные генераторы, способные за короткие промежутки времени выходить на пиковые рабочие показатели. Несмотря на жесткие требования к условиям размещения деривационных ГЭС и дополнительные логистические трудности при передаче энергии на дальние расстояния деривационных ГЭС по-прежнему считаются перспективными и в некоторых отраслях полностью себя оправдывают как отличная модель надежного источника дешевой энергии [1-3].

Таджикистан расположен на территории с благоприятными природно-климатическими условиями и обладает большими запасами возобновляемых источников энергии, что позволяет ему развивать экологически чистую энергетiku [4-5]. При этом

Адрес для корреспонденции: Ахмедов Хаким Мунавварович, 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Рудаки, 33а, Центр инновационного развития науки и новых технологий АН РТ. E-mail: ahmedovhakim48@gmail.com.

основным возобновляемым источником энергии Таджикистана является гидроэнергия - общий технико-экономический потенциал только одной малой гидроэнергетики республики существенно превышает возможности всех других видов возобновляемых источников энергии вместе взятых (табл. 1.) [6].

Таблица 1

Ресурсы возобновляемых источников энергии Таджикистана, млн. т.у.т. в год [6]

Ресурсы	Валовой потенциал	Технический потенциал	Экономический потенциал
Гидроэнергия, общая	179.2	107.4	107.4
в т.ч. малая	62.7	20.3	20.3
Солнечная энергия	4790.6	3.92	1.43
Энергия биомассы	4.25	4.25	1.12
Энергия ветра	163	10.12	5.06
Геотермальная энергия	0.045	0.045	0.045
Всего (без крупных ГЭС)	5020.595	38.635	27.955

И наконец, история малой гидроэнергетики Таджикистана насчитывает сегодня уже более ста лет и все это время она успешно развивалась [7-10].

Это связано с определенными и довольно существенными преимуществами малой гидроэнергетики по сравнению со всеми другими источниками энергии. Кроме экологической чистоты к таким преимуществам относятся существенно меньшие разовые инвестиционные затраты и более короткие сроки строительства объектов.

Целью настоящей работы является анализ эффективности освоения гидроэнергетических ресурсов рек путем строительства каскадов ГЭС.

Малая гидроэнергетика по своим удельным затратам дешевле большой. Для того чтобы показать это рассмотрим две существующие принципиально разные схемы строительства каскадов ГЭС – плотинный и деривационный [11].

В любом из этих вариантов мощность ГЭС при одном и том же расходе воды в реке прямо зависит от напора или пропорциональной ему высоте плотины. Но в то же время понятно, что один и тот же энергетический эффект может быть достигнут как при строительстве одной плотины большей высоты, так и при строительстве нескольких плотин меньшей высоты. Поэтому, как показано в [12], при одном и том же энергетическом эффекте, общий объем (и, соответственно, стоимость) «п» плотин, высотой H_i , суммарная высота которых равна H_0 ($\sum H_i = H_0$), будет в n^2 раз меньше, чем объем и стоимость одной плотины высотой H_0 . Это может значительно удешевить все строительство каскада ГЭС с меньшими высотами плотин, так как по опыту стоимость плотины составляет порядка 60% общей стоимости гидроузла.

Еще более экономически выгодным является деривационный тип ГЭС, где вообще не требуется строительство напорных плотин, а суммарная стоимость строительства каскада ГЭС не зависит от числа ступеней в нем, так как в любом случае общая длина деривации будет одной и той же.

Приведенные выше выводы относительно выгодности строительства каскадов малых ГЭС вместо строительства одной крупной, рассматривали только непосредственные затраты на их строительство. В то же время общая стоимость строительства ГЭС включает в себя также дополнительные расходы на подготовительные и операционные работы, такие как отчуждение и благоустройство территории, создание необходимой инфраструктуры (дороги, энергоснабжение, экологические затраты и пр., а также эксплуатационные затраты), которые являются, в какой-то мере, постоянными, независящими от рассматриваемого количества и высоты плотин в каскаде и типа освоения гидроресурсов (плотинной или деривационной). С учетом этого, существует определенный предел, после которого уменьшение мощности отдельных ГЭС и увеличение ступеней каскада не имеет смысла. Детальные исследования и расчеты, выполненные при обосновании освоения гидропотенциала большого количества рек Таджикистана показали [13], что таким пределом является мощность ГЭС, равная 500 кВт. При сооружении ГЭС меньшей мощности, в ее стоимости начинают превалировать эксплуатационные затраты, и она резко возрастает (рис. 1).



Рис. 1. Удельная стоимость одного кВт установленной мощности МГЭС. (в ценах 1945 г.)

То же самое можно сказать и в отношении экологии гидроэнергетики. Снижение высоты плотин при каскадном освоении гидроресурсов рек, при одном и том энергетическом эффекте снижает их негативное влияние на окружающую среду [12]. А деривационные ГЭС, как показала практика проектирования и строительства, вообще не оказывают на нее никакого влияния.

Каскадное освоение гидроресурсов рек с помощью плотинных и деривационных ГЭС также существенно различаются с точки зрения эффективности полного освоения водных ресурсов. Для того, чтобы показать это рассмотрим упрощенную схему реки длиной L , и общим напором H , равномерно возрастающим по ее длине:

$$H_x = \frac{H}{L} * x, \quad (1)$$

где:

H_x – напор от устья до точки x ($0 \leq x \leq L$), м.,

H – полный напор, от устья до истока реки, м.,

x – расстояние по горизонтали от устья реки. км

Пусть в этом примере расход воды вниз по течению возрастает по зависимости:

$$Q_x = Q_0 + q * x, \quad (2)$$

где:

Q_x – расход воды в реке на расстоянии x от притока, м³/с

Q_0 – расход воды в реке в ее притоке, м³/с

q – удельный приток воды в реке по ее длине (на единицу длины). м³/с*км.

Для такой упрощенной схемы общая мощность «n» ГЭС при плотинном и деривационном вариантах, N , будут, соответственно равны [14]:

$$N_{\text{плотин}} = 9.81\eta \frac{H}{n} \sum_{i=1}^n \left(Q_0 + q \frac{i}{n} L \right) = 9.81\eta \left(Q_0 + \frac{n+1}{2n} q * L \right) * H \quad (3)$$

$$N_{\text{дерив}} = 9.81\eta \frac{H}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \left(Q_0 + q \frac{i}{n} L \right) = 9.81\eta \left(Q_0 + \frac{n-1}{2n} q * L \right) * H, \quad (4)$$

где:

N – мощность ГЭС, кВт.

η – к. п. д. ГЭС

Функция:

$$f_1(n) = (n+1)/2n \quad (5)$$

является убывающей в то время, как функция:

$$f_2(n) = (n-1)/2n \quad (6)$$

является возрастающей (рис. 2). Поэтому при плотинных ГЭС увеличение степеней каскада (количества ГЭС), как показано выше, снижает общую стоимость строительства всех «n» плотин и, соответственно, ГЭС, в то же время снижает и эффективность освоения водных ресурсов (общую мощность всех ГЭС и их выработку электроэнергии).

В отличие от этого, для деривационных ГЭС увеличение степеней каскада, наоборот, повышает эффективность освоения водных ресурсов.

Но при этом функции $f_1(n)$ и $f_2(n)$ имеют одну и ту же асимптоту:

$$f_1(n \rightarrow \infty) = f_2(n \rightarrow \infty) = 0.5,$$

к которой они приближаются, практически уже при значении «n» равном 20.

В общем случае, при разделении реки на ступени и строительстве на реке каскадов с большим количеством ГЭС, степень освоения притока воды в реке сверх Q_0 , не может быть более 50%.



Рис. 2. Зависимость функций f_1 и f_2 от количества ступеней ГЭС: деривационная ГЭС (1) и плотинная ГЭС (2).

В качестве примера рассмотрим тот же упрощенный вариант реки с конкретными значениями параметров:

$$Q_0 = 100 \text{ м}^3/\text{с}, L = 100 \text{ км.}, H = 200 \text{ м.}, q = 5 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{км}, \eta = 0,9.$$

Теоретически возможный гидроэнергетический потенциал реки в этом случае будет равен (формула (5) при «n» = 1):

$$N_{\max} = 9.81 \cdot 0.9 \cdot (100 + 5 \cdot 100) \cdot 200 = 1059.48 \text{ млн. кВт.}$$

В то же время максимально возможная мощность каскада деривационных ГЭС (формула (6) при «n» $\rightarrow \infty$):

$$N_{\max, \text{дерив}} = 9.81 \cdot 0.9 \cdot (100 + 0.5 \cdot 5 \cdot 100) \cdot 200 = 618.03 \text{ тыс. кВт.}$$

Таблица 2

Характеристики р. Каратаг

Падение, м	Длина, км	Уклон	Q _{ср} , м ³ /с	N, тыс. кВт	W _{ср} , млн. кВт.ч
			0		
1416	8.5	0.1667	1.8	12.75	111.7
334	7.6	0.0439	6.09	19.93	174.59
94	2	0.047	8.65	7.97	69.82
263.3	8.5	0.031	13.1	33.8	296.09
448.7	11.4	0.0394	18.24	80.25	702.99
314	21.1	0.0149	22.75	70.1	614.08
140	22.9	0.0061	24.03	33.13	290.02
3010	82	0.0367	24.37	257.93	2259.29

Главные притоки р. Каратаг

№	Наименование	Расстояние от истока, км	Ср. расход, Q , м ³ /с
1	Диахан-Дара	74.2	3.68
2	Джальгин	65.9	1.94
3	Пайран	63.9	5.00
4	Сарбан	55.4	1.79
5	Сабургон	39.0	1.38
6	Ак-Джар	22.9	0.49
7	Ширкент	82.00	9.22

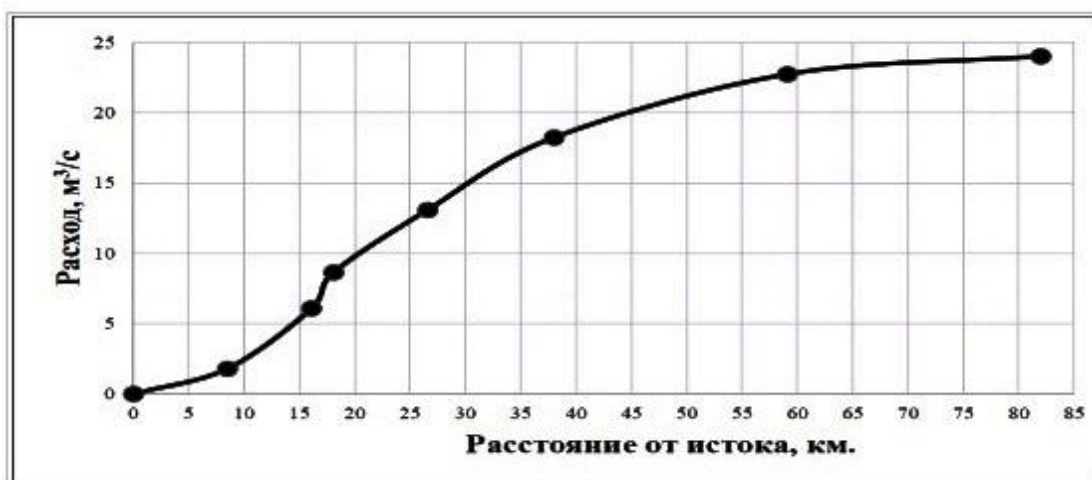
Рис. 3. Расходная характеристика р. Каратаг-дарья, $Q = f(L)$ 

Рис. 4. Продольный профиль р. Каратаг-дарья

В качестве конкретного примера влияния всех этих факторов, рассмотрим конкретный пример – реку Каратаг, характеристики которой показаны на рис. 3 и 4 и в табл. 2 и 3 [15-16].

Расчеты, выполненные с использованием этих данных (рис. 5.) хорошо подтверждают полученные выводы – суммарная мощность каскада деривационных ГЭС возрастает, а суммарная мощность плотинных ГЭС уменьшается с ростом количества ГЭС в каскаде. При этом и та и другая с увеличением количества ГЭС в каскаде, «n» стремятся к одной и той же асимптоте.

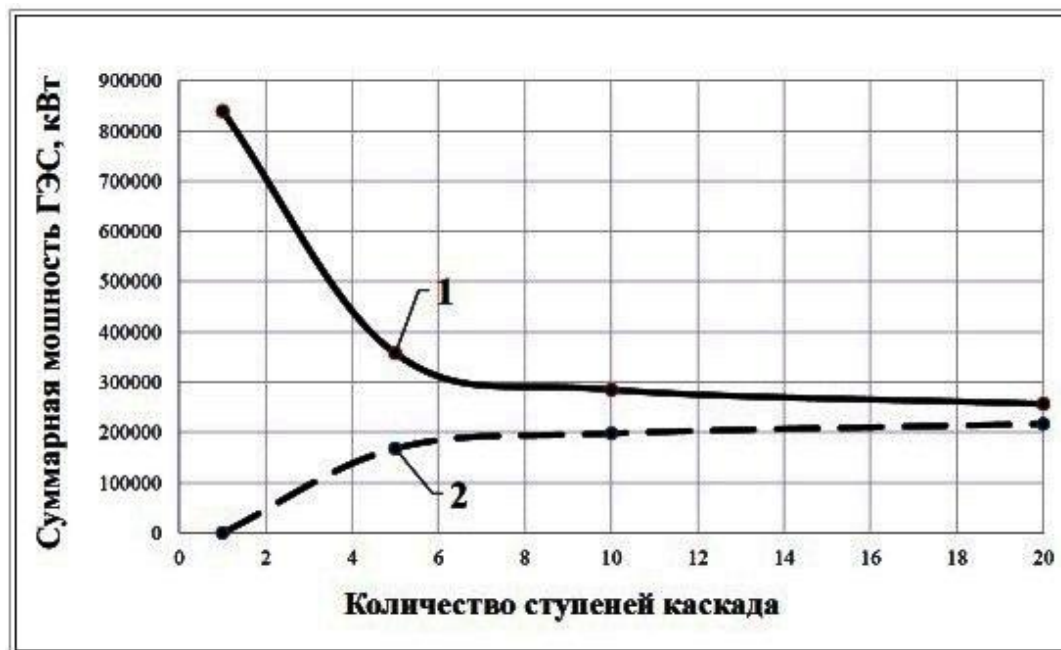


Рис. 5. Река Каратаг. Суммарная мощность каскада ГЭС при плотинном (1) и деривационном (2) освоении гидроресурсов.

Это показывает, что с учетом экологических критериев и социально-экономических условий наиболее выгодным вариантом освоение гидроресурсов р. Каратаг является последовательное строительство на ней каскада деривационных ГЭС малой и средней мощности. Если при этом возникнет необходимость регулирования водного стока для более надежного круглогодичного обеспечения потребителей электроэнергией, то возможен компромиссный вариант: строительство в верхнем течении р. Каратаг регулирующего водохранилища и возведение деривационных МГЭС на остальной части реки.

Таким образом выполнен анализ эффективности использования гидроэнергоресурсов рек путем строительства каскадов ГЭС. Показано, что с экономической точки зрения, наиболее выгодным (дешёвым) вариантом является строительство деривационного каскада ГЭС. При каскаде ГЭС с плотинами их экономическая эффективность повышается с уменьшением высоты плотин и увеличением количества ГЭС в каскаде. С экологической точки зрения наименьшее негативное влияние на окружающую среду (затопление и

подтопление территорий, переработка берегов и пр.) оказывают деривационные ГЭС и малые ГЭС с низконапорными плотинами. Исходя из критерия технической эффективности, то есть максимального освоения возможного гидропотенциала реки - наиболее выгодным вариантом является строительство высоких плотин, а наименее эффективным – деривационные ГЭС. При этом степень технической эффективности деривационных ГЭС растет при увеличении количества ступеней в каскаде. С учетом того, что в современных условиях основной задачей социально-экономического развития Таджикистана является не максимально полное освоение всего гидропотенциала рек, а полное и надежное энергообеспечение потребителей в ближайшей перспективе и с наименьшими затратами, при минимальном негативном воздействии на окружающую среду, наиболее эффективным вариантом освоения гидроресурсов реки Каратаг является последовательное строительство на ней деривационных ГЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс]-Режим доступа:<http://fakty-o.ru/derivacionnye-ges-pisanie-princip-raboty-gde-ispol-zuyutsya>.
2. Бадаев А.В., Доржиев В.В. Использование микро-ГЭС деривационного типа для электроснабжения отдаленных населенных пунктов. – «Молодой учёный» . 2019, № 24, с. 124-127.
3. Каров В.Г. Речная деривационная гидроэлектростанция. Патент РФ, RU 2023201, 1994.
4. Петров Г.Н., Ахмедов Х.М., Кабутов К., Каримов Х.С. Возможности использования возобновляемых источников энергии в Таджикистане. – Изв.АН РТ. Отд. физ-мат., хим., геол. и техн.наук, 2009, № 4, с. 117-124.
5. Петров Г.Н., Ахмедов Х.М., Кабутов К., Каримов Х.С.. Ресурсы ВИЭ в Таджикистане. – Изв.АН РТ. Отд. физ-мат., хим., геол. и техн.наук, 2009, № 3, с. 82-91.
6. Петров Г.Н., Ахмедов Х.М., Кабутов К., Каримов Х.С. Общая оценка энергетики в мире и Таджикистане. – Изв АН РТ. Отд физ-мат, хим, геол. и техн наук, № 2 (135), 2009.
7. Петров Г.Н., Ахмедов Х.М. Развитие гидроэнергетики и защита окружающей среды. – Изв.АН РТ. Отде.физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. 2011, № 2, с. 138-143.
8. Азим Иброхим., Петров Г.Н., Леонидова Н.В. Промышленное использование малой гидроэнергетики в Таджикистане. Горный журнал. Специальный выпуск. – М., 2004, с. 40-42.
9. Петров Г.Н., Ахмедов Х.М. Малая гидроэнергетика Таджикистана. – Душанбе: Дониш, 2010, 148 с.
10. Петров Г.Н., Ахмедов Х.М., Каримов Х.С. Малая гидроэнергетика и возможности использования мини- и микро-ГЭС в горных территориях Таджикистана. – Изв.АН РТ. Отд. физ-мат., хим., геол. и техн. наук, 2010, № 1, с. 100-109.
11. Рассказов Л.Н., Орлов В.Г. и др. Гидротехнические сооружения. ч. 1. – М.: АСБ, 2008, 576 с.
12. Петров Г.Н., Ахмедов Х.М. Стратегия развития и пути повышения эффективности энергетики Таджикистана. Душанбе: Дониш, 2017, 357 с.
13. «Схема использования гидроэнергетических ресурсов малых водотоков для электрификации сельского хозяйства Таджикской ССР» СредАзгидроэнергопроект. 1950.
14. Петров Г.Н. Использование методов подобия для оптимизации параметров и размещения каскадов ГЭС. Всероссийская научно-практическая конференция «Синтез науки и общества в решении глобальных проблем современности», – Пермь, 30 апреля 2019, с. 123-128.

15. Абдуллаева Ф. С., Баканин Г.В. и др. Гидроэнергетические ресурсы Таджикской ССР. – Ленинград: «Недра», 1965, 658 с.
16. Могиленко А.В. Энергоэффективность в энергетических рейтингах: применяемые критерии. – Энергоресурсосбережение и энергоэффективность, 2018, № 5, с. 16-22.

Г.Н.ПЕТРОВ, Ҳ.М.АХМЕДОВ, М.ИЛОЛОВ, С.РАСУЛОВ, А.С.КОДИРОВ,
Ҷ.Ш.РАҲМАТОВ

СХЕМАИ АЗХУДКУНИИ ЭНЕРГЕТИКИИ ЗАХИРАҶОИ ОБИ ДАРӢИ ҚАРАТОҒ

*Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои нави
Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон*

Таҳлили дар мақола иҷрошудаи самаранокии истифодаи захираҳои гидроэнергетикии дарёҳо бо роҳи сохтани каскадҳои НБО нишон медиҳад, ки аз нуқтаи назари иқтисодӣ варианти бештар ғоидаовар (арзон) – ин сохтани каскади дериватсионии НБО мебошад. Аз нуқтаи назари экологӣ, НБО-ҳои дериватсионӣ ва НБО-ҳои хурд бо сарбандҳои пастфишор ба муҳити зист (зернобмонӣ ва обпахшкунӣ ҳудуд, тағйирёбии соҳилҳо) таъсири манфии камтарин мерасонанд. Бо назардошти он, ки дар шароити имрӯза вазифаи асосии рушди иҷтимоию иқтисодии Тоҷикистон на азхуҷкунии зиёди ҳамаи нерӯи оби дарёҳо, балки дар ояндаи наздик таъмини пурра ва боэътимоди истеъмолкунандагон бо хароҷоти камтарин ва таъсири манфии камтарин ба муҳити зист мебошад, варианти самараноктари азхуҷкунии захираҳои оби дарёи Қаратоғ сохтмони пайдарпайи НБО-ҳои дериватсионӣ дар он мебошад.

Калимаҳои калидӣ: манбаҳои барқароршавандаи энергия, гидроэнергия, НБО бо сарбандҳо, НБО-ҳои дериватсионӣ, каскадҳои НБО, меъёрҳои самаранокӣ, меъёрҳои техникии самаранокӣ, энергетикаи аз нигоҳи экологӣ тоза, меъёрҳои энергетикӣ самаранокӣ, меъёрҳои экологии самаранокӣ.

G.N.PETROV, H.M.AKHMEDOV, M.ILOLOV, S.RASULOV, A.S.KODIROV,
J.Sh.RAHMATOV

SCHEME OF ENERGY DEVELOPMENT OF WATER RESOURCES OF THE KARATAG RIVER

*Center of Innovative Development of Science and New Technologies
Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*

The analysis of the efficiency of the use of river hydropower resources through the construction of cascades of hydropower plants shows that the most economically viable (cheap) option is the construction of a diversion cascade of hydropower plants. From an environmental point of view, derivation hydropower plants and small hydropower plants with low-pressure

dams have the least negative impact on the environment (flooding and flooding of the territory, change of shores). Given that in today's conditions the main task of socio-economic development of Tajikistan is not the large-scale utilization of all river water resources, but in the near future the full and reliable provision of consumers at the lowest cost and minimal negative impact on the environment, more efficient development of water resources successive construction of derivation hydropower plants.

Key words: renewable energy sources, hydropower, hydroelectric power plants with dams, derivation hydroelectric power plants, cascades of hydroelectric power plants, efficiency criteria, technical efficiency criterion, clean energy, economic efficiency criterion, environmental efficiency criterion.