

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

УДК 627.8.07: 330.131.52

М. И. БАЛЬЗАННИКОВ, д-р техн. наук, проф.

АНАЛИЗ ОБОСНОВАННОСТИ ПРИНЯТЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С СОВРЕМЕННЫХ ПОЗИЦИЙ

ФГАО УВО «Самарский государственный экономический университет»

Россия, 443090, г. Самара, ул. Советской Армии, 141.

Тел.: 9276922220; эл. почта: mibsgasu@mail.ru

Ключевые слова: гидроэлектростанция, проточный тракт, отсасывающая труба, затраты на строительство, обоснование параметров.

На примере Волжских ГЭС проанализирована обоснованность решений при назначении геометрических размеров отсасывающих труб с современных позиций. При этом учитывались не только затраты на строительство, но и потери в период эксплуатации ГЭС. Выполненный анализ показал, что оптимальные размеры отсасывающих труб соответствуют большим размерам. Получены зависимости величины экономически оправданного увеличения длины отсасывающих труб ГЭС. Более длинные отсасывающие трубы рекомендуется применять для ГЭС, работающих в полупиковой или базисной зоне графика нагрузки энергосистемы. Результаты исследований могут быть использованы для обоснования размеров отсасывающих труб при реконструкции эксплуатируемых ГЭС.

Мощные гидроэлектростанции требуют значительных финансовых вложений на строительство, особенно если они возводятся на равнинных реках. Затраты обусловлены большими габаритами водопроводящего тракта. Для экономии финансовых затрат и расхода строительных материалов геометрические размеры водопроводящих крупногабаритных частей здания ГЭС были приняты минимально возможными. Таким образом технические решения обосновывались наименьшими капитальными вложениями.

Гидроэлектростанции (ГЭС) в нашей стране покрывают значительную часть потребности регионов в электроэнергии, а также, благодаря высоким маневренным качествам, устойчивое функционирование энергетических систем [1-3]. Вместе с тем мощные ГЭС требуют значительных финансовых вложений на строительство, особенно если они возводятся на равнинных реках [4, 5]. Затраты обусловлены значительными объемами строительных работ и использованием природных ресурсов: грунта, песка, щебня, камня, а также дорогостоящих изделий с использованием стали (арматура, закладные элементы, металлические конструкции) и цемента (укладка в конструкцию монолитного бетона, изготовление сборных железобетонных элементов и т. п.

На реке Волге в тяжелое для страны время были построены самые мощные для того времени гидроэлектростанции – Куйбышевская (1957 г.) и Волгоградская (1961 г.) мощностью соответственно 2300 и 2540 МВт. Станции были оборудованы самыми большими для того времени турбинами диаметром 9,3 м. Для крупнейших гидроагрегатов потребовалось построить весьма



крупногабаритные бетонные водоводы: водоприемники, турбинные камеры и отводящие (отсасывающие) трубы, которые и определили общие очень большие размеры агрегатного здания ГЭС [6].

Для экономии расхода дорогостоящих строительных материалов геометрические размеры водопроводящих крупногабаритных частей здания ГЭС были приняты минимально возможными, допускаемые требованиями завода-изготовителя гидравлических турбин. Это свидетельствует о том, что технические решения при строительстве рассматриваемых гидроэнергетических объектов обосновывались простейшим критерием – обеспечением минимума капитальных вложений.

Вместе с тем для гидроэнергетических объектов необходимо учитывать как единовременные затраты на этапе проектирования и строительства, так и распределенные во времени расходы при их эксплуатации. При этом в последние, в процессе обоснования геометрических параметров конструкций элементов станции, следует включать как расходы по самой станции и сопряженным объектам, так и расходы, связанные с компенсацией потерь в выработке электроэнергии [7–9].

Так, уменьшение габаритов элементов проточного тракта ГЭС, обуславливающее снижение единовременных затрат, приводит к увеличению скорости потока в них и существенно ухудшает гидравлические условия течения потока воды. Вследствие этого фактора повышаются потери напора водного потока на этом участке тракта и уменьшается выработка электроэнергии, т. е. снижается объем передачи потребителям важнейшего ресурса – электроэнергии, ради которого и строится гидроэлектростанция. Таким образом, при назначении размеров крупногабаритных элементов водопроводящего тракта ГЭС необходимо учитывать эти разнонаправленно проявляющиеся факторы влияния и использовать технико-экономическое сравнение возможных вариантов [10].

Целью настоящих исследований является анализ обоснованности назначения основных размеров одного из наиболее ответственных крупногабаритных элементов водопроводящего тракта ГЭС руслового типа – отсасывающих (отводящих) труб – с точки зрения современных технических и экономических условий.

Исследования выполнены для гидроэлектростанции руслового типа с параметрами, близкими к параметрам ГЭС, построенных на реке Волге на нескальных грунтах. Агрегатные здания этих ГЭС оборудованы вертикальными гидравлическими турбинами большого диаметра. Отсасывающие трубы этих мощных гидроагрегатов выполнены в виде коленчатых устройств. Такая форма, по сравнению с осевыми вертикальными отсасывающими трубами, обеспечивает меньшее заглубление фундамента агрегатного здания и меньшие объемы строительных работ при его возведении. Минимальный размер вертикальной части отсасывающей трубы регламентируется требованиями завода-изготовителя гидравлических турбин. Именно такие минимальные размеры и приняты на Волжских ГЭС [11].

Длина диффузорной (расширяющейся в вертикальной плоскости) части отсасывающей трубы не оказывает влияния на заглубление агрегатного здания, но влияет на объем используемого бетона и объем выемки грунта для укладки бетона. С целью экономии строительного ресурса (в первую очередь бетона) длину отсасывающей трубы в период строительства также принимали по



возможности наименьшей. Ниже приводятся исследования целесообразности такого решения с точки зрения современных условий.

Начальные параметры исследованных вариантов геометрических размеров отсасывающей трубы близки к принятым параметрам крупнейших ГЭС на реке Волге. Основные из них приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные начальные параметры ГЭС и отсасывающей трубы

Номер	Параметр	Величина
1	Мощность гидравлического агрегата ГЭС, тыс. кВт	120
2	Напор, м	24
3	Диаметр гидравлической турбины, м	8,2
4	Расчетный расход воды, м ³ /с	560
5	Начальная относительная длина отсасывающей трубы (по отношению к диаметру турбины)	3,5

В выполненных расчетах рассматривались варианты отсасывающей трубы с дискретным увеличением ее длины в сторону нижнего бьефа на величину ΔL . Для каждого варианта подсчитывалось, на сколько увеличиваются затраты на строительные ресурсы в денежном выражении ΔP по формуле:

$$\Delta P = \sum c_i W_i + \sum s_i W_i, \quad (1)$$

где c_i – стоимость единицы i -го строительного ресурса (бетон, грунт); s_i – затраты на выполнение работ по i -му ресурсу, W_i – объем i -го строительного ресурса.

При увеличении длины диффузорной части отсасывающих труб увеличиваются высоты и площади их выходных сечений. Тогда средние скорости водного потока в выходных сечениях уменьшаются, а, следовательно, уменьшаются и потери скоростного напора на величину Δh [11]:

$$\Delta h = \left(\frac{\alpha V^2}{2g} - \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right), \quad (2)$$

где α – коэффициент неравномерности скорости водного потока; V и V_1 – средние скорости потока в выходных сечениях начального варианта и варианта с удлинением диффузорным участком; g – ускорение свободного падения.

Для каждого варианта определялись также величины дополнительной мощности ΔN и дополнительной выработки электроэнергии ΔE , дополнительного дохода ΔD от реализации дополнительной электроэнергии.

Получение дополнительного дохода обеспечивается в течение ряда лет T эксплуатации ГЭС. Для корректного сравнения дополнительного дохода с дополнительными расходами первые приводились к начальному году с учетом коэффициента дисконтирования:

$$\Delta D = \sum_{t=0}^T \Delta D_t (1 + R)^{-t}, \quad (3)$$

где ΔD_t – величина дополнительного дохода в год t ; T – рассматриваемый расчетный период времени; t – текущий год; R – величина дисконтной ставки.

Диапазоны варьируемых параметров при исследовании влияния длины отсасывающей трубы приведены в табл. 2.

Аналитические расчеты проводились с использованием вычислительных средств, а результаты представлялись в графическом виде. На рис. 1



представлены полученные зависимости дополнительных затрат на строительные ресурсы для разных значений цены на бетон.

Таблица 2

Изменяемые параметры

Номер	Параметр	Величина
1	Увеличение длины отсасывающей трубы, м	от 0 до 24
2	Число часов использования установленной мощности в год, ч	от 1000 до 7000
3	Тариф на электроэнергию, руб./кВт-ч	от 3,4 до 4,8
	Динамика тарифа на электроэнергию, % в год	от 0 до 10
4	Дополнительные единичные затраты на строительные работы, тыс. руб./м ³	от 6 до 12
5	Дисконтная ставка, %	от 2 до 8
6	Период расчета, лет	от 5 до 20

Исследования показали, что значения дополнительных затрат не зависят от такого важного параметра, как число часов использования установленной мощности, и определяются непосредственно параметрами ΔL и c_i .

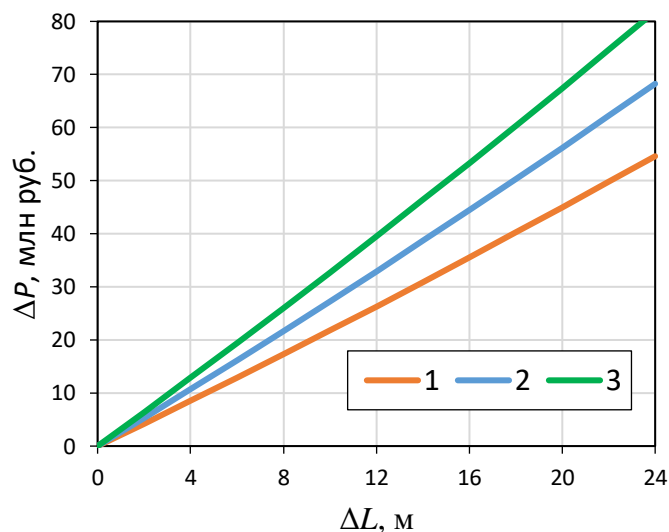


Рис. 1. Рост дополнительных затрат при увеличении длины отсасывающей трубы для параметров: 1 – $c_i = 8\ 000$ руб., 2 – $c_i = 10\ 000$ руб., 3 – $c_i = 12\ 000$ руб.

На рис. 2 приведены результаты расчетов зависимости дополнительного годового дохода ГЭС при увеличении длины отсасывающей трубы для разных значений T_N . Графики свидетельствуют, что величина ΔD существенно зависит от режима работы ГЭС при покрытии суточного графика нагрузки энергосистемы – числа часов использования мощности. Причем с увеличением числа T_N увеличивается и ΔD .

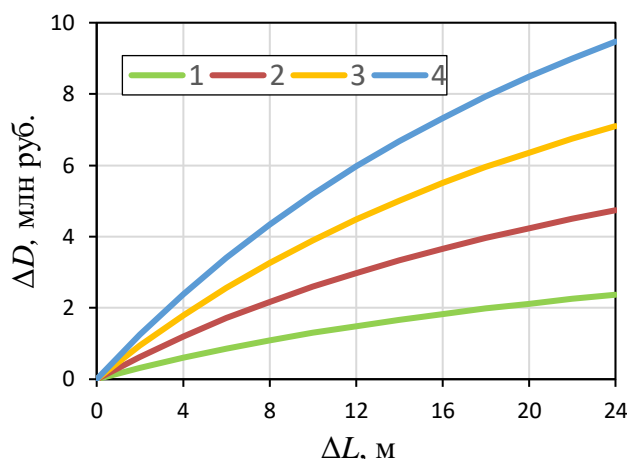


Рис. 2. Рост дополнительного годового дохода при увеличении длины отсасывающей трубы для параметров: 1 – $T_N = 1\ 000$ ч; 2 – $T_N = 2\ 000$ ч; 3 – $T_N = 3\ 000$ ч; 4 – $T_N = 4\ 000$ ч

Пример зависимости разности дисконтированного дохода и дополнительных затрат (экономического эффекта) на строительство приведены на рис. 3. Зависимости представлены за период $T = 10$ лет для разных параметров T_N при ставке дисконтирования $R = 6\ %$.

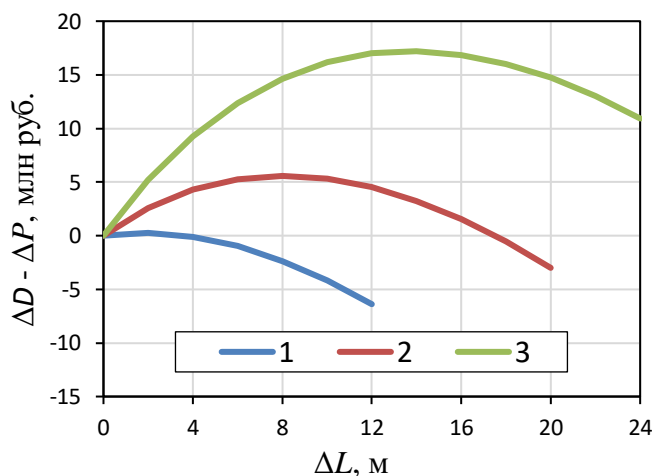


Рис. 3. Разностная кривая дисконтированного дохода и дополнительных затрат на строительство за период $T = 10$ лет при увеличении длины отсасывающей трубы для параметров: 1 – $T_N = 2\ 000$ ч; 2 – $T_N = 3\ 000$ ч; 3 – $T_N = 4\ 000$ ч

Полученные зависимости показывают, что в рассмотренных диапазонах варьируемых параметров увеличение горизонтального участка отсасывающей трубы ГЭС приводит сначала к увеличению экономического эффекта. Но при дальнейшем увеличении этого участка трубы экономический эффект уменьшается.

Полученные данные свидетельствуют также о том, что при малых значениях числа часов использования мощности ГЭС (что характерно для ГЭС, работающих в пиковой части суточного графика нагрузки энергосистемы) увеличение длины



отсасывающей трубы практически не дает общего экономического эффекта. Однако для ГЭС, работающих в полупиковой и базисной зоне суточного графика нагрузки, увеличение длины отсасывающей трубы может обеспечить получение значительного эффекта. Так, при $T_N = 3\ 000$ ч для рассмотренных параметров ГЭС увеличение трубы экономически оправдано для всего диапазона ΔL от 0 до 17,4 м. Максимальный эффект в размере 5,5 млн руб. может быть получен при $\Delta L = 8,0$ м. Эту величину можно считать оптимальной величиной варьируемого параметра – длины отсасывающей трубы.

Таким образом, исходя из современных представлений, можно заключить, что принятые технические решения по мощным Волжским ГЭС (в частности, габаритные размеры отсасывающих труб) не отвечают условиям оптимальности. Выполненный анализ подтвердил, что решения принимались по условию минимума капитальных вложений, а не минимума суммарных затрат. Некоторое увеличение длины отсасывающей трубы обеспечит получение дополнительной выработки электроэнергии и дополнительного дохода.

Полученные результаты имеют важное значение для правильного выбора основных геометрических параметров крупногабаритных элементов проточного тракта и могут быть использованы при обосновании размеров отсасывающих труб, проектируемых и реконструируемых ГЭС.

Выводы:

1. Для мощных гидроэлектростанций руслового типа с коленчатыми отсасывающими трубами, построенных в нашей стране в послевоенные годы прошлого столетия, габаритные размеры водопроводящего тракта определялись исходя из критерия – обеспечения минимума капитальных вложений. Этот подход обеспечивал также минимальные размеры всего агрегатного здания, минимум расходуемых строительных материалов, наименьшие трудозатраты на ведение строительных работ и сокращение времени возведения ГЭС, а также более ранние сроки ввода электростанции в эксплуатацию и получение так необходимой электроэнергии. Вместе с тем с современных позиций такой критерий не обеспечивал выбор оптимальных размеров водопроводящего тракта, так как некоторое увеличение его габаритов, в частности длины отсасывающей трубы, могло бы дать дополнительный доход от реализации дополнительно вырабатываемой электроэнергии, который бы превысил дополнительные затраты.

2. Экономический эффект, который может быть получен при использовании удлиненной отсасывающей трубы, в значительной степени зависит от условий работы ГЭС в энергосистеме. А именно: чем больше число часов использования мощности, тем больше и эффект. Таким образом, удлиненные отсасывающие трубы рекомендуется применять для ГЭС, работающих в полупиковой или базисной зоне графика нагрузки энергосистемы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юркевич, Б. Н. Гидроэнергетика как составная часть экономического потенциала России / Б. Н. Юркевич. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2017. – № 3. – С. 10–13.

2. Использование маневренных свойств ГЭС и ГАЭС в энергосистеме с возобновляемыми источниками энергии / Ю. С. Васильев, В. В. Елистратов, И. Г. Кудряшева. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 4. – С. 14–20.



3. Ресурсы и технологии использования возобновляемых источников энергии / В. В. Елистратов, И. В. Богун, Р. С. Денисов [и др.]. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 528 с. – Текст : непосредственный.
4. Бурдин, Е. А. Волжский каскад ГЭС: триумф и трагедия России / Е. А. Бурдин. – Москва : РОССПЭН, 2011. – 398 с. – ISBN 978-5-8243-1564-6. – Текст : непосредственный.
5. Бальзанников, М. И. Обоснование установленной мощности ГЭС энергетического гидроузла / М. И. Бальзанников. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 8. – С. 32–40.
6. Козинец, Г. Л. Обоснование проектных параметров гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС / Г. Л. Козинец. – Текст : непосредственный // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 13–14. – С. 26–30.
7. Васильев, Ю. С. О технологии проектирования объектов гидроэнергетики / Ю. С. Васильев, Л. И. Кубышкин. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 7. – С. 2–8.
8. Васильев, Ю. С. Методика обоснования параметров малых гидроэлектростанций / Ю. С. Васильев, Г. И. Сидоренко, В. В. Фролов. – Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2012. – № 1-1 (147). – С. 76–84.
9. Обоснование параметров и эффективности гидроаккумулирующих станций / Ю. С. Васильев, В. В. Листратов, Л. И. Кубышкин, И. Г. Кудряшева. – Текст : непосредственный // Труды СПбГТУ. – 2007. – № 502. – С. 146–154.
10. Бальзанников, М. И. Обоснование основных параметров отсасывающих труб гидроэлектростанций / М. И. Бальзанников. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2015. – № 9. – С. 111–121.
11. Бальзанников, М. И. Влияние условий эксплуатации гидроэлектростанций на выбор основных параметров отсасывающих труб / М. И. Бальзанников. – Текст : непосредственный // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2015. – № 4. – С. 86–92.

BALZANNIKOV Mikhail Ivanovich, doctor of technical sciences, professor

ANALYSIS OF THE VALIDITY OF THE ADOPTED TECHNICAL SOLUTIONS DURING THE CONSTRUCTION OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS FROM MODERN POSITIONS

Samara State University of Economics

141, Sovetskaya Armiya St., Samara, Russia, 443090, Samara, Russia. Tel.: 9276922220;

e-mail: mibsgasu@mail.ru

Key words: hydroelectric power stations, flow path, suction pipe, construction costs, parameters justification.

By the example of the Volga HPPs, the validity of decisions when assigning geometric dimensions of suction pipes from modern positions was analyzed. By doing this, not only construction costs were taken into account, but also losses during the operation of the hydroelectric power station. The analysis showed that the optimal dimensions of the suction pipes correspond to large dimensions. Dependencies of the value of the economically justified increase in the length of the suction pipes of the hydroelectric power station were obtained. It is recommended to use longer suction pipes for HPPs operating in the half-pipe or base zone of the power system load schedule. The results of studies can be used to justify the size of suction pipes during the reconstruction of operated hydroelectric power plants.



REFERENCES

1. Yurkevich B. N. Gidroenergetika kak sostavnaya chast ekonomicheskogo potentsiala Rossii [Hydropower as an integral part of Russia's economic potential]. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo* [Power Technology and Engineering]. 2017, № 3. P. 10–13.
2. Vasilev Yu. S., Elistratov V. V., Kudryasheva I. G. Ispolzovanie manevrennykh svoystv GES i GAES v energosisteme s vobnovlyaemyimi istochnikami energii [Use of maneuvering properties of hydroelectric power plants and PSP in the power system with renewable energy sources]. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo* [Power Technology and Engineering]. 2019, № 4. P. 14-20.
3. Elistratov V. V., Bogun I. V., Denisov R. S., et al. Resursy i tekhnologii ispolzovaniya vobnovlyaemykh istochnikov energii [Resources and technologies for using renewable energy sources]. Saint-Petersburg, POLITEKH-PRESS, 2022, 528 p.
4. Burdin E. A. Volzhskiy kaskad GES: triumf i tragediya Rossii [Volzhsky cascade of hydroelectric power plants: the triumph and tragedy of Russia]. Moscow : ROSSPEN, 2011, 398 p. – ISBN 978-5-8243-1564-6.
5. Balzannikov M. I. Obosnovanie ustanovlennoy moschnosti GES energeticheskogo gidrouzla [Justification of the rated capacity of the hydroelectric power station of the energy hydroelectric complex]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo* [News of higher educational institutions. Construction]. 2014, № 8. P. 32–40.
6. Kozinets G. L. Obosnovanie proektnykh parametrov gidroagregatnykh blokov vysokonapornykh GES [Substantiation of design parameters of hydraulic unit blocks of high-pressure hydroelectric power plants]. *Alternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy and ecology]. 2015, № 13-14. P. 26–30.
7. Vasilev Yu. S., Kubyshkin L. I. O tekhnologii proektirovaniya obektov gidroenergetiki [On the technology of designing hydropower facilities]. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo* [Power Technology and Engineering]. 2014, № 7. P. 2–8.
8. Vasilev Yu. S., Sidorenko G. I., Frolov V. V. Metodika obosnovaniya parametrov malyykh gidroelektrostantsiy [Methodology for justifying the parameters of small hydroelectric power plants]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gos. politekh. un-ta* [Scientific and technical statements of St. Petersburg State Polytechnic University]. 2012, № 1-1. P. 76–84.
9. Vasilev Yu. S., Elistratov V. V., Kubyshkin L. I., Kudryasheva I. G. Obosnovanie parametrov i effektivnosti gidroakkumuliruyuschikh stantsiy [Justification of parameters and efficiency of pumped storage stations]. *Trudy SPbGTU* [Proceedings of St. Petersburg State Technical University]. 2007, № 502. P. 146–154.
10. Balzannikov M. I. Obosnovanie osnovnykh parametrov otsasyvayuschikh trub gidroelektrostantsiy [Justification of the main parameters of suction pipes of hydroelectric power plants]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU]. 2015, № 9. P. 111–121.
11. Balzannikov M. I. Vliyaniye usloviy ekspluatatsii gidroelektrostantsiy na vybor osnovnykh parametrov otsasyvayuschikh trub [Influence of hydroelectric power plant operation conditions on selection of main parameters of suction pipes]. *Vestnik SGASU. Gradostroitelstvo i arkhitektura* [SGASU Bulletin. Urban planning and architecture]. 2015, № 4. P. 86-92.

© М. И. Бальзаников, 2023

Получено: 10.05.2023 г.