

Оригинальная статья

УДК 502/504::627.83:532.533.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-63-72

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СООРУЖЕНИЙ ГИДРОУЗЛОВ КОМПЛЕКСНОГО НАЗНАЧЕНИЯ СОВМЕСТНО С СОЛНЕЧНЫМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

ЧЕРНЫХ ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА^{✉1}, канд. техн. наук, профессор
gtsmgup@mail.ru

БУРЛАЧЕНКО АЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА², канд. техн. наук, доцент
chtara@mail.ru

ВОЛШАНИК ВАЛЕРИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ³, д-р техн. наук, профессор
tvg1806@gmail.com

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Москва, Тимирязевская, 49, Россия

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

Проанализированы перспективы использования солнечных электростанций в мировой природоохранной гидротехнике. Представлены рекомендации по конструктивному совмещению элементов сооружений природоохранных гидротехнических комплексов с солнечными фотоэлектрическими установками (СФЭУ). Рассмотрены варианты наиболее рационального их расположения на здании гидроэлектростанций (ГЭС) разного типа. Установлено, что в значительной мере большие конструктивных возможностей для совмещения здания ГЭС с СФЭУ представляют здания малых и средних гидроузлов. Определена взаимосвязь площади, пригодной для размещения солнечных элементов, с диаметром рабочего колеса турбины. С уменьшением диаметра рабочего колеса относительная площадь поверхностей, пригодных для размещения солнечных элементов, увеличивается. Отмечено, что наиболее целесообразно совмещать СФЭУ и малые ГЭС с русловыми не совмещенными зданиями с трансформаторами со стороны нижнего бьефа. На средних ГЭС различных типов условия совмещения примерно одинаковы. Результаты работы могут оказать влияние на получение надежной системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии, повышения безопасности ГЭС действующих гидроузлов в условиях увеличения эффективности внедрения «зеленых» технологий в энергетике при уменьшении загрязнения биосферы и выброса парниковых газов, в том числе на труднодоступных территориях сельскохозяйственных районов, где существуют проблемы с централизованным водоснабжением.

Ключевые слова: природоохранные гидроузлы, «зеленая» энергетика, солнечные фотоэлектрические установки, здание гидроэлектростанции, диаметр рабочего колеса, повышение технологичности использования возобновляемых источников энергии

Формат цитирования: Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Волшаник В.В. Особенности использования элементов сооружений гидроузлов комплексного назначения совместно с солнечными фотоэлектрическими установками // Природообустройство. – 2021. – № 1. – С. 63-72. DOI: 10.26897/1997-6011/2021-1-63-72.

© Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Волшаник В.В., 2021

Original article

FEATURES OF THE USE OF ELEMENTS OF INTEGRATED HYDROELECTRIC FACILITIES IN CONJUNCTION WITH SOLAR PHOTOVOLTAIC INSTALLATIONS

CHERNYH OLGA NIKOLAEVNA^{✉1}, candidate of technical sciences, professor
gtsmgup@mail.ru

BURLACHENKO ALENA VLADIMIROVNA², candidate of technical sciences, associate professor
chtara@mail.ru

VOLSHANIK VALERIJ VALENTINOVICH³, doctor of technical sciences, professor
tvgl806@gmail.com

¹ Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49. Russia

² Moscow automobile-road state technical university (MADI); 125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64

³ National research Moscow state university of civil engineering; 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26

The prospects for the use of solar power plants in the world of environmental hydraulic engineering are analyzed. Recommendations on the constructive combination of elements of structures of environmental hydro technical complexes with solar photovoltaic installations (SFEU) are presented. The variants of their most rational location on the building of hydroelectric power stations (GES) of different types are considered. It is established that the buildings of small and medium-sized hydroelectric power plants represent significantly more constructive possibilities for combining the GES building with the SFEU. The relationship between the area suitable for placing solar cells and the diameter of the turbine impeller is determined. With a decrease in the diameter of the impeller, the relative surface area suitable for placing solar cells increases. It is noted that it is most appropriate to combine SFEU and small hydroelectric power plants with non-combined buildings with transformers on the downstream side. At medium-sized hydroelectric power plants of various types, the conditions for combining are approximately the same. The results of the work can have an impact on obtaining a reliable power supply system based on renewable energy sources, improving the safety of the GTS (hydro technical structures) of existing hydroelectric facilities in the context of increasing the efficiency of the introduction of "green" technologies in the energy sector while reducing biosphere pollution and greenhouse gas emissions, including in hard-to-reach areas of agricultural areas where there are problems with centralized water supply.

Keywords: environmental hydroelectric facilities, "green" energy, solar photovoltaic installations, hydroelectric power station building, impeller diameter, increasing the technological efficiency of using renewable energy sources

Format of citation: Chernyh O.N., Burlachenko A.V., Volshanic V.V. Features of the use of elements of integrated hydroelectric structures in conjunction with solar photovoltaic installations // *Prirodoobustrojstvo*. – 2021. – № 1. – S. 63-72. DOI: 10.26897/1997-6011/2021-1-63-72.

Введение. Прогноз мирового энергопотребления указывает на его рост к 2050 г. более чем в два раза [1]. Сегодня потребности энергии обеспечиваются в основном за счет органических источников энергии, запасы которых ограничены. По оценкам ведущих российских специалистов, нефти может хватить на 40 лет, газа – на 60...70 лет, угля – более чем на 400 лет, но при этом возникает ряд стратегических и экологических проблем [2, 3]. Поэтому почти во всех странах мира наметилось радикальное сокращение использования ископаемых видов топлива (угля, нефти и газа) при условии роста доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – солнечной (СЭС) и ветряной (ВЭС), которая к 2050 г. должна достичь 80%.

Мощность «зеленой» энергетики (солнечных и ветровых электростанций) мира превысила 1 трлн ватт. ООН намерена собрать до 1 трлн долл., чтобы построить на континенте дополнительно до 1000 ГВт возобновляемых

источников энергии, так как, например, десятки миллионов африканцев до сих пор не имеют доступа к электроэнергии. Планируется, что за ближайшие 10 лет будет построено до 1 тыс. ГВт СЭС, причем 100 млн чел. будут подключены к электрической сети впервые. Так солнечная фотоэлектрическая установка (СФЭУ) с установленной мощностью более 10 ГВт станет защитой проекта «Великая зеленая стена» (рис. 1), в рамках которого были высажены миллионы деревьев, чтобы остановить разрастание пустыни Сахара и увеличить площадь земледелия ее юга.

Солнечная энергия обладает рядом важнейших достоинств. Она имеется повсюду, является неисчерпаемой и допускает использование по одной и той же форме на бесконечно долгий период времени. Одно из наиболее выгодных ее качеств заключается в минимальном неблагоприятном воздействии на окружающую среду. Количество солнечной энергии, достигающей нашей планеты за год,

превышает в 50 раз энергию, которую можно было бы извлечь из мировых разведанных

запасов горючих ископаемых, и в 300 тыс. раз – ежегодное потребление энергии.



а

б

Рис. 1. СЭС:

а – мощностью более 10 ГВт для южной части пустыни Сахары, где развивается земледелие;
б – на акватории водного объекта в префектуре Хиого, Япония,
Century Tokyo Leasing Corporation (СЭС – солнечная электростанция)

Fig. 1. SES:

a – capacity of more than 10 GW for the southern part
of the Sahara desert where agriculture is taking place;
b – on the water area of the water facility in Hiogo prefecture, Japan,
Century Tokyo Leasing Corporation (SES – solar power plant)

Расчеты показывают, что современные мировые энергетические потребности можно было бы обеспечить за счет солнечной энергии, ежегодно получаемой с площади 30 тыс. км², что составляет 0,005 земной поверхности. До настоящего времени этот потенциал не использовался в достаточной степени, за исключением только примерно 1%. Тем не менее в ближайшем будущем ожидается увеличение спроса на солнечные фотоэлектрические и солнечные водонагреватели, особенно в странах третьего мира (Танзания, Кения, Камерун, Зимбабве и др.). Например, в Камеруне на р. Санага построен каскад ГЭС и эксплуатируется ряд более мелких ГЭС, в Зимбабве построено много плотин на притоках р. Замбези – в основном в целях орошения и водоснабжения.

Лидерами по внедрению СЭС являются Китай (более 55 ГВт), США (13 ГВт), Индия (19 ГВт), Япония (6 ГВт). В Германии 1/3 энергетики является «зеленой». Швеция поставила цель полностью перейти на ВИЭ к 2030 г., но уже в 2020 г. практически приблизилась к этой цифре. В России же пока от всей вырабатываемой энергии лишь 0,05% приходится на долю солнца и 0,01% – на долю ветра. В России наиболее перспективными для строительства СЭС (помимо очевидных областей Краснодар, Ростова, Волгограда, Ставрополя, Астрахани) признаны

Калмыкия, Магадан, Чита, Алтай, Забайкалье, Приморье и Бурятия [4, 7]. В России годовое количество солнечной энергии на 1 м² равно: в Санкт-Петербурге – 5266 МДж/(м².г), в Москве – 56697 МДж/(м².г); в Волгограде – 6587 МДж/(м².г). Потенциал солнечной энергии, поступающей на территорию России только за три дня, превышает энергию всего годового производства электричества в стране [5, 6]. С помощью гелиотехнических устройств может быть использовано 10...50% этой энергии. Сегодня созданы солнечные батареи с КПД, равным 30...35%, в ближайшем будущем это будет 40...45%, через 20-30 лет данный тип энергетики станет сравнимым с другими видами энергии. Его применение решает вопрос о сохранении природных богатств и повышении устойчивости среды обитания для будущих поколений.

В мировой природоохранной гидротехнике большое значение при реновации гидроэнергетических гидроузлов имеет повышение безопасности, максимальной эффективности энерго- и ресурсопотребления. С точки зрения экологической безопасности многие АЭС и ТЭС на угле и газе неприемлемы. Более эффективным направлением использования солнечной энергии является фотоэлектрическое преобразование установками (СФЭУ), ежегодный прирост мощности которых в современных условиях составляет

50...65 МВт. Однако есть серьезные трудности в использовании солнечной энергии, заключающиеся в ее низкой плотности и цикличности поступления. Это снижает надежность ее использования и вызывает увеличение площади, занимаемой панелями фотоэлектрических батарей, что имеет отрицательный экологический эффект.

Нестабильность поступления энергии от ВИЭ помогает устранить современная «умная сеть», которая, используя компьютеры и коммуникационные системы, автоматизирует управление электрическими сетями всех уровней, перераспределяет энергию (например, на ГЭС Кубани с 2010 г.): излишки направляет в местную сеть, избыток – в региональную сеть, а при дефиците энергии происходит обратный процесс, вплоть до импорта энергии из-за границы. Это сокращает потребность в персонале, повышает надежность и безопасность, снижает общие издержки.

Для сокращения больших площадей затенения активно используемых земель, особенно в сельскохозяйственных целях, целесообразно размещать солнечные батареи на сооружениях и площадях, утилизируемых в сугубо техногенных целях, – например, на элементах гидроузлов. При этом важной становится ревитализация основных элементов сооружений гидрокомплекса, в частности, здания ГЭС, плотин и дамб – раскрытие новых возможностей старых сооружений и прилегающих к ним территорий.

Материалы и методы исследований.

Плотины и дамбы гидроузлов комплексного назначения, особенно водозаборных, обычно представляют собой неиспользованный гидроэлектрический потенциал, в большинстве случаев обычно требующий, чтобы конкретное конструктивное решение было жизнеспособным. Например, использование насосов в качестве силовых турбин часто является альтернативой, которая позволяет производить электроэнергию в уже эксплуатируемых ГЭС (в случае плотин в системах водоснабжения). В этой связи интересен проект насосной станции на р. Колорадо, которая будет закачивать воду по 32-километровому водопроводу обратно в водохранилище Гувера ($H_{пл} = 221$ м), что на 45% может повысить производительность ГЭС. В качестве примера также можно привести СЭС в Японии мощностью 5 МВт, устроенной на низовом откосе и в основании дамбы (рис. 2а). Этот потенциал может быть использован в сочетании с внедрением фотоэлектрических модулей на поверхности воды, установленных на плавучих конструкциях, работающих в гидроэлектрической гибридной системе (рис. 2б). Такая плавающая структура также может способствовать уменьшению испарения воды и небольшому увеличению доступной гидроэнергии (рис. 1б). Важной в АПК является и надежность источника энергоснабжения. Потребность в них сегодня высока, в частности, в связи с активизацией развития АПК на юге страны.



а

б

Рис. 2. Примеры расположения СЭС:

а – на низовом откосе и в основании дамбы, Япония;

б – на крыше интеллектуальной плавучей фермы для выращивания аквакультуры, бюро Forward Thinking Architecture, Испания

Fig. 2. Examples of SES location:

a – on the downstream face and at the base of the dam, Japan;

b – on the roof of an intelligent floating farm for growing aquaculture, Forward Thinking Architecture, Spain

Рядом исследователей довольно подробно рассмотрены проблемы водноэнергетических режимов комплексных электростанций на базе ГЭС (Л.Б. Берштейн, Ю.С. Васильев, Н.К. Малинин, Н.И. Хрисанов, А.Г. Пешнин, D. Heimiller, Т.А. Шестопалова и др. [7-14]) и показана целесообразность энергетического совмещения ГЭС именно с солнечными фотоэлектрическими установками (СФЭУ). Основные технические свойства этих объектов делают возможным и целесообразным не только энергетическое, но и их конструктивное совмещение. Однако для размещения СЭС на базе СФЭУ обычно требуются значительные площади.

Устройство СФЭУ связано с затенением панелями солнечных элементов больших территорий, которые в этом случае могут использоваться в основном в промышленных целях и практически полностью выводятся из сельскохозяйственного оборота [15]. При этом промышленное освоение затененных территорий имеет ряд проблем: располагаемое на них производство не должно загрязнять или каким-либо другим образом влиять на атмосферу; оно должно позволять осуществление режима охраны энергетического объекта, обеспечивать свободный доступ к солнечным батареям и т.п. Поэтому такие территории с трудом будут осваиваться другими пользователями и скорее всего будут полностью выведены из хозяйственного оборота. Это значит, что оплата аренды земли целиком будет зависеть от себестоимости производимой электроэнергии, что обусловит снижение экономических показателей СФЭУ и может стать препятствием к освоению этого экологически чистого возобновляющегося источника энергии.

Кроме того, обособленное расположение СФЭУ потребует отчуждения дополнительных земель для размещения открытого распределительного устройства, подъездных путей, ремонтно-эксплуатационных помещений и т.п., а размещение СФЭУ на удалении от распределительных подстанций энергосистемы или от потребителей потребует прокладки линий электропередач, вызывая дополнительные потери электроэнергии.

ГЭС и СФЭУ, вместе с тем, представляют собой электроэнергетические объекты. Для их функционирования так или иначе отчуждаются аналогичные земли и площади, в составе которых имеются аналогичные системы и устройства. Так, ГЭС различных типов включают в себя разнообразные гидротехнические сооружения [9]: машинные здания, плотины,

водоприемники, напорные бассейны, насосные станции, которые вполне могут быть использованы для размещения солнечных батарей. Технологический процесс ГЭС не создает помех для восприятия солнечными элементами энергии солнца, а те в свою очередь не влияют на работу оборудования ГЭС. Таким образом, поскольку в энергокомплексе ГЭС-СФЭУ энергетические режимы будут согласованы, то и конструктивно могут быть совмещены их электрические системы и устройства.

Результаты исследований. Для выявления особенностей использования солнечной фотоэнергетики на базе ГЭС был выполнен анализ, использующий данные о более 70 наземных ГЭС различной типологии и мощности, работающих в условиях жаркого климата, значительных гидроэнергетических ресурсов и испытывающих в последние годы большой энергетический дефицит (на примере условий таких африканских стран, как Республика Камерун [13, 15] и Зимбабве [4, 10]). Для этого из зарубежных и отечественных источников вычленились и анализировались основные данные по действующему гидрокомплексу: генплан гидроузла; тип задания ГЭС; поперечный разрез по зданию ГЭС; уровни в верхнем и нижнем бьефах гидроузла (соответственно ВБ и НБ); напор ГЭС (H); диаметр рабочего колеса турбины (D_t). На предварительном этапе анализа возможного конструктивного совмещения ГЭС с СФЭУ, несмотря на существующее многообразие типов компоновок гидроузлов комплексного назначения, состава сооружений и индивидуальных особенностей зданий ГЭС, в частности, ввиду отсутствия достоверной информации, ориентация здания ГЭС относительно стран света условно принималась одинаковой.

В перечень рассмотренных типов зданий ГЭС для предполагаемого расположения солнечных установок первоначально вошли: русловое здание ГЭС с горизонтальными капсульными агрегатами (не совмещенное и совмещенное с поверхностным водосливом); русловое здание ГЭС с вертикальными гидроагрегатами (не совмещенное или совмещенное с донными водосбросами и с трансформаторами со стороны ВБ либо НБ; не совмещенное или совмещенное с донными водосбросами с трансформаторами со стороны НБ; совмещенное с поверхностным водосливом); приплотинные здания ГЭС с бетонными плотинами с трансформаторами со стороны ВБ либо НБ; приплотинные здания ГЭС с грунтовыми или арочными плотинами

и здания деривационных ГЭС с трансформаторами со стороны ВБ либо НБ.

Как показали проработки, некоторые типы зданий ГЭС практически не представляют возможностей для совмещения с солнечными установками. Среди них – здания ГЭС с горизонтальными агрегатами; здания ГЭС с вертикальными агрегатами, совмещенные с поверхностными водосливами; здания ГЭС

с вертикальными агрегатами с пониженным верхним строением или без верхнего строения. В основном акцент делался на возможности расположения СФЭУ на крыше здания ГЭС или низовой грани бетонной плотины с блоками станционных водоводов. В качестве иллюстрации выбора места для расположения СФЭУ на рисунке 3 показаны разрезы по некоторым рассмотренным зданиям ГЭС.

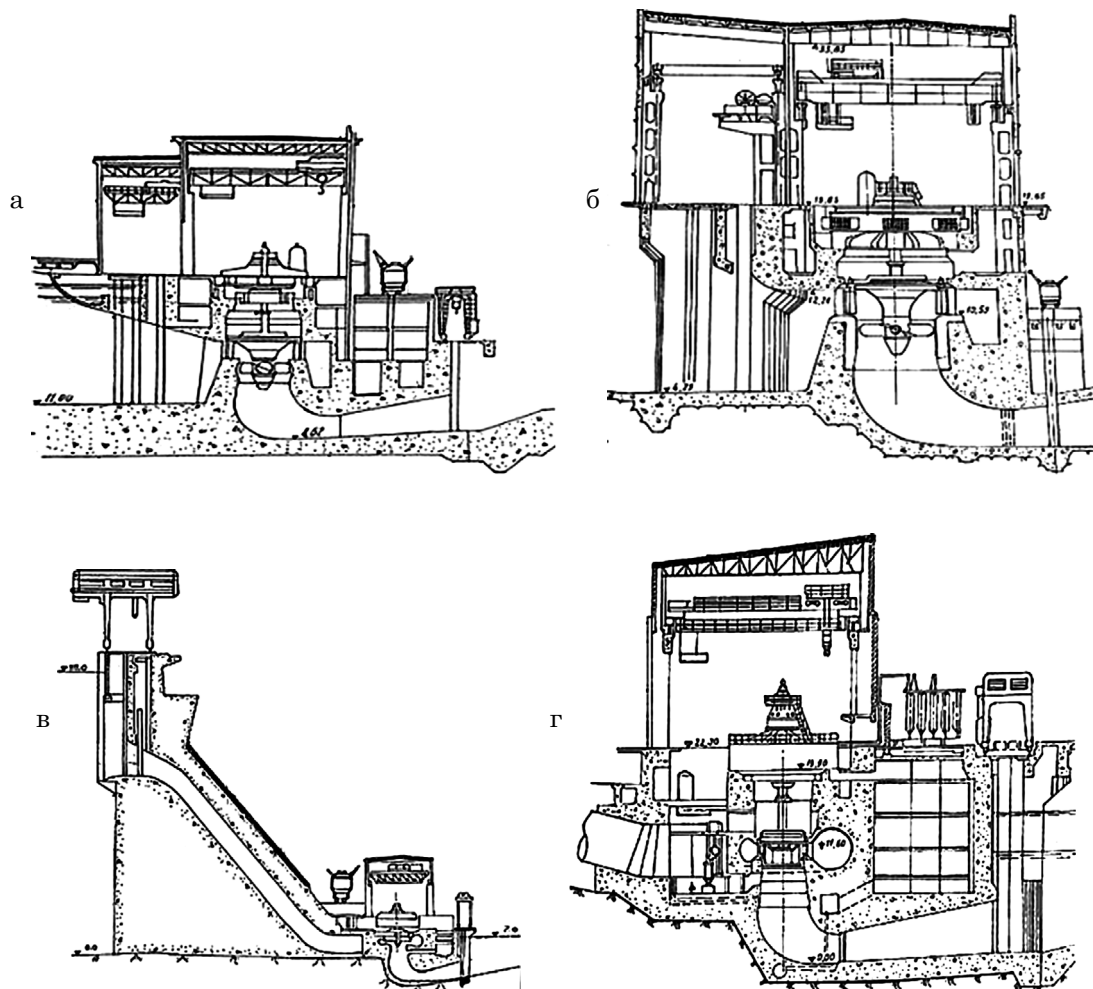


Рис. 3. Варианты возможного расположения солнечных элементов на зданиях ГЭС:
 а – на крыше руслового не совмещенного здания ГЭС с повышающими трансформаторами со стороны НБ;
 б – на крыше руслового не совмещенного здания ГЭС;
 в – на низовом откосе бетонной гравитационной плотины и трансформаторами со стороны плотины;
 г – на крыше приплотинного (деривационного) здания ГЭС с трансформаторами со стороны НБ

Fig. 3. Options for the possible location of solar cells on the buildings of hydroelectric power plants:

- а – on the roof of the channel of not-connected building of the hydroelectric power plant with step-up transformers from the NB side;
 б – on the roof of the channel not-connected building of hydroelectric power station (GES);
 в – on the downstream face of a concrete gravitational dam and transformers from the side of the dam;
 г – on the roof of dam (derivative) building of hydroelectric power plant (GES) with transformers from the NB side (downstream)

Результаты конструктивного анализа возможностей расположения солнечных элементов на сооружениях ГЭС представлялись

в координатах D_1-F , где F – относительная площадь «пригодных» поверхностей, то есть площадь, потенциально приспособленная

для размещения солнечных элементов, подсчитанная для одного турбинного блока и отнесенная к квадрату диаметра рабочего колеса турбины ($\pi D_1^2/4$) (рис. 4).

Анализ полученных кривых показал, что диаметр в значительной мере определяет целесообразность конструктивного совмещения здания ГЭС и СФЭУ: при увеличении диаметра рабочего колеса относительная площадь поверхностей, пригодных для размещения солнечных элементов, уменьшается. При значениях диаметра менее 5 м увеличение значений F происходит наиболее

резко. Это свидетельствует о том, что здания средних и малых ГЭС (в значительной мере) представляют больше конструктивных возможностей для совмещения с СФЭУ, чем здания ГЭС высоконапорных гидроузлов. Этот результат подтверждает известное положение о росте технико-экономической эффективности энергетического объекта (как и вообще любого другого технического объекта) с ростом его единичных параметров, то есть применительно к ГЭС – с ростом единичной мощности агрегата и диаметра рабочего колеса D_1 .

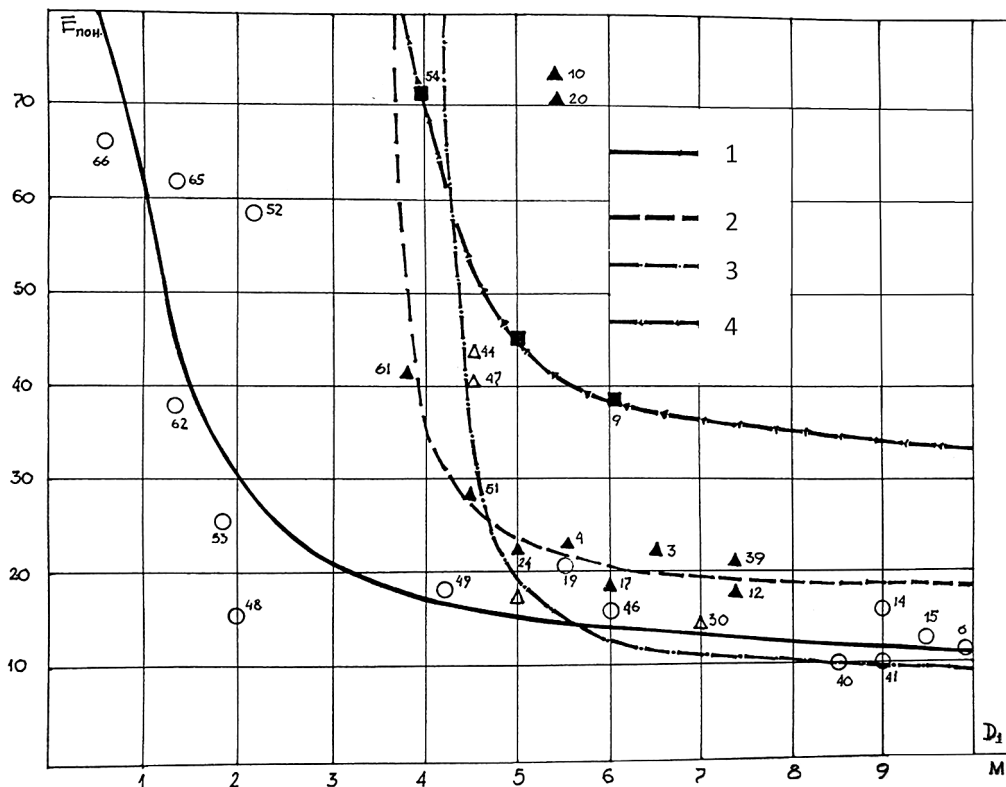


Рис. 4. График зависимости относительной площади F расположения СФЭУ на типизированных зданиях ГЭС от диаметра рабочего колеса турбины D_1 :

- 1 – русловые не совмещенные здания ГЭС с вертикальными агрегатами и трансформаторами со стороны НБ;
- 2 – приплотинные здания ГЭС с бетонной плотиной и трансформаторами со стороны НБ;
- 3 – русловые не совмещенные здания ГЭС с вертикальными агрегатами и трансформаторами со стороны ВБ;
- 4 – приплотинные здания ГЭС с грунтовой плотиной и деривационные здания ГЭС с трансформаторами со стороны НБ

Fig. 4. Graph of the dependence of the relative area F of the location of the SFEU on the typified buildings of the hydroelectric power plant (GES) on the diameter of the working wheel of the turbine D_1 :

- 1 – channel not-connected buildings of the hydroelectric power plant (GES) with vertical aggregates and transformers from the NB side;
- 2 – dam buildings of hydroelectric power plant (GES) with a concrete dam and transformers from the NB side;
- 3 – channel non-connected buildings of hydropower plant (GES) with vertical aggregates and transformers from the NB;
- 4 – dam buildings of hydroelectric power plant (GES) with an earth dam and diversion buildings of hydroelectric power plant (GES) with transformers from the NB side (downstream)

Кривые зависимости $F = f(D_i)$ имеют простую геометрическую форму в виде гиперболы, которые могут быть аппроксимированы формулой:

$$Y = (X - A)^{-1} + C, \quad (1)$$

где $Y = F$; $X = D_i$; A и C – константы, значения которых различны для разных типов зданий ГЭС, причем значения A берутся в метрах, C – в безразмерном виде.

Таким образом, аппроксимация полученных графических зависимостей выявила следующую связь площади, пригодной для размещения солнечных элементов от диаметра рабочего колеса турбины:

- для русловых не совмещенных зданий ГЭС с вертикальными гидроагрегатами и трансформаторами со стороны НБ

$$F = 1/(D_i - 1) + 15 \text{ при } D_i > 1 \text{ м}; \quad (2)$$

- для приплотинных зданий ГЭС с бетонными плотинами и трансформаторами со стороны НБ

$$F = 1/(D_i - 4) + 20 \text{ при } D_i > 4 \text{ м}; \quad (3)$$

- для приплотинных зданий ГЭС с грунтовыми плотинами и зданий деривационных ГЭС трансформаторами со стороны НБ

$$F = 1/(D_i - 4,5) + 35 \text{ при } D_i > 4,5 \text{ м}; \quad (4)$$

- для приплотинных зданий ГЭС с грунтовыми плотинами и зданий деривационных ГЭС с трансформаторами со стороны ВБ

$$F = 1/(D_i - 4,5) + 20 \text{ при } D_i > 4,5 \text{ м}. \quad (5)$$

Данными зависимостями рекомендуется пользоваться на предварительных этапах проектирования при оценке мощности СФЭУ, которая может быть совмещена с ГЭС того или иного типов. Более детальный анализ вопросов компоновочного совмещения ГЭС и СФЭУ должен основываться на проработках, имеющих преимущественно проектный характер.

Выводы

Совмещение ГЭС и СФЭУ природоохранных гидроузлов поможет полностью дублировать мощность других электростанций

Библиографический список

1. Стратегии инновационного развития строительной отрасли России на период до 2030 г.: Проект документа // Минстрой

энергосистемы (например, тепловых) и получить экономический эффект. Комбинация гидравлической структуры ГЭС и систем солнечной энергии может быть успешной, когда солнечные фотоэлектрические панели установлены на элементах ГЭС или поверхности плотины, а энергия накапливается в батареях, которые могут быть размещены на берегах ниже по течению, что в целом увеличит энергоэффективность развивающихся стран.

Подтверждена эффективность совмещения двух электростанций, что сокращает протяженность ЛЭП, подъездных путей, отчуждение земель из хозяйственного оборота и пр., повышает выработку локального электричества. Предложен критерий оценки целесообразности конструктивного совмещения ГЭС с СФЭУ и установлено, что с уменьшением диаметра рабочего колеса турбины относительная площадь пригодных для размещения солнечных элементов увеличивается, особенно при значениях D_i , меньших 5 м.

Наиболее целесообразно совмещать СФЭУ и малые ГЭС с русловыми не совмещенными зданиями с трансформаторами со стороны нижнего бьефа. На средних ГЭС различных типов условия совмещения примерно одинаковы. Результаты схематической проектной проработки и оценки обобщенных технико-экономических характеристик комплекса СФУ-ГЭС для условий низко- или средненапорных гидроузлов свидетельствуют о возможности получения значительного экономического эффекта, особенно при дополнительном задействовании поверхности низового откоса грунтовой плотины или возможных площадок на прилегающей территории.

Результаты работы могут быть использованы при разработке проектов развития электроэнергетики в южных регионах России с активным сельхозпроизводством. В дальнейшем предлагается оценить мощность миксированного энергокомплекса и проанализировать, как водная инфраструктура может содержать и окупать себя за счет возобновляемых источников энергии и внедрения новых «зеленых» практик вокруг элементов и объектов природообустройства и водопользования разного назначения.

References

1. Strategii innovatsionnogo razvitiya stroitelnoj otrasli Rossii na period do 2030 g.: proekt dokumenta // Minstroj Rossii.

России. – URL: <http://www.minstroyrf.ru/docs/11870>.

2. **Грачёв В.А., Плямина О.В.** Глобальные экологические проблемы, экологическая безопасность и экологическая эффективность энергетики // Век глобализации. – 2017. – № 1. – С. 86-97.

3. Проблема экономической оценки теплового загрязнения атмосферы объектами электроэнергетики / В.В. Волшаник, А.Г. Пешнин, У. Хаманджода и др. // Вестник МГСУ. – 2009. – № 1. – С. 198-207.

4. **Прайд Табвивакаре, Черных О.Н.** Развитие методов «зеленого проектирования» в природоохранной гидротехнике Зимбабве // Студент года- 2020: Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса: В 4 ч. – Ч. 3. – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2020. – С. 141-146.

5. **Алоян Р.М., Федосов С.В., Опарина Л.А.** Зелёное строительство – состояние, проблемы и пути решения. – Иваново: ПресСТО, 2016. – 276 с.

6. **Prof Elistratov V.V., Togola I., Burrell T.** Renewable Energy in West Africa, Forum for World Council for Renewable Energy. – Berlin, 2002. – С. 151-153.

7. **Корниенко С.В., Попова Е.Д.** «Зелёное» строительство в России и за рубежом // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 4 (55). – С. 67-93.

8. **Лин Аунг Тет, Малинин Н.К., Шестопалова Т.А.** Исследование эффективности использования солнечных фотоэлектрических установок в системах распределенной энергетики в регионах Мьянмы // Энергетик. – 2014. – № 5. – С. 36-40.

9. **Волшаник В.В., Орехов Г.В.** Низконапорные гидравлические двигатели. – М.: МГСУ, 2009. – 392 с.

10. **Прайд Табвивакаре, Черных О.Н.** Основные аспекты «зеленого строительства» в российской гидротехнике и в Зимбабве // Мат-лы Международной научной конф. молодых ученых и специалистов, посвященной 150-летию А.В. Леонтовича. – М.: РГАУ-МСХА, 2019. – С. 506-510.

11. Экологические проблемы использования возобновляющихся источников энергии / В.В. Волшаник, А.Г. Пешнин, У. Хаманджода и др. // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4. – С. 108-119.

12. **Jesch L., Lesslie F.** Evolution and perspectives of the solar market. – Paris, 1993. – 40 p.

13. **Хаманджода У.** Обоснование эффективности энергетического и конструктивного

Rezhim dostupa: <http://www.minstroyrf.ru/docs/11870>.

2. **Grachev V.A., Pljamina O.V.** Globalnye ekologicheskie problem, ekologicheskaya bezopasnost i ekologicheskaya effektivnost energetiki // Vek globalizatsii. – 2017. – No. 1. – S. 86-97.

3. **Volshanik V.V., Peshnin A.G., Umaru Hamandzhoda, Shchennikova G.N.** Problema ekonomicheskoy otsenki teplovogo zagryazneniya atmosfery objektami elektroenergetiki / Volshanik V.V., Peshnin A.G., Umaru Hamandzhoda i dr. // Vestnik MGSU. – 2009. – № 1. – S. 198-207.

4. **Pride Tabvivakare, Chernykh O.N.** Razvitie metodov "Zelenogo proektirovaniya" v prirodoohrannoj gidrotehnike Zimbabve // Student goda 2020. Sb. Statej Mezhdun. nauchno-issledovatel'skogo konkursa v 4-h ch. Ch. 3. – Petrozavodsk: MTSNI "Novaya nauka", 2020. – S. 141-146.

5. **Aloyan R.M., Fedosov S.V., Oparina L.A.** Green construction-state, problems and solutions. – Ivanovo: PresSTO, 2016. – 276 p.

6. **Prof Elistratov V.V., Togola I., Burrell T.** Renewable Energy in West Africa, Forum for World Council for Renewable Energy Berlin 2002, p. 151-153.

7. **Kornienko S.V., Popova E.D.** "Green" construction in Russia and abroad // Construction of unique buildings and structures. – 2017. – No. 4 (55). – pp. 67-93.

8. **Lin Aung Tet, Malinin N.K., Shestopalova T.A.** Issledovanie effektivnosti ispolzovaniya solnechnyh fotoelektricheskikh ustanovok v sistemah raspredelennoj energetiki v regionah Mjanmy // Energetik. 2014, No. 5. – S. 36-40.

9. **Volshanik V.V., Orekhov G.V.** Nizkonapornye gidravlicheskie dvigateli. – М.: MGSU. – 2009. – 392 s.

10. **Pride Tabvirakare O.N. Chernykh.** Osnovnye aspekty "zelenogo stroitelstva" v Rossijskoj gidrotehnike i v Zimbabve // Mat-ly Mezhdun. nauchnoj konf. Molodyh uchenyh i spetsialistov, posvyashchennoj 150-letiyu A.V. Leontovicha. – М.: RGAU-MSHA, 2019. S. 506-510.

11. **Volshanik V.V., Peshnin A.G., Umaru Hamandzhoda, Shchennikova G.N.** Ekologicheskie problemy ispolzovaniya vozobnovlyayushchihsya istochniov energii / Volshanik V.V., Peshnin A.G., Umaru Hamandzhoda i dr. // Vestnik MGSU. – 2010. – No. 4. – S. 108-119.

12. **Jesch L., Lesslie F.** Evolution and perspectives of the solar market. Paris, – 1993. 40 p.

совмещения гидроэлектростанций с солнечными фотоэлектрическими установками: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: 1996. – 18 с.

14. Справочные данные по гидроэлектростанциям мира. Гидроэлектростанции стран Африки, Филиппин, Индонезии, Австралии, Новой Зеландии и Океании. – М.: Гидропроект, 1986. – 340 с.

15. Конструктивное и технологическое совмещение гидравлических и солнечных электростанций / В.В. Волшаник, О.Н. Черных, У. Хаманджода и др. // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 г.: Сб. научных трудов РААСН. – М.: Изд-во АСВ, 2020. – Т. 2. – С. 152-157.

Критерии авторства

Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Волшаник В.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Черных О.Н., Бурлаченко А.В., Волшаник В.В. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию: 01.02.2021 г.

Одобрена после рецензирования 11.02.2021 г.

Принята к публикации 19.02.2021 г.

13. Umar Hamanjoda. Obosnovanie effektivnosti energeticheskogo i konstruktivnogo sovmeshcheniya gidroelektrostantsij s solnechnymi fotoelektricheskimi ustanovkami: Avtoref. dis. kand. teh. nauk: 05.14.10. – М.: 1996. 18 s. ustanovkami: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.10. – М.: 1996. 18 с.

14. Spravochnye dannye po gidroelektrostantsiyam mira. Gidroelektrostantsii stran Afriki, Filippin, Indonezii, Avstralii, Novoj Zelandii i Okeanii. – М.: Gidroproekt, 1986. – 340 s.

15. Volshanik V.V., Chernykh O.N., Hamanjoda U., Pride Tabvirakare. Konstruktivnoe i technologicheskoe sovmeshchenie gidravlicheskih i solnechnyh elektrostantsij / Volshanik V.V., Chernykh O.N., Hamanjoda U. i dr. // Fundamentalnye, poiskovyie i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arhitektury, gradostroitelstva i stroitelnoj otrasli Rossijskoj Federatsii v 2019 godu: sb. nauch. tr. RAASN t. 2. – М.: Izd-vo ASV, 2020. – S. 152-157.

Criteria of authorship

Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Volshanik V.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Chernykh O.N., Burlachenko A.V., Volshanik V.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests.

The article was submitted to the editorial office: 01.02.2021

Approved after reviewing 11.02.2021

Accepted for publication 19.02.2021