

УДК 621.311.243
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-4-19-30

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПЛАВУЧИХ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

П.С. Посмитный, П.С. Шуркалов, Ю.П. Симаков

Аннотация. Представлен комплексный анализ современных тенденций развития плавучих солнечных электростанций в мире и Кыргызстане. Рассмотрены динамика роста установленной мощности, ключевые технологические тренды, факторы экономической эффективности и особенности применения плавучих солнечных электростанций в регионах с ограниченными земельными ресурсами и высоким гидроэнергетическим потенциалом. Проведена структурная классификация плавучих солнечных электростанций по конструктивному исполнению, условиям эксплуатации, функциональному назначению и архитектурно-компоновочным решениям. Особое внимание уделено техническим и экологическим вызовам, включая вопросы швартовки, устойчивости конструкций, климатических ограничений, электротехнических рисков и нормативных барьеров. На основе анализа пилотных проектов сделан вывод о высокой применимости технологии в Кыргызстане и значительном потенциале её масштабирования. Показано, что плавучие солнечные электростанции могут стать важным компонентом гибридных энергосистем и повысить устойчивость национального энергоснабжения.

Ключевые слова: плавучая солнечная электростанция; фотоэлектрическая станция; фотоэлектрический модуль; возобновляемая энергетика; плавучая платформа.

КАЛКЫП ЖҮРҮҮЧҮ КҮН ФОТОЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫН УЧУРДАГЫ ӨНҮГҮҮ ТЕНДЕНЦИЯЛАРЫ ЖАНА КЕЛЕЧЕГИ

П.С. Посмитный, П.С. Шуркалов, Ю.П. Симаков

Аннотация. Макалада дүйнөдөгү жана Кыргызстандагы калкып жүрүүчү күн электр станцияларынын өнүгүү тенденцияларынын комплекстүү анализи берилди. Белгиленген кубаттуулуктун өсүү динамикасы, негизги технологиялык тенденциялар, экономикалык натыйжалуулук факторлору жана жер ресурстары чектелген жана гидроэнергетикалык потенциалы жогору аймактарда калкып жүрүүчү күн электр станцияларын колдонуу өзгөчөлүктөрү каралды. Калкып жүрүүчү күн электр станцияларынын структуралык классификациясы конструкциялык аткарылышы, пайдалануу шарттары, функционалдык багыты жана архитектуралык-компоновкалык чечимдери боюнча жүргүзүлгөн. Техникалык жана экологиялык чакырыктарга, анын ичинде байлоо, конструкциялардын туруктуулугу, климаттык чектөөлөр, электротехникалык тобокелдиктер жана ченемдик тоскоолдуктар маселелерине өзгөчө көңүл бурулду. Пилоттук долбоорлорду талдоонун негизинде Кыргызстанда технологиянын жогорку колдонуучулугу жана аны масштабдаштыруунун олуттуу потенциалы жөнүндө тыянак чыгарылды. Калкып жүрүүчү күн электр станциялары гибридик электр тутумдарынын маанилүү компоненти болуп, улуттук энергия менен камсыздоонун туруктуулугун жогорулата алары көрсөтүлгөн.

Түйүндүү сөздөр: калкып жүрүүчү күн станциясы; фотоэлектр станциясы; фотоэлектрдик модуль; жаңылануучу энергия; калкып жүрүүчү платформа.

CURRENT TRENDS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF FLOATING SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

P.S. Posmitny, P.S. Shurkalov, Y.P. Simakov

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of current trends in the development of floating solar power plants worldwide and in Kyrgyzstan. It examines the dynamics of installed capacity growth, key technological trends, economic efficiency factors, and the specifics of floating solar power plants application in regions with limited land

resources and high hydropower potential. A structural classification of floating solar power plants is carried out according to design, operating conditions, functional purpose, and architectural and layout solutions. Particular attention is paid to technical and environmental challenges, including mooring issues, structural stability, climatic constraints, electrical risks, and regulatory barriers. Based on the analysis of pilot projects, it was concluded that the technology is highly applicable in Kyrgyzstan and has significant potential for scaling up. It was shown that floating solar power plants can become an important component of hybrid energy systems and increase the sustainability of the national energy supply.

Keywords: floating solar power plant; photovoltaic station; photovoltaic module; renewable energy; floating platform.

Введение. Быстрый рост мировой энергетики, усиление климатических изменений и истощение природных ресурсов ставят перед государствами задачу ускоренного внедрения экологически чистых и эффективных технологий производства электроэнергии. На этом фоне солнечная энергетика стала наиболее динамично развивающимся сегментом возобновляемых источников энергии (ВИЭ), демонстрируя устойчивый рост мощностей практически во всех регионах мира [1, 2]. Однако расширение традиционных наземных солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) сопровождается значительными требованиями к земельным ресурсам и воздействиям на окружающую среду, что особенно критично для густонаселённых территорий и регионов с ограниченным земельным фондом.

Одним из перспективных решений данных проблем стали плавучие солнечные электростанции (ПСЭС), размещаемые на поверхности водоёмов. Для них характерна более высокая энергоэффективность благодаря естественному охлаждению основного энергетического оборудования, расположенного близ водной поверхности. Также ПСЭС частично снижают испарение воды и открывают возможность использования ранее не востребуемых акваторий водохранилищ, прудов, озёр и пр.

Современное состояние плавучей солнечной генерации в мире. На сегодняшний день плавучая солнечная генерация составляет порядка 2,5–3,5 % от совокупной установленной мощности солнечной энергетике в мире. Наиболее распространённым сегментом рынка остаются ПСЭС установленной мощностью до 5 МВт, на которые приходится около 40,7 % всех действующих проектов. Данный диапазон мощности обеспечивает оптимальное сочетание масштабируемости, управляемости и применения стандартизированных платформенных решений, что способствует повышению надёжности и сокращению эксплуатационных затрат [3].

Первое упоминание об экспериментальных проектах ПСЭС приходится на 2007 год, когда в префектуре Айти (Япония) была создана установка мощностью 20 кВт. Первая коммерческая плавучая СФЭС была введена в эксплуатацию уже в 2008 году в штате Калифорния (США), её мощность составила 175 кВт [4]. В последующие годы технология продемонстрировала устойчивый темп роста: к 2019 году суммарная установленная мощность ПСЭС мира достигла 1,9 ГВт, включая Китай – 960 МВт; Японию – 210 МВт; Южную Корею – 79 МВт; Тайвань – 26 МВт; Великобританию – 13 МВт; страны ЕС – 8 МВт; США – 6 МВт; Камбоджу – 3 МВт; Индию – 2,7 МВт; Сингапур – 1,5 МВт; Бразилию – 1,5 МВт; Таиланд – 1 МВт; Малайзию – 0,5 МВт; Мальдивскую Республику – 0,2 МВт; Австралию – 0,1 МВт и Израиль – 0,05 МВт [1].

Одним из ключевых факторов, определяющих развитие данного направления солнечной энергетике, является устойчивое снижение стоимости оборудования, включая фотоэлектрические модули (ФЭМ), инверторные системы и накопители энергии. Несмотря на то, что капитальные затраты ПСЭС-проектов в среднем остаются на 20–25 % выше, чем у наземных СФЭС, разрыв постепенно сокращается благодаря удешевлению материалов, серийному производству плавучих платформ и стандартизации инженерных решений [5]. Так, если в 2019 году уровень нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) для ПСЭС достигал 0,32 USD/кВт·ч [6], то к 2025 году он снизился до 0,091 USD/кВт·ч [7].

На сегодняшний день мировым лидером по плавучей солнечной генерации остаётся Китай, на долю которого приходится более 1300 МВт установленной мощности ПСЭС. Там же расположена крупнейшая на данный момент ПСЭС мощностью 320 МВт (г. Дэчжоу, провинция Шаньдун). За Китаем

следуют Япония, Индия, Южная Корея и Таиланд – каждая из этих стран превысила отметку в 100 МВт установленной мощности плавучей солнечной генерации [8].

По данным [7], суммарная установленная мощность ПСЭС в мире достигла 7,7 ГВт к 2023 году и увеличилась до 9,8 ГВт к концу 2024 года. В течение 2024 года было введено в эксплуатацию дополнительно 1,7 ГВт, причём 92 % новых мощностей были реализованы в странах Азии; оставшиеся проекты преимущественно распределились между странами Европы [9].

Прогнозы показывают, что к 2025 году глобальный рынок ПСЭС достигнет объёма 7,8 млрд USD, а к 2035 году увеличится до 9,1 млрд USD, что соответствует среднегодовому темпу роста около 1,5 %. Мировая установленная мощность плавучей солнечной генерации может превысить 12 ГВт уже в 2025 году [5].

Таким образом, быстрое расширение рынка плавучей солнечной генерации отражает растущую востребованность технологии и её потенциал в глобальной энергетике. Однако реализованные проекты представляют лишь малую часть её возможностей. Согласно оценке Всемирного банка, ESMAP и SERIS, в мире существует 114 555 пресноводных водоёмов общей площадью 554 тыс. км², пригодных для размещения ПСЭС. Особенно значимо то, что на 2561 водоёме уже сооружены гидроэлектростанции (ГЭС) и имеется действующая сетевая инфраструктура, что существенно снижает капитальные затраты при внедрении ПСЭС. При покрытии всего 1 % вышеупомянутой площади плавучими СФЭС мировой технический энергопотенциал составит 400 ГВт, а потенциальная годовая выработка – около 5,5 ТВт·ч [10].

Плавучие солнечные электростанции в Кыргызской Республике. Кыргызская Республика относится к числу государств, демонстрирующих повышенный интерес к технологиям плавучей солнечной генерации в условиях растущего энергетического дефицита, ограниченности земельных ресурсов и высокой солнечной инсоляции. Энергетический сектор страны сталкивается с системными проблемами: увеличением потребления, износом инфраструктуры, зависимостью от импорта электроэнергии и снижением водных запасов крупнейших гидротехнических сооружений. В этих условиях ПСЭС рассматриваются как один из ключевых инструментов повышения энергетической устойчивости и диверсификации генерации.

В 2024 году при поддержке Азиатского банка развития был реализован первый пилотный проект плавучей СФЭС, которая была размещена на водохранилище суточного регулирования ГЭС-5. Мощность ПСЭС составила 95 кВт. За период эксплуатации с июня 2024 года до настоящего времени станция продемонстрировала высокую эффективность: фактическая выработка за первое полугодие 2025 года достигла 75 тыс. кВт·ч, что оказалось на 5,6 % выше расчётных показателей. Таким образом, пилотный проект подтвердил применимость плавучей солнечной генерации в климатических условиях Кыргызстана, для которых характерны резкие суточные колебания температуры и значительные ветровые нагрузки в горных районах [11].

Следующим этапом развития данного направления стало заключение соглашения о строительстве двух крупных ПСЭС на Токтогульском водохранилище общей площадью 12 км². Суммарная установленная мощность станций должна составить 612 МВт, а прогнозируемая годовая выработка – около 1,78 млрд кВт·ч. Кроме этого планируется интеграция системы накопления энергии ёмкостью 500 МВт·ч, что позволит сглаживать пики нагрузки и обеспечивать стабильность сети [12].

В свою очередь, комплексная оценка технического энергопотенциала плавучей солнечной генерации, проведенная авторским коллективом для девяти крупнейших водохранилищ республики, показывает возможность размещения ПСЭС суммарной мощностью до 22 ГВт при условии использования около 40 % водной поверхности. Потенциальная годовая выработка при этом оценивается в 3 ТВт·ч [13]. Три независимых метода оценки (метод аналогии, адаптированный метод и метод, используемый в открытом веб-ресурсе «Global Solar Atlas» [14]) продемонстрировали расхождение менее 7 %, что подтверждает достоверность расчётов. Наибольший потенциал сконцентрирован на Токтогульском, Кировском и Орто-Токойском водохранилищах.

Несмотря на значительные перспективы, развитие ПСЭС в Кыргызстане сопряжено с рядом вызовов: высокогорными условиями эксплуатации, сезонными колебаниями уровня воды, ограниченной кадровой базой и необходимостью адаптации нормативной документации. Тем не менее накопленный опыт эксплуатации пилотной станции, перспектива реализации крупных проектов и подтверждённый потенциал свидетельствуют о формировании устойчивой технологической и институциональной базы для широкого внедрения плавучей солнечной генерации в республике.

Классификация плавучих солнечных электростанций. На фоне растущего интереса к ПСЭС как в мировом масштабе, так и в Центральной Азии возникает необходимость систематизировать существующие типы плавучих солнечных систем. Современная классификация ПСЭС опирается на конструктивные особенности платформ, условия эксплуатации, функциональное назначение и архитектурные решения [2, 15–17].

1. Классификация по конструкции плавучей платформы:

- Понтонные системы – наиболее распространены, характеризуются модульностью и низкой стоимостью; применяются в пресноводных водоёмах.
- Трубчато-рамные конструкции – обладают высокой жёсткостью, допускают применение систем слежения за Солнцем; используются на водоёмах с повышенными нагрузками.
- Полупогружные платформы – частично находятся под водой, обеспечивая снижение ветровых нагрузок; перспективны для крупных водохранилищ.
- Гибкие мембранные платформы – обеспечивают максимальное охлаждение ФЭМ; встречаются преимущественно в пилотных проектах.
- Платформы для офшорных ПСЭС – усиленные платформы, рассчитанные на волны в 3–5 м и ветровые нагрузки до 25 м/с.

2. Классификация по условиям эксплуатации:

- Пресноводные ПСЭС – озёра, пруды, ирригационные и питьевые резервуары.
- Водоохранилища ГЭС – создаётся синергия солнечной и гидро-генерации.
- Солончатые и морские акватории – требуется усиленная коррозионная защита оборудования станции.
- Офшорные ПСЭС – размещение в прибрежных зонах и открытом море.

3. Классификация по функциональному назначению:

- ПСЭС энергетического назначения – выработка электроэнергии.
- Экологические ПСЭС – снижение испарения, предотвращение цветения воды, аэрация.
- Гибридные энергетические комплексы – ПСЭС + ГЭС, ПСЭС + накопители энергии.
- Специализированные ПСЭС – для автономных систем, островных микросетей и водородной генерации.

4. Классификация по архитектуре и конфигурации:

- Фиксированные массивы ФЭМ с постоянным углом наклона модулей.
- ПСЭС с системами слежения за Солнцем (трекерами) – обеспечивают прирост выработки на 8–15 %.
- Секционные и модульные платформы – адаптируются к форме водоёма.
- Системы с переменной ориентацией – используют приводные механизмы или якорные решения для поворота массива ФЭМ.

Таким образом, современная классификация ПСЭС отражает глобальное разнообразие инженерных подходов и позволяет адаптировать технологию под условия конкретного региона.

Конструкции плавучих солнечных электростанций. Плавучая СФЭС включает четыре ключевых элемента: плавучую платформу, ФЭМ, электрическую часть (инвертор, аккумуляторные батареи) и систему крепления и швартовки. Система крепления и швартовки обеспечивает надёжное фиксирование всей плавающей конструкции, тогда как платформа отвечает за удержание на плаву всех

компонентов станции, служит опорой для модулей, инверторов и другого оборудования, а также упрощает процессы монтажа и обслуживания.

Учитывая, что ПСЭС эксплуатируются в условиях воздействия различных внешних факторов, включая ветер, волновое воздействие, течения, ледовые нагрузки и длительное влияние агрессивных сред, например солёной воды, особое значение приобретают её устойчивость, безопасность конструкции и долговечность установленного оборудования.

Начиная с 2008 года, по мере роста количества проектов плавучих солнечных систем, вопросы выбора и разработки конструктивных решений приобретают широкое распространение.

На рисунке 1 приведена информация по ведущим производителям технологий для ПСЭС и их рыночных долей, определяемых по установленной мощности станций.

Каждый производитель стремится дифференцировать свою продукцию, придавая ей уникальные свойства. В 2021 году международное сертификационное общество Det Norske Veritas представило документ DNV-RP-0584, в котором предпринята попытка стандартизации типов платформ. Согласно этому документу, выделены основные категории конструкций: понтонные и полупогружные [15].

1. Понтонный тип плавучей конструкции. Понтонные платформы – это одно из наиболее распространённых конструктивных решений для размещения ФЭМ ПСЭС. Принцип их построения основан на использовании отдельных плавучих элементов – понтонов или поплавков, которые объединяются в модульную систему и формируют устойчивую поверхность для монтажа фотоэлектрических модулей. Такая архитектура обеспечивает необходимую плавучесть, равномерное распределение нагрузки от оборудования и возможность масштабирования станции за счёт добавления новых секций [2, 18–20].

Существующие конструкции понтонных платформ условно можно разделить на несколько классов в зависимости от конфигурации поплавков и несущей системы. Одним из ранних вариантов является комбинированная понтонно-трубчатая конструкция, которая относится к платформам первого класса.

Комбинированная конструкция понтонного-трубчатого типа. Плавучесть ПСЭС, основанных на таких платформах, обеспечивается рядом параллельно расположенных трубчатых поплавков, как правило изготовленных из полиэтилена высокой плотности (HDPE), обладающего высокой стойкостью к воздействию влаги, ультрафиолетового излучения и химически активных сред.

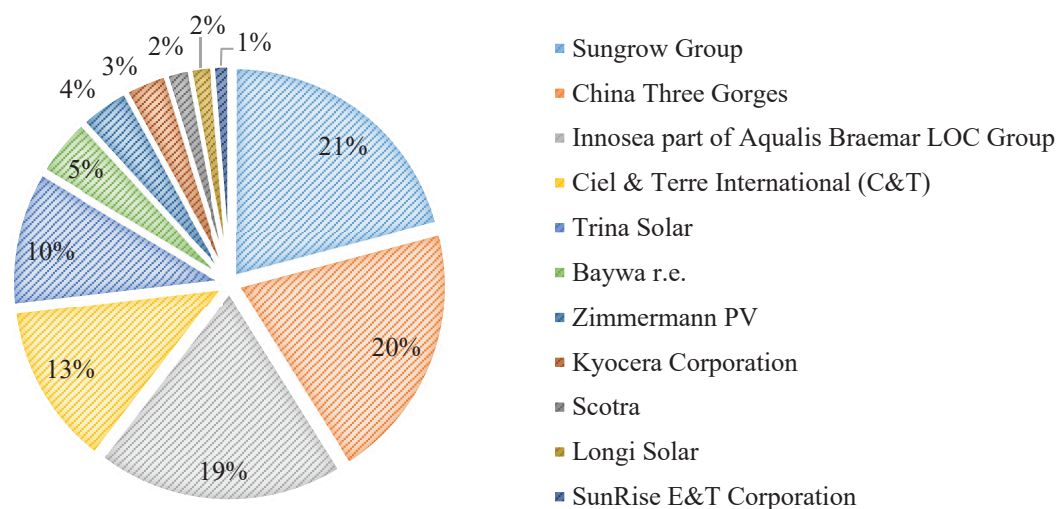


Рисунок 1 – Ведущие производители технологий в сфере плавучей солнечной генерации

Несущая система платформы формируется пространственным каркасом из алюминиевых или стальных элементов, на котором закрепляются ФЭМ. Для повышения надёжности и предотвращения потери плавучести внутренняя полость поплавков часто заполняется лёгкими вспененными материалами, например пенополистиролом. Подобная конструкция характеризуется относительно небольшой площадью контакта с водой, что снижает гидродинамическое сопротивление и упрощает регулирование угла наклона солнечных модулей с целью оптимизации генерации электроэнергии.

Понтонно-трубчатые платформы отличаются высокой жёсткостью и универсальностью применения, однако их стоимость обычно несколько выше по сравнению с более простыми модульными системами, поскольку требуется дополнительная металлическая несущая конструкция. Тем не менее такие решения остаются востребованными для небольших и средних водоёмов, где необходима повышенная механическая устойчивость платформы [2, 18, 19].

Пример конструкции понтонной платформы первого класса представлен на рисунке 2.

К преимуществам данной конструкции относятся относительная простота изготовления, удобство транспортировки и снижение износа элементов при взаимных перемещениях ФЭМ, что достигается за счёт фиксации верхней жёсткой фермы. Вместе с тем высокая жёсткость платформы ограничивает её способность адаптироваться к колебаниям водной поверхности. В условиях волнения это может приводить к концентрации напряжений в отдельных узлах конструкции и повышенному риску механических повреждений.

Коммерческое применение подобных решений реализовано рядом компаний. К наиболее известным разработчикам понтонно-трубчатых платформ относятся европейская компания Zimmermann PV-Steel Group и южнокорейская Scotra. Например, технология ZIM Float получила широкое распространение в Европе, где суммарная установленная мощность станций на основе данной платформы превышает 250 МВт, преимущественно в Германии и Нидерландах. Компания Scotra также активно развивает подобные решения и с 2012 года внедряет коммерческие системы, которые за время эксплуатации прошли несколько этапов модернизации и совершенствования конструкции [20].

Плавающая конструкция чисто понтонного типа. Другой широко применяемой архитектурой ПСЭС являются конструкции, в которых плавучесть и несущая функция обеспечиваются исключительно понтонными элементами без использования дополнительного металлического каркаса (конструкция второго класса). В таких системах ФЭМ устанавливаются непосредственно на отдельные поплавковые блоки, специально разработанные для размещения солнечных панелей. Каждый модуль, как правило, закрепляется на индивидуальной поплавке, снабжённой направляющими элементами и крепёжными узлами для фиксации рам солнечных панелей.

Понтонные элементы выполняют не только функцию обеспечения плавучести, но и могут использоваться для размещения кабельных каналов, соединительных коробок и других электротехнических компонентов станции. В некоторых конструкциях отдельные поплавковые блоки формируют технологические проходы для обслуживания оборудования или защитные элементы по периметру станции, выполняющие роль буферного барьера.

Отдельные модули платформы соединяются между собой посредством шарнирных соединений или фиксирующих штифтов, что позволяет формировать крупные модульные массивы без применения дополнительной несущей рамы. Такая модульная структура облегчает транспортировку и монтаж станции, а также обеспечивает возможность адаптации платформы к геометрии конкретного водоёма.



Рисунок 2 – Конструкция плавучей платформы первого класса

Подобные системы получили широкое распространение в коммерческих проектах благодаря простоте конструкции и высокой степени стандартизации элементов [2, 19].

Понтонные элементы обеспечивают необходимую плавучесть платформы и рассчитаны на восприятие различных внешних воздействий, включая ветровые и волновые нагрузки. Благодаря применению полимерных материалов, преимущественно полиэтилена высокой плотности, такие поплавки обладают высокой устойчивостью к ультрафиолетовому излучению, влаге и коррозионным процессам, что позволяет эксплуатировать их в течение длительного времени без значительного технического обслуживания.

Одним из первых коммерчески реализованных решений подобного типа стала модульная понтонная система Hydrelis, предложенная компанией Ciel & Terre в 2011 году [21]. Данная технология предполагает использование отдельных поплавковых элементов, на которых непосредственно размещаются фотоэлектрические модули. В дальнейшем аналогичные конструктивные решения были разработаны и другими производителями плавучих платформ. По сравнению с конструкциями первого класса такие системы характеризуются более низкой стоимостью и высокой технологичностью монтажа. Вместе с тем их конструкция имеет ограниченные возможности регулирования угла наклона солнечных панелей, что может снижать гибкость применения в различных географических широтах.

Особенностью платформ второго класса является значительная площадь контакта с водной поверхностью, которая может достигать примерно 40–50 % общей площади станции. Такой контакт способствует более интенсивному теплообмену между фотоэлектрическими модулями и водной средой, что приводит к снижению рабочей температуры модулей и, как следствие, повышению их энергетической эффективности. Однако увеличение площади контакта с водой может также ускорять старение некоторых полимерных элементов конструкции и требовать более тщательного контроля состояния материалов. Кроме того, относительно небольшая жёсткость модульной структуры приводит к усложнению системы якорения: для обеспечения устойчивости станции обычно применяется многоточечная схема швартовки с использованием нескольких тросовых линий. Несмотря на эти ограничения, понтонные системы данного типа остаются наиболее распространёнными решениями для пресноводных акваторий и способны устойчиво функционировать при высоте волн до 1 м [18, 20].

Различные варианты конструктивного исполнения понтонов второго класса представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Конструкция плавучей платформы второго класса

Благодаря модульной архитектуре и сравнительно невысокой стоимости изготовления понтонные платформы второго класса стали первым типом плавучих конструкций, получившим широкое коммерческое распространение в проектах плавучих солнечных электростанций. Именно на основе этой технологической концепции были разработаны многие современные системы плавучей солнечной генерации, применяемые в различных странах мира. Среди наиболее известных производителей подобных платформ можно выделить компании Sungrow, Ciel & Terre, Northman Energy Technologies и Sumitomo Mitsui, которые предлагают собственные конструктивные решения поплавковых модулей и систем крепления фотоэлектрических панелей. Помимо крупных производителей, на рынке присутствует также значительное число более мелких компаний, разрабатывающих модификации понтонных элементов, адаптированные к различным условиям эксплуатации и характеристикам водоёмов.

2. Полупогружные плавучие конструкции. Одним из перспективных направлений развития конструкций ПСЭС являются полупогружные платформы, в которых ФЭМ располагаются непосредственно на поверхности воды либо частично погружаются в неё. Такое конструктивное решение позволяет снизить аэродинамическую нагрузку на панели, поскольку ветровое воздействие на элементы, находящиеся ближе к уровню воды, значительно уменьшается. Вместе с тем модули могут подвергаться воздействию волновых колебаний, что предъявляет повышенные требования к прочности креплений и устойчивости всей платформы.

Подобные конструкции преимущественно применяются в глубоководных акваториях. В таких условиях энергия волн постепенно уменьшается с глубиной, поэтому частично погружённые модули оказываются менее подвержены как ветровым, так и волновым воздействиям. Однако использование водной среды в качестве охлаждающего и защитного фактора имеет и определённые ограничения. Вода обладает способностью поглощать и рассеивать солнечное излучение, в результате чего уменьшается интенсивность доступного светового потока и изменяется его спектральный состав. При прохождении через водный слой солнечный спектр частично фильтруется, причём наиболее сильно ослабляются длинноволновые компоненты, тогда как доля зелёно-синей части спектра возрастает. Это необходимо учитывать при оценке энергетической эффективности таких систем [15, 22].

Экспериментальные исследования показывают, что даже небольшой слой воды между модулем и окружающей средой способен заметно влиять на температурный режим работы фотоэлектрических элементов. В частности, установлено, что погружение панелей на глубину порядка нескольких сантиметров может приводить к снижению их рабочей температуры и, как следствие, к повышению эффективности преобразования энергии и увеличению срока службы модулей [15, 22].

Концепция полупогружных конструкций во многом заимствует инженерные решения, ранее применявшиеся в морских платформах нефтегазовой отрасли, где полупогружные сооружения используются для работы на больших и сверхглубоких глубинах [23]. Применение аналогичных принципов в плавучих фотоэлектрических системах позволяет повысить устойчивость платформ и расширить диапазон возможных мест размещения станций.

К преимуществам полупогружных платформ относят более стабильный температурный режим работы солнечных модулей, частичный эффект самоочищения поверхности панелей и меньшее визуальное воздействие на окружающий ландшафт. Однако динамическое воздействие волн на элементы конструкции остаётся одним из ключевых инженерных факторов, требующих учёта при проектировании. В связи с этим в современных разработках предложены различные варианты реализации подобных систем, среди которых наиболее распространёнными являются мембранные и гибкие конструкции, предназначенные для повышения устойчивости модулей к гидродинамическим нагрузкам.

Мембранные плавучие конструкции. Мембранные конструкции ПСЭС представляют собой один из вариантов полупогружных платформ, в которых ФЭМ размещаются на гибкой опорной мембране и располагаются непосредственно на поверхности воды или под тонким водным слоем. В некоторых проектах модули могут частично погружаться на глубину до нескольких метров, что позволяет уменьшить воздействие ветровых нагрузок и повысить устойчивость конструкции при умеренном волнении.

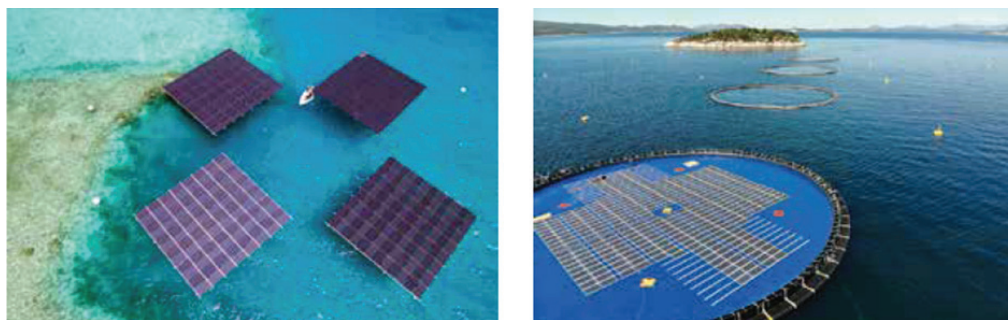


Рисунок 4 – Примеры конструкций жёстких погружных плавучих платформ

Характерной особенностью таких систем является возможность регулирования плавучести за счёт изменения объёма воды в поплавковых элементах. При необходимости платформа может частично погружаться или подниматься на поверхность, обеспечивая адаптацию к изменяющимся гидродинамическим условиям. Это позволяет повысить устойчивость станции в условиях волнения и уменьшить механические нагрузки на конструктивные элементы.

Примеры конструктивного исполнения мембранных платформ приведены на рисунке 4.

Гибкие плавучие системы. Другим направлением развития плавучих платформ ПСЭС являются гибкие конструкции, в которых основную роль играет эластичная основа, способная повторять форму водной поверхности. Такие системы могут реализовываться двумя основными способами: с использованием тонкоплёночных ФЭМ либо с применением традиционных кремниевых модулей, размещённых на гибкой мембранной подложке.

В первом случае используются тонкоплёночные солнечные элементы, обладающие высокой гибкостью и небольшим весом. Такие панели могут размещаться непосредственно на поверхности воды, а их положение стабилизируется с помощью боковых поплавков или кольцевых буйев. Подобные системы рассматриваются прежде всего для морских и офшорных энергетических проектов, где требуется высокая адаптивность конструкции к волновым нагрузкам. Один из вариантов реализации гибкой платформы показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Конструкция гибкой погружной ПСЭС

В представленных конструкциях обычно применяются тонкоплёночные солнечные элементы на основе аморфного кремния. Их основными преимуществами являются небольшой расход материала, высокая гибкость и малая масса, что позволяет отказаться от массивных понтоновых конструкций. Кроме того, непосредственный контакт с водной поверхностью способствует естественному охлаждению модулей и частичному самоочищению их поверхности. Благодаря небольшой жёсткости такие системы лучше адаптируются к воздействию волн и снижают риск механических повреждений при столкновении с плавающими объектами [18, 22].

С гидродинамической точки зрения гибкие платформы обладают способностью повторять форму волновой поверхности, что уменьшает динамические нагрузки на конструкцию. Это позволяет применять более простые и менее нагруженные системы якорения и швартовки, что особенно важно для морских плавучих солнечных электростанций. Однако подобные решения имеют и ряд ограничений. В частности, в таких системах практически отсутствует возможность изменения угла наклона солнечных модулей или установки солнечных трекеров. Кроме того, колебания поверхности воды могут

приводить к изменению ориентации модулей и уменьшению плотности выработки энергии по сравнению с традиционными понтонными платформами.

Одной из известных концепций гибких плавучих систем является технология SUNdy, предложенная компанией Det Norske Veritas (DNV) для морских энергетических проектов. В данной системе массив ФЭМ формируется в виде шестиугольной структуры, напоминающей паутину, в центре которой располагается трансформаторная станция, обеспечивающая передачу электроэнергии на береговую инфраструктуру.

Другим примером является технология Ocean Sun, в которой стандартные кристаллические кремниевые ФЭМ размещаются на армированной гибкой мембране. Такая мембрана поддерживается кольцевым поплавком из полиэтилена высокой плотности, обеспечивающим плавучесть всей конструкции. За счёт непосредственного контакта мембраны с водой обеспечивается эффективное охлаждение ФЭМ, что приводит к снижению их рабочей температуры и повышению энергетической эффективности. По данным экспериментальных исследований, уменьшение воздушного зазора между модулем и поверхностью воды может обеспечить увеличение выработки электроэнергии примерно на 5 % по сравнению с традиционными понтонными платформами [22].

Проблемы и вызовы на пути внедрения плавучих солнечных электростанций. Несмотря на разнообразие конструктивных решений и значительный потенциал технологий плавучей солнечной генерации, их практическое внедрение сопровождается рядом инженерных, эксплуатационных и экологических вызовов. Масштаб и характер этих проблем зависят от типа плавучей платформы, условий водоёма и климатических особенностей региона.

1. Инженерно-конструктивные вызовы. Работа ПСЭС в водной среде предъявляет повышенные требования к материалам и механической устойчивости платформ. Понтонные и трубчато-рамные системы подвержены воздействию волн, ветра и вибраций, что требует применения коррозионно-стойких материалов. Существенным фактором является изменение уровня воды и локальная турбулентность, особенно на водохранилищах ГЭС.

2. Швартовка и динамическая устойчивость. Надёжная система якорения – ключевой элемент ПСЭС. Ошибки в выборе схемы швартовки могут приводить к дрейфу массива, повреждению соединений и нарушению работы кабельной инфраструктуры. Чем крупнее станция, тем выше требования к расчёту натяжения и амортизирующей способности швартовочных линий.

3. Климатические и гидрологические ограничения. В регионах с ледовыми нагрузками, резкими перепадами температур или сильными ветрами (включая высокогорные районы) конструкции ПСЭС могут испытывать критические нагрузки. В морских акваториях возрастает влияние солёной воды и экстремальных волн, что требует применения специально усиленных платформ.

4. Электротехнические риски. Повышенная влажность, возможность подтопления и воздействие водяных аэрозолей требуют использования герметичных коннекторов, влагозащищённых кабелей и устойчивых к коррозии инверторов. Регулярное обслуживание необходимо для предотвращения деградации контактов и потери эффективности.

5. Экологические и нормативные вызовы. Крупные ПСЭС могут изменять световой режим воды, влияя на локальные экосистемы. Дополнительным риском является деградация полимерных материалов. Недостаток национальных нормативов усложняет согласование проектов, поскольку во многих странах отсутствуют стандарты для плавучих СФЭС; исключение составляет международный документ DNV-RP-0584, который пока используется добровольно.

Таким образом, существующие проблемы и вызовы, сопровождающие внедрение ПСЭС, определяют необходимость комплексного подхода к их проектированию, эксплуатации и интеграции в энергосистемы. Учитывая выявленные технические, экологические и институциональные ограничения, представляется важным оценить их влияние на дальнейшее развитие технологии и сформулировать общие выводы по итогам исследования.

Выводы. Плавающие солнечные электростанции демонстрируют высокий потенциал как в мировом масштабе, так и в энергетической системе Кыргызстана. Быстрый рост установленной мощности, снижение стоимости технологий и доступность конструктивных решений делают ПСЭС эффективным инструментом расширения генерации. Пилотные проекты в республике подтвердили техническую реализуемость технологии и её высокую производительность в горных климатических условиях.

Несмотря на инженерные и нормативные вызовы, ПСЭС имеют значительные перспективы развития, особенно при интеграции с системами накопления энергии и гидрогенерацией. Технология может стать ключевым компонентом устойчивого энергетического развития страны.

Поступила: 04.03.2026; рецензирована: 18.03.2026; принята: 20.03.2026.

Литература

1. *Acharya M., Devraj S.* Floating Solar Photovoltaic (FSPV): A Third Pillar to Solar PV Sector. New Delhi: TERI, 2019. URL: <https://www.teriin.org/sites/default/files/2020-01/floating-solar-PV-report.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).
2. *Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners.* World Bank Group, ESMAP, SERIS, 2019. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/418961572293438109/pdf/Where-Sun-Meets-Water-Floating-Solar-Handbook-for-Practitioners.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).
3. *Future Market Insights.* Floating Solar PV Market Report 2025-2035. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/floating-solar-pv-market> (дата обращения: 24.10.2025).
4. *De Andrade Gonçalves L., Faria L., Mannich M., Coelho M., Andreza Rigotti J., Bleninger T., Ricardo Simoes Vitule J.* A Systematic Review of Floating Photovoltaic Plant Environmental Impacts // *Journal of Sustainable Development.* 2025. Vol. 18(1). Pp. 1–94. URL: https://www.researchgate.net/publication/388222971_A_Systematic_Review_of_Floating_Photovoltaic_Plant_Environmental_Impacts (дата обращения: 13.03.2026).
5. *Global Floating Solar Panels Market Report 2025–2032.* URL: <https://www.stellarmr.com/report/floating-solar-panels-market/2608> (дата обращения: 24.10.2025).
6. *Micheli L., Talavera D.* Economic feasibility of floating photovoltaic power plants // *Renewable Energy.* 2023. Vol. 211. Pp. 607–616. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148123006250> (дата обращения: 13.03.2026).
7. *Manolache M., Ionelia Manolache A., Andrei G.* Floating Solar Energy Systems: A Review of Economic Feasibility and Cross-Sector Integration with Marine Renewable Energy, Aquaculture and Hydrogen // *Journal of Marine Science and Engineering.* 2025. Vol. 13 (8). P. 1404. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/8/1404> (дата обращения: 13.03.2026).
8. *Market Growth Reports.* Floating Solar Panels Market Analysis and Forecast to 2033. URL: <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/floating-solar-panels-market-103439> (дата обращения: 25.10.2025).
9. *NREL.* Solar Energy Update. Winter 2025. URL: <https://docs.nrel.gov/docs/fy25osti/93310.pdf> (дата обращения: 11.10.2025).
10. *Global Floating Solar Market Report.* World Bank Group, ESMAP, SERIS, 2019. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/670101560451219695/pdf/Floating-Solar-Market-Report.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).
11. *В Кыргызстане успешно работает первая плавающая солнечная электростанция // Экономика СНГ.* URL: <https://e-cis.info/news/567/129273/> (дата обращения: 20.10.2025).
12. *На Токтогульской ГЭС построят две плавающие солнечные электростанции // 24.kg.* URL: https://24.kg/ekonomika/312390_natoktogulskoy_ges_postroyat_dve_plavuchie_solnechnye_elektrostantsii/ (дата обращения: 22.10.2025).
13. *Posmitny V., Shurkalov P.* Assessment of the Technical Energy Potential of Floating Solar Generation in the Kyrgyz Republic // *Proc. ICIEAM.* 2025. Pp. 201–206. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11028426> (дата обращения: 13.03.2026).
14. *Global Solar Atlas.* World Bank Group. URL: <https://globalsolaratlas.info/map> (дата обращения: 25.10.2025).
15. *DNV GL AS.* Recommended Practice DNV-RP-0584: Design, Development and Operation of Floating Solar Photovoltaic Systems. 2021. URL: <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-0584-design-development-and-operation-of-floating-solar-photovoltaic-systems/> (дата обращения: 13.03.2026).

16. *Kichou S., Skandalos N., Wolf P.* Floating photovoltaics performance simulation approach // *Heliyon*. 2022. Vol. 8. Pp. 1–24. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402203184X/pdf?md5=6734c5083bd6f98ffd6c004edc6ab6ce&pid=1-s2.0-S240584402203184X-main.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).
17. *Maia C.B., Diniz A.S.A.C., Bonfim S.A., Kazmerski L.L.* Evaluation of the electrical parameters and performance of floating PV generators // *Renewable Energy and Environmental Sustainability*. 2024. URL: https://www.rees-journal.org/articles/rees/full_html/2024/01/rees230044/rees230044.html (дата обращения: 13.03.2026).
18. *Sahu A., Yadav N., Sudhakar K.* Floating photovoltaic power plant: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116304841?via%3Dihub> (дата обращения: 13.03.2026).
19. *Trapani K., Santafé M.R.* A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013 // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2015. Vol. 23 (4). Pp. 524–532. URL: https://www.researchgate.net/publication/260410944_A_review_of_floating_photovoltaic_installations_2007–2013 (дата обращения: 13.03.2026).
20. Technology Collaboration Programme. IEA. Floating Photovoltaic Power Plants: A Review of Energy Yield, Reliability, and Maintenance. 2025. URL: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/04/IEA-PVPS-T13-31-2025-REPORT-Floating-PV-Plants.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).
21. Hydrelia® aiR Optim: The Proven Floating Solar Technology // *Ciel & Terre*. URL: <https://ciel-et-terre.net/our-products/hydreliaair-optim> (дата обращения: 26.10.2025).
22. *Yan X., Dai C., Yao Y., Lian J., Gao X., Liu H.* Research Status and Development Trend of Floating Photovoltaic Structure Systems // *Mar. Energy Res*. 2025. Vol. 2 (1). Pp. 1–23. URL: https://www.sciepublish.com/files/article/480/mer00774_pdf.pdf (дата обращения: 13.03.2026).
23. Semi-Submersible Drilling Platform. Baidu Baike. URL: https://baike.baidu.com/item/fromModule=lemma_search-box (дата обращения: 22.10.2025).