ДВУСТОРОННИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Н.Р. Авезова
Ташкентский государственный технический университет
Н.А. Матчанов
Ташкентский государственный технический университет
А.А, Кучкаров
Ферганский государственный технический университет
А.А. Абдураимов
Ферганский государственный технический университет

Аннотация: В обзорной статье представлен всесторонний анализ двусторонних фотоэлектрических систем (bifacial PV). Цель работы – обобщить современное состояние исследований данной технологии, включая классификацию двусторонних солнечных модулей и установок, результаты экспериментальных исследований и методы моделирования их работы, а также оценить экономическую и экологическую эффективность этих систем. В качестве основных методов использован аналитический обзор отечественных и зарубежных литературных источников последних лет, в том числе сравнительный анализ результатов полевых экспериментов и вычислительных моделей. Показано, что двусторонние фотоэлектрические модули способны генерировать на 5–20% больше энергии по сравнению с односторонними аналогами за счёт использования отраженного от окружающих поверхностей солнечного излучения. Обсуждаются оптимальные параметры таких систем (углы наклона, высота установки, наличие отражателей и т.д.) и их влияние на прирост выработки. Приведены данные о снижении удельной стоимости выработки электроэнергии (LCOE) и ускорении окупаемости при использовании двусторонних модулей в различных климатических условиях. Основные выводы свидетельствуют о существенных преимуществах двусторонних ФЭС в условиях высокого альбедо поверхности и интенсивной инсоляции, а также о перспективности их применения в архитектурной интеграции и агрофотоэлектрических установках.

Ключевые слова: двусторонние фотоэлектрические системы; солнечная энергия; двусторонние солнечные модули; альбедо; моделирование; экономическая эффективность; экологическая эффективность;

ISSN 3030-3907

агрофотоэлектрические системы; пустынный климат; возобновляемая энергетика.

Annotatsiya. Ushbu maqolada ikki tomonlama fotoelektrik tizimlarning (bifacial PV) har tomonlama tahlili keltirilgan. Ishning maqsadi ikki tomonlama quyosh modullari va qurilmalarining tasnifi, eksperimental tadqiqotlar natijalari va ularning ishlashini modellashtirish usullarini o‘z ichiga olgan ushbu texnologiya bo‘yicha tadqiqotlarning hozirgi holatini umumlashtirish, shuningdek, ushbu tizimlarning iqtisodiy va ekologik samaradorligini baholashdan iborat. Asosiy usullar sifatida so‘nggi yillardagi mahalliy va xorijiy adabiyot manbalarining tahliliy sharhi, shu jumladan dala tajribalari va hisoblash modellari natijalarining qiyosiy tahlili qo‘llanilgan. Ikki tomonlama fotoelektrik modullar atrofdagi sirtlardan qaytgan quyosh nurlanishidan foydalanish hisobiga bir tomonlama analoglarga nisbatan 5-20% ko‘proq energiya ishlab chiqarish qobiliyatiga ega ekanligi ko‘rsatilgan. Bunday tizimlarning optimal parametrlari (qiyalik burchaklari, o‘rnatish balandligi, qaytargichlarning mavjudligi va h.k.) va ularning ishlab chiqarish o‘sishiga ta’siri muhokama qilinadi. Turli iqlim sharoitlarida ikki tomonlama modullardan foydalanganda elektr energiyasi ishlab chiqarishning solishtirma xarajatlarini (LCOE) kamaytirish va o‘zini qoplashni tezlashtirish bo‘yicha ma’lumotlar keltirilgan. Asosiy xulosalar yuqori sirt albedosi va intensiv insolyatsiya sharoitida ikki tomonlama FESlarning sezilarli afzalliklarini, shuningdek, ularni me’moriy integratsiya va agrofotoelektrik qurilmalarda qo‘llash istiqbollarini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: ikki tomonlama fotoelektrik tizimlar; quyosh energiyasi; ikki tomonlama quyosh modullari; albedo; modellashtirish; iqtisodiy samaradorlik; ekologik samaradorlik; agrofotoelektrik tizimlar; cho‘l iqlimi; qayta tiklanadigan energetika.

Annotation: The review article presents a comprehensive analysis of bifacial photovoltaic systems (bifacial PV). The objective of the work is to summarize the current state of research into this technology, including the classification of bifacial solar modules and installations, the results of experimental studies and methods for modeling their operation, as well as to assess the economic and environmental efficiency of these systems. The main methods used are an analytical review of domestic and foreign literary sources of recent years, including a comparative analysis of the results of field experiments and computational models. It is shown that bifacial photovoltaic modules are capable of generating 5–20% more energy than single-sided analogs due to the use of solar radiation reflected from surrounding surfaces. The optimal parameters of such systems (tilt angles, installation height, presence of reflectors, etc.) and their impact on generation gain

ISSN 3030-3907

are discussed. Data on a reduction in the specific cost of electricity generation (LCOE) and an acceleration of payback when using bifacial modules in various climatic conditions are provided. The main findings indicate significant advantages of bilateral PV systems in conditions of high surface albedo and intense insolation, as well as the prospects for their use in architectural integration and agrophotovoltaic installations.

Key words: bifacial photovoltaic systems; solar energy; bifacial solar modules; albedo; modeling; economic efficiency; environmental efficiency; agrophotovoltaic systems; desert climate; renewable energy.

Введение

Фотоэлектрические модули с двусторонней чувствительностью (бифациальные панели) способны улавливать солнечное излучение как с лицевой, так и с тыльной стороны, за счет чего генерируют больше энергии по сравнению с традиционными односторонними панелями [1, 2]. Такая конструкция позволяет повысить выработку электроэнергии на единицу площади на **5–30%** в реальных условиях, а при оптимальных параметрах — вплоть до **30%** относительно обычных модулей. Кроме того, двусторонние (бифациальные) панели лучше используют рассеянный свет и отраженное от окружающих поверхностей излучение. Экспериментально показано, что в пасмурные дни при низкой освещенности их относительная генерация выше, чем у монолицевых модулей. Эти преимущества вызвали взрывной рост интереса к двусторонним фотоэлектрическим системам (ФЭС) за последнее десятилетие. По мере совершенствования технологий и снижения стоимости модулей, бифациальные системы быстро переходят из категории инноваций в новую отраслевую норму. Согласно прогнозам *International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV)*, к 2032 году доля двусторонних солнечных элементов на рынке может достигнуть 85% [2]. Уже сегодня крупные проекты по всему миру активно внедряют двусторонние панели, а мировой рынок бифациальных модулей, по оценкам, вырастет с $92 млрд в 2023 году до $187 млрд к 2028 году [1].

В связи с чем в данном обзоре рассматриваются основные направления разработки и применения фотоэлектрических систем с двусторонними фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП). Обсуждаются типы и классификация таких систем, результаты полевых испытаний, модели расчета и оптимизации, экономическая и экологическая эффективность, а также опыт применения в различных климатических и архитектурных условиях. В заключение сформулированы выводы и перспективы развития технологий двусторонней солнечной генерации.

ISSN 3030-3907

Энергетическая политика Узбекистана и ориентиры на ВИЭ. Энергетический сектор Узбекистана проходит через период трансформации в соответствии с принятыми государственными стратегиями развития. Правительство ставит целью снизить углеродоёмкость экономики и увеличить долю возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергобалансе. В частности, Энергетическая стратегия Республики Узбекистан до 2030 года и утверждённая Концепция перехода к “зелёной” экономике предусматривают масштабное развитие солнечной и ветровой энергетики. К 2030 году планируется довести установленную мощность ВИЭ до 15 ГВт и обеспечить выработку свыше 30% электроэнергии за счёт возобновляемых источников. Близлежащая цель – достичь 25%-й доли генерации из ВИЭ уже к 2026 году согласно «Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 гг.». Эти цели подкрепляются международными обязательствами страны: так, национальная стратегия по сокращению выбросов парниковых газов (НПО) нацелена на снижение удельных выбросов CO_2 на 35% к 2030 году от уровня 2010 г. Такая политическая поддержка создала прочные предпосылки для инвестиций в «зеленую» энергетику и делает актуальным внедрение передовых солнечных технологий, включая двусторонние фотоэлектрические системы [28].

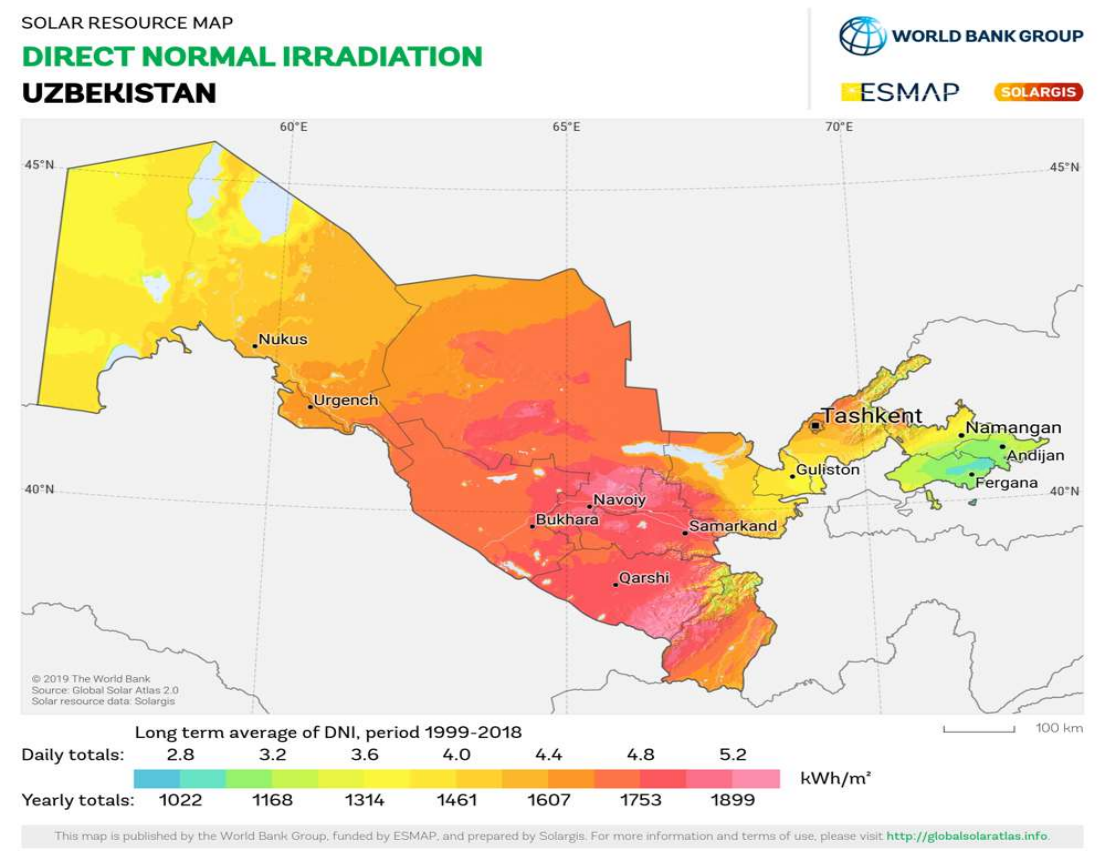


Рисунок-1. Среднегодовое распределение прямой нормальной солнечной радиации (DNI) по территории Узбекистана. Максимальные

ISSN 3030-3907

значения (красно-оранжевые области) сконцентрированы в пустынных регионах юга и центра страны – например, в Кашкадарьинской, Сурхандарьинской и Навоийской областях – что указывает на высокий солнечный потенциал этих зон. Минимальная инсоляция отмечается в долине Фергана (восточные области) [30].

Потенциал солнечной энергетики в Узбекистане. Узбекистан обладает одним из самых значительных солнечных ресурсов в регионе: в стране насчитывается порядка 320 солнечных дней в году. Совокупный технический потенциал солнечной энергетики оценивается примерно в **2 058 млрд кВт·ч в год**, что примерно в 30 раз превышает текущее годовое потребление электроэнергии в республике [31]. В пересчёте на установленную мощность это соответствует порядка *2–3 тыс. ГВт* потенциальных солнечных установок.

Данная цифра, многократно превосходящая потребности даже отдалённого будущего энергосистемы. Разумеется, практическое освоение этого потенциала ограничено инфраструктурными и экономическими факторами, однако даже его небольшая доля способна радикально изменить структуру генерации. Географически наибольший солнечный потенциал сосредоточен на юге и юго-западе республики – в Сурхандарьинской, Бухарской, Кашкадарьинской областях – где уровень инсоляции позволяет получать ~1680–1700 кВт·ч энергии в год с каждого установленного кВт солнечных панелей. Для сравнения, в северо-восточных регионах (области Ферганской долины) потенциал ниже, однако даже там средняя годовая генерация с 1 кВт солнечных модулей превышает 1200–1300 кВт·ч. Эти оценки подтверждают широкую пригодность территории Узбекистана для внедрения промышленных солнечных электростанций [29].

Текущие проекты солнечной генерации и международное сотрудничество. Для реализации упомянутого потенциала Узбекистан активно привлекает международных инвесторов и финансовые институты. В последние годы запущена серия проектов солнечной и ветровой генерации на условиях государственно-частного партнёрства. По состоянию на конец 2023 г. в стадии реализации находятся 19 проектов солнечных электростанций общей установленной мощностью ~3977 МВт, а также 7 проектов ВЭС (ветропарков) суммарно на ~3100 МВт. К работе в стране привлечены крупнейшие зарубежные компании, специализирующиеся на возобновляемой энергетике: среди них Masdar (ОАЭ), ACWA Power (Саудовская Аравия), Total Eren и Voltalia (Франция), китайская Gezhouba Group, швейцарская Tepelen и др. Общий объём иностранных инвестиций в

ISSN 3030-3907

эти проекты оценивается более чем в $9 млрд., причём финансирование осуществляется при поддержке международных банков развития (включая ЕБРР, АБР и др.). Благодаря планомерной работе уже достигнуты первые существенные результаты: в августе 2021 года введена в эксплуатацию первая крупная солнечная фотоэлектрическая станция мощностью 100 МВт в Навоийской области, а в мае 2022 года заработала вторая СЭС аналогичной мощности в Самаркандской области [9].

В 2023–2024 гг. ожидается ввод в строй ряда новых солнечных парков, включая проект «Шерабад» мощностью ~457 МВт в Сурхандарьинской области – одном из крупнейших в Центральной Азии. По оценкам Министерства энергетики, совокупная мощность солнечных и ветровых электростанций в стране превысит 8 ГВт уже к 2026 году [10].

Таким образом, Узбекистан сегодня становится одной из точек притяжения для глобальных инициатив в сфере ВИЭ, что делает особенно важным выбор эффективных технологий солнечной генерации.

Основная часть. На фоне стремительного роста солнечной энергетики актуальным становится внедрение инновационных технических решений, повышающих эффективность фотоэлектрических станций. Двусторонние фотоэлектрические системы (bifacial PV), способные улавливать солнечную радиацию с обеих сторон панелей, рассматриваются как перспективная технология для условий Узбекистана. Высокая интенсивность прямого солнечного излучения в сочетании с большим количеством отражённой от грунта радиации (особенно на светлых песчаных почвах пустынь) позволяет таким установкам генерировать существенно больше энергии по сравнению с традиционными односторонними модулями [11]. Экспериментальные данные показывают прирост выработки порядка +5–10% в реальных условиях эксплуатации при использовании двусторонних панелей, а при оптимальных характеристиках отражающей поверхности (например, светлый грунт, снежный покров) выигрыш может быть ещё выше. Для Узбекистана, планирующего максимально использовать каждый мегаватт своего возобновляемого потенциала, подобная прибавка чрезвычайно ценна. В этом свете крупные солнечные проекты, реализуемые в республике, уже ориентируются на современные двусторонние модули, а тема применения двусторонних ФЭС вызывает повышенный интерес со стороны исследователей и инженеров. Таким образом, развитие двусторонних фотоэлектрических технологий напрямую отвечает приоритетам энергетической политики Узбекистана и является востребованным

ISSN 3030-3907

направлением для дальнейших научно-практических исследований и внедрения [12].

Классификация ФЭС с двусторонними ФЭП. Бифациальные фотоэлектрические системы можно классифицировать по конструкции и области применения. Прежде всего различают стационарные наземные установки с фиксированным углом наклона и системы слежения за солнцем, оснащенные двусторонними модулями. В стационарных системах панели обычно ориентируются на юг (в северном полушарии) под оптимальным углом к горизонту, либо монтируются вертикально с ориентацией восток–запад, чтобы улавливать утреннее и вечернее солнце [2]. Вертикальные двусторонние панели представляют особый интерес: они генерируют пики мощности утром и вечером, дополняя работу традиционных южно-ориентированных станций и помогая выравнивать нагрузку в сети [3]. К тому же вертикальная ориентация обеспечивает естественное самоочищение панелей – на них меньше скапливаются пыль, грязь и снег. В регионах с частыми снегопадами вертикальные бифациальные установки практически не теряют мощности из-за снега, в отличие от наклонных панелей [4].

Другой признак классификации – способ установки и интеграции в объекты инфраструктуры. Бифациальные модули могут устанавливаться на традиционных опорах над землей (например, на высокой раме для увеличения отраженного потока с грунта) или интегрироваться в конструкции зданий и сооружений. Выделяют интегрированные в здания фотомодульные системы (Building-Integrated PV, BIPV) – это фасады и навесы с двусторонними панелями, светопрозрачные кровли, ограждения балконов и др. Например, бифациальные панели могут выполнять роль солнечных фасадных жалюзи или стены Тромба, генерируя электричество и одновременно снижая тепловую нагрузку на здание. Также набирает популярность использование двусторонних модулей в агровольтаике – когда панели устанавливаются вертикально между рядами сельхозкультур или в виде заборов вокруг полей (см. рис. ниже). В этом случае одновременно производится энергия и выращивается урожай на той же земле [13]. Еще одно перспективное направление – плавучие солнечные станции на воде, где двусторонние панели охлаждаются водой и получают дополнительное отраженное излучение от ее поверхности. Наконец, существуют гибридные системы PV/T (фотоэлектрические + тепловые), в которых двусторонние панели сочетаются с тепловыми коллекторами. Пример – двусторонняя фотоэлектрическая тепловая система (BPV/T), оптимизированная по ряду параметров: материалу теплообменника, расходу теплоносителя, углу

ISSN 3030-3907

установки и др., которая показала повышенную совокупную эффективность по сравнению с обычными PV/T. Таким образом, технологии двусторонних ФЭС охватывают широкий спектр конфигураций – от крупных солнечных ферм с отслеживанием до вертикальных городских установок и плавающих или гибридных систем – что свидетельствует об их гибкости и универсальности [14].

Экспериментальные исследования двусторонних ФЭС. Полевая эксплуатация и испытания двусторонних фотоэлектрических систем в разных условиях позволили выявить ключевые факторы, влияющие на их производительность: угол и ориентация панели, альбедо окружающей поверхности, высота установки над землей, запыленность и загрязнение, а также климатические особенности (сезонность, облачность, наличие снега и др.). Ниже рассмотрены основные результаты экспериментов.

Угол установки и ориентация. Во многих регионах оптимальный наклон для двусторонних модулей отличается от такового для монолицевых из-за необходимости баланса между прямым и отраженным светом. Экспериментальные измерения с изменяемым углом показали, что при наклонах от 30° до 90° двусторонние панели продолжают эффективно генерировать энергию за счет тыльной стороны. В одном исследовании при сравнении модулей, установленных под углами 30°, 45°, 60° и вертикально (90°), выяснилось, что тыльная сторона модуля демонстрировала более высокий КПД, несмотря на меньшее по величине освещение, чем фронтальная сторона. Это объясняется, в частности, снижением рабочих температур и лучшим спектральным составом отраженного света. Кроме того, выяснилось, что вертикальная ориентация (панели, повернутые лицом на восток и запад) в летний период может давать на 3,8–9,2% больше генерации, чем традиционные наклонные установки под тем же углом. Так, в полевых испытаниях в Европе и Азии вертикальные двусторонние модули летом превосходили по выработке оптимально наклоненные южные панели. В других экспериментах найден компромиссный оптимум угла для двусторонних систем. Например, в Багдаде путем измерений установлено, что при высоте панели ~1,2 м оптимальный угол наклона составляет около **49°** – именно такая конфигурация дала максимальную выходную мощность. В целом, рекомендации по углу установки двусторонних ФЭП могут отличаться от стандартных: небольшой дополнительный наклон от вертикали позволяет улавливать больше прямого света, не сильно жертвуя отраженным, тогда как близкая к горизонтальной установка не позволяет эффективно использовать тыльную сторону [12].

ISSN 3030-3907

Высота установки и затенение. Для двусторонних модулей важно, чтобы под ними оставалось достаточно пространства для отраженного света. Если панель слишком близко к земле или крыше, тыльная сторона может получать меньше радиации. Полевые испытания подтверждают, что при увеличении высоты установки от 1 м до 1,6 м выход энергии возрастает, однако после определенной высоты достигается точка насыщения, когда дальнейшее поднятие панели почти не дает прироста [5]. В эксперименте в Багдаде максимум генерации наблюдался при высоте ~1,2 м. При этом важно отсутствие затенения непосредственно под модулем: тень от рамы или опор на отражающей поверхности уменьшает долю используемого отраженного излучения. Полевые измерения в Германии с двусторонними модулями (бифакториальность ~0,6) показали, что даже при относительно невысоком альбедо грунта ~0,2 (трава/почва) можно достичь >**10%** прироста годовой выработки по сравнению с одно-sided аналогом, если панели подняты на достаточную высоту. Этот результат совпал с фактическими данными прототипной установки, подтвердив эффективность расчётной модели [5].

Влияние альбедо (отражающей способности поверхности). Преимущество двусторонних ФЭС наиболее ощутимо на светлых, хорошо отражающих поверхностях. Повышение отражающей способности поверхности под панелями напрямую увеличивает долю тыльного излучения. По результатам обзора 57 мировых кейсов, увеличение альбедо всего на 0,1 (например, покраска крыши в более светлый цвет) приводит к росту генерации энергии двусторонних модулей в среднем на ~4,5%. Для сравнения, у монолицевых модулей аналогичное повышение альбедо дает лишь около +0,7% к выработке [6]. Эксперименты на крыше в Испании продемонстрировали, что применение “холодных” отражающих покрытий (cool roof) способно увеличить выход энергии двусторонней системы на **8,6%** по сравнению с обычной темной крышей. В другом исследовании, имитирующем запыление белой крыши, отмечено, что эффект от высокого альбедо со временем снижается: первоначальный прирост выработки около 17% в первый год эксплуатации уменьшился примерно до 7% на следующий год из-за загрязнения и потери отражающей способности покрытия [8]. Тем не менее даже натуральные поверхности – снег, песок, светлая почва – могут значительно повысить генерацию. Например, в снежном климате двусторонние панели выигрывают дважды: с одной стороны, вертикальная установка предотвращает сильное налипание снега, а с другой – отраженный от снежного покрова свет увеличивает производство энергии. Полевые наблюдения зимой показали, что двусторонние модули теряют всего ~16%

ISSN 3030-3907

выработки из-за снега, тогда как монолицевые теряют до 33%, и в итоге за зимний период бифациальные панели дали на 19% больше энергии [15].

Запыленность и загрязнения. В условиях пустыни и запыленного воздуха двусторонние системы проявляют себя лучше, чем односторонние, за счет особенностей монтажа. Во-первых, вертикально ориентированные панели меньше подвержены накоплению пыли на поверхности (пыль оседает, но сильнее сдувается ветром с вертикально стоящих панелей). Во-вторых, даже если фронтальная сторона частично загрязнена, тыльная может продолжать вырабатывать энергию, улавливая отраженный свет. Полевая тестировка в Катаре (пустынный климат) показала, что вертикальная установка двусторонних модулей уменьшает потери мощности от запыления примерно на **15%** по сравнению с традиционными наклонными монолицевыми панелями. Другое длительное исследование в жарком пустынном климате анализировало деградацию производительности из-за пыли и загрязнений на передней и задней сторонах панелей. Выявлено, что у двусторонних модулей в вертикальной ориентации снижение выходной мощности меньше, чем у наклонных, благодаря тому, что обе стороны периодически получают солнечное облучение и нагрев, что способствует самоочистке. Тем не менее регулярная очистка или специальные покрытия, снижающие адгезию пыли, остаются важными для поддержания эффективности в таких условиях [16].

Климатические особенности. География и климат определяют баланс прямой и диффузной радиации, высоту солнца над горизонтом и длительность дня – все эти факторы влияют на работу двусторонних ФЭС. В высоких широтах с длинными летними днями и низким солнцем бифациальные панели вертикальной ориентации способны эффективно собирать утреннее/вечернее солнце. В то же время в условиях частой облачности двусторонние модули выигрывают за счет лучшего использования рассеянного света. Эксперимент в Великобритании показал, что оптимальными для эффективности двусторонних панелей оказались условия *рассеянного освещения* – при пасмурной погоде КПД возрастал относительно солнечных дней, поскольку тыльная сторона получала больше равномерного освещения небом. Также отмечено, что при высоких температурах эффективность кремниевых модулей падает, но двусторонние системы могут слегка снизить перегрев за счет лучшего теплообмена (обдува) обеих поверхностей.

В совокупности полевые данные из различных климатических зон подтверждают, что применение двусторонние ФЭС особенно эффективны в

ISSN 3030-3907

средах с высоким альбедо (снег, песок, белые крыши), при длинных сумерках или большей доле рассеянного освещения, а также там, где необходима устойчивая работа при сложных условиях (пыль, снег) за счет конструкции панелей [17].

Моделирование и расчётные методы. Для эффективного проектирования двусторонних фотоэлектрических систем были разработаны специализированные модели и инструменты, учитывающие особенности их работы. Расчёт тыльного излучения, оптимизация параметров установки и учет тепловых эффектов – ключевые задачи моделирования таких систем. Ниже рассмотрены основные подходы и методы, применяемые в этой области.

Модели освещенности тыльной стороны. Точное прогнозирование доли энергии, получаемой тыльной поверхностью, – нетривиальная задача, зависящая от геометрии установки и свойств окружающих поверхностей. Распространены два подхода: **метод коэффициентов обзора (view factor)** и **методы трассировки лучей (ray-tracing)**. Метод коэффициентов обзора вычисляет долю небосвода и земли, “видимую” задней стороной панели, на основе геометрии расположения модулей [18]. Он относительно прост, но может давать погрешности. Так, сравнение с более точным **лучевым моделированием** показало, что метод коэффициента обзора имеет тенденцию **переоценивать** освещенность тыльной стороны – в одном исследовании примерно на **6,7%**. Поэтому современные инструменты (например, PVSyst, NREL bifacialVF) используют комбинацию методов: для диффузного излучения – подход view factor, для прямого и отраженного – геометрическое моделирование и трассировку лучей. Разработаны также специальные модели расчета *коэффициента обзора земли* именно для двусторонних ферм с учетом высоты установки и ориентации панелей; одна из работ предложила новый метод, повысивший точность моделирования отраженного излучения до **99%** по сравнению со стандартными допущениями [19].

Интегрированные программы и инструменты. Для комплексного моделирования двусторонних ФЭС применяются модифицированные версии программ вроде PVSyst, TRNSYS, SAM, а также инструменты на основе радиационной модели Radiance и специализированных библиотек (bifacial_radiance от NREL и др.). Некоторые исследования разрабатывают собственные интегрированные инструменты. Например, предложен программный комплекс, сочетающий спектральную модель солнечного излучения SMARTS, фотометрический движок Radiance и модель

ISSN 3030-3907

солнечного элемента PC1D для расчета генерации двусторонних модулей. Этот инструмент позволил учесть влияние окружающих объектов (стен, отражателей и пр.) на освещенность и найти оптимальную конфигурацию; верификация на реальных данных показала высокую точность прогноза. В другой работе реализовано **мультифизическое моделирование** двусторонних панелей в COMSOL с учетом теплообмена, и результаты сопоставлены с расчетами в PVSyst. Такой подход дал представление о влиянии температуры панели на выходную мощность и подтвердил, что при типичных условиях двусторонние модули обеспечивают **на 15–20%** большую годовую генерацию, чем монофациальные, при прочих равных [20].

Оптимизация параметров установки. Одно из направлений расчетных исследований – поиск оптимальных геометрических и эксплуатационных параметров, максимизирующих выработку или минимизирующих стоимость энергии LCOE. Здесь применяются как переборные расчеты, так и алгоритмы оптимизации. Например, метод Response Surface и экспериментальное планирование использовались для анализа чувствительности и нахождения оптимума угла наклона, высоты установки и альбедо поверхности; получено, что средний прирост генерации от применения двусторонних панелей составил ~35,7% относительно монопанелей при близких оптимальных настройках [21]. Среди эвристических методов успешно применялись современные алгоритмы, такие как Harris Hawks Optimization (HHO) и алгоритм светлячков. С помощью HHO была решена задача оптимального размера и конфигурации двусторонней фермы на фиксированном наклоне, что позволило увеличить годовую выработку на 18–48% в сравнении с не оптимизированной схемой размещения. Алгоритм светлячков, нацеленный на максимизацию дополнительной энергии от тыльной стороны, определил, например, оптимальную высоту установки ~1 м для заданной местности, при которой выходная мощность возрастает на 5–45% (в зависимости от альбедо) относительно базового уровня [22].

Учет спектральных и тепловых эффектов. Двусторонние панели по-разному воспринимают прямое и отраженное излучение, которое имеет иной спектральный состав. В моделях начали учитывать спектральное альбедо поверхности. Так, разработан показатель SRI (*spectral reflectance index*), позволяющий корректировать расчет энергии в зависимости от спектра отраженного света; учет этого фактора повысил точность прогноза генерации примерно на **1,7%**. Параллельно интегрируются модели температурной зависимости эффективности: ведь тыльная сторона панелей, получая меньше

ISSN 3030-3907

света, обычно холоднее, что слегка повышает КПД кремниевых элементов. Объединенные модели инсоляции и нагрева прогнозируют суммарный прирост энергии от бифациальной установки, учитывая снижение эффективности при нагреве. Например, в одной работе смоделировано влияние температуры на годовой прирост: оптимальная высота установки 2 м обеспечила дополнительную генерацию от **0% до 20%** (в зависимости от местного климата) именно благодаря лучшему охлаждению и использованию отраженного света [23].

Моделирование экономики и эффективности. Расчетные методы применяются не только для энергии, но и для экономических показателей – прежде всего уровня приведенной стоимости энергии (LCOE) и срока окупаемости. Глобальное моделирование с оптимизацией LCOE показало, что двусторонние солнечные фермы могут иметь преимущество по экономике в широком диапазоне условий [3]. Например, при широтах выше ~30° двусторонние системы с оптимальным углом наклона и межрядовым расстоянием позволяют снизить LCOE проекта на 2–6% по сравнению с монофациальными аналогами. Другой аспект – влияние графика генерации на ценность энергии. Модели сетевого взаимодействия демонстрируют, что вертикальные восток–запад панели, генерируя больше по утрам и вечерам, могут снизить необходимость в накопителях энергии (ESS) до 94% для обеспечения заданного уровня самоснабжения. Таким образом, расчетные исследования двусторонних ФЭС охватывают как техническую оптимизацию (положение, угол, высота, покрытие), так и технико-экономический анализ, формируя основу для их эффективного внедрения [24].

Экономическая эффективность. Бифациальные фотоэлектрические системы привлекают внимание инвесторов не только повышенной выработкой, но и улучшенными экономическими показателями в расчете на единицу установленной мощности. Дополнительная энергия от тыльной стороны распределяется по тем же капитальным затратам, что ведет к снижению уровня LCOE и ускорению возврата инвестиций. Сравнительный анализ для крышных установок мощностью 8 кВт и 1 МВт показал, что двусторонняя система окупается значительно быстрее аналогичной монолицевой. В частности, срок окупаемости для бифациальной станции оценен примерно в 5 лет и 5 месяцев, тогда как для традиционной однофацетной превышает 7 лет [25]. Другие исследования также подтверждают преимущество: например, за 20-летний период эксплуатации совокупная прибыльность инвестиций в двусторонние панели на ~18% выше,

ISSN 3030-3907

чем в обычные PV-системы аналогичной мощности. Учитывая незначительную разницу в стоимости самих модулей (которое с каждым годом снижается за счет массового производства), стоимость электроэнергии (LCOE) для проектов с бифациальными модулями оказывается ниже. В глобальном плане двусторонние электростанции особенно рентабельны в тех широтах и условиях, где их относительная генерация максимальна – например, в умеренном климате Центральной Европы, на высоких широтах или в пустынях с высоким альбедо [3]. Моделирование, как отмечалось, дало оценку снижения LCOE на **2–6%** в пользу двусторонних ферм для широт >30°, а в ряде случаев и более. Таким образом, при прочих равных условиях проект с бифациальными модулями обеспечивает большую прибыль от продажи энергии или позволяет снизить тариф для достижения окупаемости.

Экологическая эффективность и влияние на среду. Двусторонние солнечные системы также демонстрируют экологические преимущества. Во-первых, благодаря более высокой производительности они генерируют больше чистой энергии с той же площади, снижая *углеродный след* на единицу выработки и экономя земельные ресурсы. К примеру, оценка жизненного цикла инновационной двусторонней системы для крыши показала, что применение отражающей поверхности способно увеличить генерацию на 12,7%, тем самым сократив условные выбросы CO_2 на аналогичную величину. Во-вторых, вертикальные и иные бифациальные установки позволяют эффективнее использовать ограниченные пространства: городские крыши, фасады зданий, участки между дорожной инфраструктурой и т.д. Они могут устанавливаться в качестве солнечных заборов или экранов вдоль автомагистралей и железных дорог, не занимая дополнительных земель [4]. Благодаря этому снижается давление на земли, пригодные для сельского хозяйства или природы. В случае агровольтаики совместное использование поля под солнце и урожай повышает показатель использования земли. Например, эксперимент с оливковыми деревьями в сочетании с двусторонними панелями в Италии достиг *коэффициента использования земли* (LER) ≈ 171%, то есть совокупная выходная продукция (энергия + урожай) на 71% выше, чем при раздельном использовании той же площади [26].

Кроме того, двусторонние ФЭС могут благотворно влиять на городскую среду и климат внутри зданий. Применение панелей на фасадах снижает солнечную нагрузку на стены и уменьшает нагрев помещений. Интеграция двусторонних PV в архитектуру может сочетаться с концепцией «холодных крыш» и фасадов: светоотражающие поверхности вокруг панелей

ISSN 3030-3907

не только повышают их выход, но и уменьшают нагрев зданий и островов тепла в городе [7]. Один из примеров – бифациальная PV/T стена Тромба с вентиляционными жалюзи: она показала прирост генерации ~17,5% электроэнергии, одновременно снизив потребность здания в кондиционировании на 21% летом. Таким образом, повышается общая энергоэффективность здания. На уровне энергосистемы, как отмечалось, вертикальные двусторонние фермы смещают выработку на утро и вечер, благодаря чему уменьшается потребность в пиковых газовых электростанциях или батареях для покрытия вечернего спроса [4]. Исследователи из Лейпцигского университета отметили, что такая генерация “в нужное время” способна снизить углеродные выбросы энергетики, поскольку сокращается необходимость ввода резервных мощностей на ископаемом топливе [4].

Наконец, немаловажен и вопрос экологической стойкости самих модулей. Большинство бифациальных панелей изготавливаются по технологии стекло-стекло, что повышает их долговечность (двусторонняя подложка лучше защищает от влаги и микротрещин). Более долгий срок службы означает меньше отходов и реже замену модулей, что тоже позитивно сказывается на экологическом балансе. В целом, двусторонние ФЭС сочетают экономическую выгоду с экологической устойчивостью, способствуя более эффективному переходу к возобновляемым источникам энергии.

Применение в различных климатических и архитектурных условиях. Разнообразие конструкций двусторонних фотоэлектрических систем позволяет эффективно внедрять их в самых разных климатических зонах и приложениях. Рассмотрим опыт и особенности применения бифациальных ФЭС в экстремальных условиях пустынь, на высоких широтах, в городской застройке, в агровольтаике, на воде и др [3].

ISSN 3030-3907

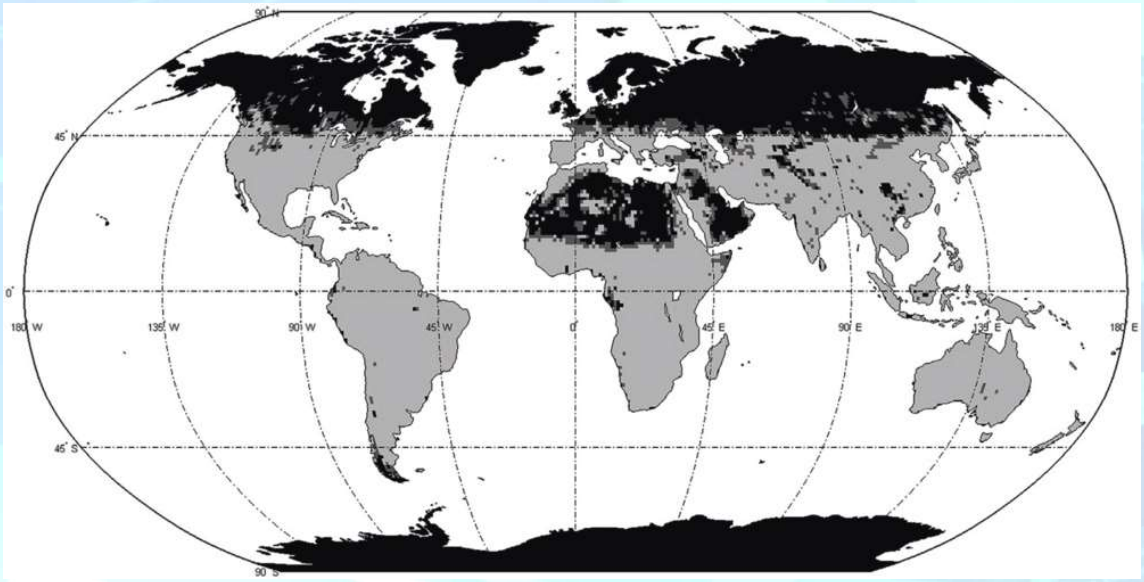


Рисунок-2. Глобальная карта, показывающая регионы, где вертикальные двусторонние PV (черные области) генерируют больше энергии, чем оптимально наклоненные монолицевые системы [3]. Видно преимущество в высоких широтах (Северная Европа, Канада, Южная Америка) и пустынных зонах с высоким альбедо.

Пустынные и засушливые регионы. В пустынях двусторонние ФЭС проявляют себя особенно хорошо благодаря обилию прямого солнца и высокому альбедо песчаных почв. Однако экстремальная жара и пыльные бури создают вызовы. Практический опыт в Катаре (пустыня) с вертикальными восток–запад модулями показал, что они способны не только выдерживать эти условия, но и иметь более стабильную генерацию со временем за счет меньшего пылевого осадка. Вертикальные бифациальные панели там служили своеобразными заборами, ловя отраженный от песка свет. За год их выработка оказалась примерно в 1,4 раза выше, чем у однотипных монолицевых модулей такой же площади. Другое исследование на Ближнем Востоке проанализировало рентабельность двусторонних систем в пустынном климате и подтвердило их высокую эффективность при увеличенной высоте монтажа и наличии отражающей поверхности под модулями. Высокое расположение панелей (например, ≥1 м) в пустыне не только усиливает сбор отраженного излучения, но и уменьшает перегрев модулей за счет свободной циркуляции воздуха. В целом в жарких засушливых условиях двусторонние ФЭС могут превзойти традиционные примерно на 10–20% по годовой генерации (как видно на рис. 1, значительная часть Ближнего Востока отмечена как зона преимущества двусторонних систем) [3]. Главное – обеспечить защиту от чрезмерного

ISSN 3030-3907

запыления (например, периодической очисткой или анти-пылевыми покрытиями) и надежность оборудования при высоких температурах.

Высокие широты и снежные зоны. В северных широтах (как и южных антиподных) продолжительность дня и высота солнца сильно меняются по сезонам. Зимой солнце низкое, часто лежит снег. Летом – длительные дни с косым солнцем утром и вечером. Все это создает благоприятные условия для вертикальных восток–запад двусторонних ферм. Исследования в Финляндии и Норвегии показали, что вертикальные бифациальные установки могут конкурировать по LCOE с традиционными южными системами даже при меньшем совокупном солнечном излучении [3]. Их секрет – более высокая выработка в утренние и вечерние часы, когда электроэнергия ценнее и нагрузка в сети выше [3]. Кроме того, в снегу они значительно выигрывают, как упоминалось: вертикальные панели практически не покрываются снегом, а отражение от снега дает импульс генерации. Эксперименты в Канаде и Скандинавии зафиксировали повышение зимней выработки благодаря отраженному от снега свету и лучшую сбалансированность годового профиля генерации. Таким образом, на высоких широтах (см. рис. 1 – обширные черные области в Канаде, Северной Европе, России) двусторонние системы, особенно вертикальные, становятся **сеть-дружелюбным** решением: они генерируют в то время, когда традиционные панели уже малоэффективны (низкое солнце), что снижает зависимость от других источников или хранения [4]. В сочетании с тем, что двусторонние модули на высокой широте требуют меньшего угла наклона (ввиду низкого солнца, значительная часть лучей все равно отражается от земли), можно использовать более компактные конструкции без трекеров.

Интеграция в здания (BIPV). В городской архитектуре двусторонние модули нашли применение в качестве фасадных элементов, навесов и ограждений, где они выполняют двойную функцию – производство энергии и архитектурно-инженерную. Фасады из бифациальных панелей могут быть установлены вертикально или под углом, часто с воздушным зазором от стены. Они улавливают как прямой солнечный свет, так и отраженный от окружающих построек и земли. В жарком климате применение двусторонних фасадных панелей типа *брис-солей* (солнцезащитные экраны) позволяет не только генерировать электричество, но и затенять здание, уменьшая теплопоступления внутрь. Например, упомянутая двусторонняя стена Тромба с фотомодулями и жалюзи генерирует ~17% больше энергии за счет бивалентного освещения и при этом улучшает микроклимат помещения. Крышные установки с бифациальными модулями, особенно на белых или

ISSN 3030-3907

светлых кровлях, – еще одно направление. В таких системах тыльная сторона панелей принимает отраженный от крыши свет. Полевые испытания на лабораторной крыше показали, что применение светоотражающего покрытия способно дать прирост выработки на 4–9% в зависимости от отражающей способности материала. Также реализуются проекты прозрачных двусторонних крыш: панель пропускает часть света вниз (для естественного освещения помещения), а невоспринимаемый фронтом свет отражается обратно на тыльную сторону, повышая генерацию. Одно из исследований оптимизировало отражающую способность внутренних поверхностей потолка под такой прозрачной двусторонней крышей и добилось увеличения генерации на **~5–19%** при выбеливании потолка (отражательность ~0,8). Таким образом, в зданиях бифациальные панели дают наибольший эффект при комплексном подходе: светлые отражающие материалы вокруг и продуманная ориентация относительно других конструкций.

Агрофотоэлектрические системы. Совмещение солнечных панелей и сельского хозяйства – перспективное решение для повышения эффективности землепользования. Двусторонние модули особенно хорошо подходят для агрофотоэлектрики, так как их вертикальная или приподнятая установка минимально затеняет культуру и одновременно собирает отраженный от почвы свет. Например, вертикальные панели между рядами невысоких культур (север-юг ориентирование панелей лицом на восток и запад) дают полосы тени, которые движутся в течение дня, обеспечивая растениям достаточное освещение для фотосинтеза. Исследование, проведенное для агровольтаики, показало, что вертикальная восточно-западная ориентация двусторонних модулей обеспечивает наилучшее распределение света на земле и наименьшее угнетение роста растений. Более того, электроэнергия генерируется без выведения земли из оборота – это особенно важно для фермерских хозяйств. В примере с оливковой плантацией, упомянутом ранее, оптимальный наклон панелей ~20° позволил добиться суммарного Land Equivalent Ratio = 1.71, т.е. урожай оливок + выработка электричества эквивалентны 171% отдельного использования земли. На практике уже реализованы проекты солнечных ферм-«заборов» на фермах: в штате Колорадо (США) вертикальная бифациальная ограда мощностью 26 кВт установлена между теплицами, снабжая их энергией и не занимая полезную площадь (рис. 2) [4]. Пики ее выработки приходятся на 9 утра и 4 вечера, что соответствует режиму работы фермы [4]. Помимо электроэнергии, была отмечена экономия воды на орошение в тени панелей

ISSN 3030-3907

и естественная защита от ветра. Бифациальные агро-ПВ системы позволяют выращивать многие культуры (трава, картофель, салат и др.) практически без снижения урожайности [4]. Главное – правильно подобрать высоту конструкции и расстояние между рядами, чтобы высокорослые растения не затеняли панели и наоборот.



Рисунок-3. Вертикальная бифациальная солнечная установка в качестве ограды на ферме (Колорадо, США). Панели ориентированы на восток–запад, между теплицами, оптимизируя использование земли [4]. Такая конфигурация позволяет получать энергию, не препятствуя сельскому хозяйству, и дает пики генерации утром и вечером [4].

Плавучие и прибрежные системы. Размещение солнечных панелей на поверхности водоемов – растущий тренд (FPV, floating PV). Двусторонние модули здесь имеют два преимущества: охлаждение водой, повышающее КПД, и значительное отраженное излучение от воды, особенно под малым углом. По оценкам, двусторонние панели на плавучих платформах получают до 55% больше суммарной радиации (прямая + отраженная) по сравнению с наземными монопанелями. В полевых тестах в Великобритании плавучая установка с бифациальными модулями показала прирост эффективности ~6,6% относительно идентичной монофациальной системы. Дополнительное отражение от воды в сочетании с постоянным обдувом (ветер над водой) дает стабильный прирост энергии, особенно в ясные дни. Моделирование оптимальных параметров FPV с двусторонними модулями указывает, что увеличение высоты панели над водой и выбор угла наклона способны дать до 30% дополнительной годовой генерации. В прибрежных районах или на островах, где земля ограничена, плавучие двусторонние электростанции позволяют использовать поверхность водохранилищ или припортовых акваторий. Также рассматривается оффшорное применение: хотя соленый туман и ветер представляют проблему, методики оценки показывают

ISSN 3030-3907

высокий потенциал – за счет отражения от воды и облаков двусторонние панели на воде могут значительно превосходить по выработке наземные аналоги на той же широте.

В целом, примеры из различных регионов мира демонстрируют универсальность двусторонних ФЭС. Они могут быть адаптированы под экстремальную жару пустынь, полярные холода, плотную городскую застройку и сельское хозяйство, сохраняющее продуктивность земли. Ключевыми условиями успешного применения в каждом случае становятся оптимизация конструкции (угол, высота, ориентация) под местные условия и учет специфических факторов – таких как пыль, снег, отражающие поверхности или режим энергопотребления. При правильном подходе бифациальные системы обеспечивают более высокую и устойчивую генерацию, раскрывая потенциал солнечной энергии там, где ранее эффективность была ограничена.

Выводы и перспективы развития технологий двусторонних ФЭП. Развитие бифациальных фотоэлектрических систем за последние годы показало, что эта технология превращается из нишевой в основную на рынке солнечной энергетики. Двусторонние ФЭС доказали свое преимущество в реальных условиях, обеспечивая рост выработки на 10–20% в зависимости от конфигурации и среды. Эксперименты подтвердили эффективность двусторонних модулей в самых разных климатах – от снежных северных широт до пыльных пустынь – и в различных форматах применения (земля, вода, здания, сельское хозяйство). Модели и расчеты позволяют достаточно точно спрогнозировать их работу и оптимизировать дизайн под цели проекта (максимум энергии или минимум LCOE), а экономические оценки демонстрируют ускоренную окупаемость инвестиций. Экологические выгоды включают лучшее использование пространства и снижение углеродного следа выработки электроэнергии [27].

В перспективе ожидается дальнейшее совершенствование технологий двусторонних ФЭП и расширение их использования. Согласно отраслевым прогнозам, к началу 2030-х годов большинство новых солнечных установок будет содержать двусторонние модули [2]. Это стимулирует производителей совершенствовать конструкцию панелей (повышать коэффициент бифакториальности, применять анти-пылевые и антибликовые покрытия) и инверторов (адаптировать MPPT-алгоритмы под двусторонние поля с неоднородным освещением). Одним из направлений развития является стандартизация: необходимы единые методы тестирования и рейтинга двусторонних модулей, учитывающие их тыльный коэффициент и

ISSN 3030-3907

особенности условий испытаний. Уже предложены новые методики стандартизированных измерений для точного прогноза энергии, включая эталонные двусторонние модули для калибровки моделей освещенности.

Продолжатся исследования по интеграции бифациальных систем в энергосети – их влияние на суточный график генерации и на требуемые мощности резервов. Практические примеры (например, вертикальные фермы в Германии, Скандинавии) показывают, что “двусторонний” ток может стать более ценным ресурсом благодаря распределению генерации по времени суток [4]. Это открывает возможности для новых моделей рынка электроэнергии, где устанавливается более высокая цена на утренне-вечернюю солнечную энергию, выдаваемую двусторонними установками. В сельском хозяйстве и градостроительстве бифациальные панели станут неотъемлемой частью проектов по устойчивому развитию: *агровольтаические фермы*, *солнечные города* с активными фасадами и заборами – все это уже не концепты, а реализуемые решения.

Таким образом, двусторонние фотоэлектрические системы зарекомендовали себя как высокоэффективная и экономически оправданная технология солнечной энергетики. Совокупность проведенных исследований и накопленный опыт позволяют с уверенностью утверждать, что за бифациальными ФЭС – существенная роль в будущей энергетике. В ближайшие годы нас ожидает рост внедрения этих систем, дальнейшее повышение их эффективности (возможно, сочетание с хранениям энергии или умными системами управления нагрузкой) и появление новых инновационных конфигураций. Перспективы развития включают улучшение материалов (например, селективных отражателей или спектральных преобразователей для тыльной стороны), расширение применения на транспорте и в инфраструктуре, а также тиражирование успешных пилотных проектов в массовые. Решение текущих технических задач – стандартизации, банковской предсказуемости (bankability) и оптимизации – позволит двусторонним солнечным модулям полностью раскрыть свой потенциал и занять доминирующее положение среди технологий возобновляемой энергетики [2]. Можно ожидать, что двусторонние ФЭС станут одним из ключевых драйверов снижения стоимости солнечной электроэнергии и ускорения энергетического перехода в глобальном масштабе.

Заключение: Двусторонние фотоэлектрические системы обладают особыми преимуществами, которые делают их чрезвычайно актуальными для условий Республики Узбекистан. Страна характеризуется засушливым континентальным климатом с большим числом солнечных дней в году и

ISSN 3030-3907

высоким уровнем прямой солнечной радиации, что создает идеальные предпосылки для эффективной работы двусторонних солнечных модулей. В условиях пустынных и полупустынных районов Узбекистана естественное альбедо грунта (песок, светлая почва) повышает долю отраженного излучения, улавливаемого тыльной стороной модулей, обеспечивая дополнительную выработку электроэнергии. Благодаря этому двусторонние ФЭС могут существенно (на 10% и более) увеличить годовую генерацию по сравнению с традиционными односторонними панелями при аналогичных затратах. Это особенно важно для республики, где ощущается дефицит энергии и стоит задача повышения доли возобновляемых источников. Кроме того, интеграция двусторонних панелей в аграрный сектор (так называемые агрофотоэлектрические системы) перспективна для Узбекистана, крупного производителя сельхозпродукции в орошаемых земледельческих зонах. Размещение полупрозрачных двусторонних модулей над сельскохозяйственными культурами позволяет одновременно вырабатывать электроэнергию и снижать испарение влаги из почвы, создавая благоприятный микроклимат для растений. Это помогает экономить дефицитную воду для орошения, что критично для засушливых регионов. Также двусторонние установки, смонтированные вертикально или с оптимальным наклоном, менее подвержены накоплению пыли и песка – актуальная проблема для Узбекистана, регулярно испытывающего пылевые бури. Меньшее запыление означает снижение затрат воды и труда на очистку панелей и более стабильную генерацию. С учётом намеченных планов страны по наращиванию солнечной генерации и наличия крупных площадей под солнечные электростанции, внедрение двусторонних технологий позволит максимизировать выход энергии с каждой установленной панели и увеличить эффективность использования земли. Уже сейчас в Узбекистане реализуются проекты промышленных солнечных электростанций с применением двусторонних модулей, демонстрируя высокую производительность данной технологии в реальных условиях. Значимость внедрения двусторонних ФЭС для республики заключается не только в росте выработки и экономии ресурсов, но и в содействии устойчивому развитию энергетики. Перспективы включают широкое применение двусторонних фотоэлектрических систем как на больших солнечных фермах в пустынных районах, так и в агроэнергетических установках и на крышах зданий. Это позволит Узбекистану более эффективно использовать свой уникально высокий солнечный потенциал, сократить зависимость от ископаемого топлива, смягчить проблемы водного дефицита в сельском хозяйстве и

ISSN 3030-3907

внести значительный вклад в обеспечение энергетической безопасности и экологии страны. В дальнейшем требуются дополнительные исследования по оптимизации параметров двусторонних ФЭС конкретно под климатические и ландшафтные условия Узбекистана, однако уже существующий международный опыт однозначно указывает на большие перспективы и эффективность данной технологии для региона.

Список литературы

1. [Global Bifacial Solar Market Set to Surge, Reaching $187.1 Billion by 2028, BCC Research Analyst Predicts. URL: https://www.bccresearch.com/pressroom/egy/global-bifacial-solar-market-set-to-surge-reaching-1871-billion-by-2028?srsltid=AfmBOoo5UYaejP1zem1FSY42QJ7FAkuuW-qbzWoBqxFj8mQB5GQ3R3xQ#:~:text=Boston%3AThe%20,sides%2C%20making%20them%20more%20efficient. (Accessed 02.04.2025)

2. Yakubu, R. O., Mensah, L. D., Quansah, D. A., & Adaramola, M. S. (2024). A systematic literature review of the bifacial photovoltaic module and its applications. The Journal of Engineering, 2024(8), e12421.

3. Creative thinking for vertical east-west bifacial PV projects. PV magazine. URL: https://www.pv-magazine.com/2022/03/24/creative-thinking-for-vertical-east-west-bifacial-pv-projects/#:~:text=The%20Finnish,projects%20provide%20their%20maximum%20yield. (Accessed 02.04.2025)

4. Vertical Bifacial Solar Panels Boost Energy, Save Space, and Reduce Emissions. Solar Washington. URL: https://www.solarwa.org/vertical_bifacial_solar_panels#:~:text=PVs%20mounted%20vertically%20tend%20to,also%20adds%20to%20their%20productivity. (Accessed 02.04.2025)

5. Wang, S., Wilkie, O., Lam, J., Steeman, R., Zhang, W., Khoo, K. S., ... & Rostan, H. (2015). Bifacial photovoltaic systems energy yield modelling. Energy Procedia, 77, 428-433.

6. Vasilakopoulou, K., Ulpiani, G., Khan, A., Synnefa, A., & Santamouris, M. (2023). Cool roofs boost the energy production of photovoltaics: Investigating the impact of roof albedo on the energy performance of monofacial and bifacial photovoltaic modules. Solar Energy, 265, 111948.

7. Rahmani, F., Robinson, M. A., & Barzegaran, M. R. (2021). Cool roof coating impact on roof-mounted photovoltaic solar modules at texas green power microgrid. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 130, 106932.

ISSN 3030-3907

8. Mühleisen, W., Loeschnig, J., Feichtner, M., Burgers, A. R., Bende, E. E., Zamini, S., ... & Georghiou, G. E. (2021). Energy yield measurement of an elevated PV system on a white flat roof and a performance comparison of monofacial and bifacial modules. Renewable Energy, 170, 613-619.
9. Re-Powering of Uzbekistan by Public-Private Partnerships – A Summary. Linkedin. URL: https://www.linkedin.com/pulse/re-powering-uzbekistan-public-private-partnerships-summary-vlad-rosen#:~:text=with%20Masdar. (Accessed 02.04.2025).
10. Uzbekistan: Masdar 897MW Solar PV Portfolio (Samarkand, Jizzakh and Sherabad solar PV plants). Asian Infrastructure Investment Bank. URL: https://www.aiib.org/en/projects/details/2023/approved/Uzbekistan-Masdar-897MW-Solar-PV-Portfolio-Samarkand-Jizzakh-and-Sherabad-solar-PV-plants.html#:~:text=,L0677C. (Accessed 02.04.2025).
11. Joge, T., Eguchi, Y., Imazu, Y., Araki, I., Uematsu, T., & Matsukuma, K. (2002, May). Applications and field tests of bifacial solar modules. In Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002. (pp. 1549-1552). IEEE.
12. Salloom, A. H., Abdulrazzaq, O. A., & Ismail, B. H. (2018). Assessment of the performance of bifacial solar panels. International Journal of Engineering and Technical Research, 8(7), 264790.
13. Han, M., Lu, L., & Sun, B. (2024). Overall energy performance of building-integrated bifacial photovoltaic sunshades with different installation and building parameters in hot and humid regions. Solar Energy, 275, 112619.
14. Chen, M., Zhang, W., Xie, L., He, B., Wang, W., Li, J., & Li, Z. (2021). Improvement of the electricity performance of bifacial PV module applied on the building envelope. Energy and Buildings, 238, 110849.
15. Hayibo, K. S., Petsiuk, A., Mayville, P., Brown, L., & Pearce, J. M. (2022). Monofacial vs bifacial solar photovoltaic systems in snowy environments. Renewable Energy, 193, 657-668.
16. Baloch, A. A., Hammat, S., Figgis, B., Alharbi, F. H., & Tabet, N. (2020). In-field characterization of key performance parameters for bifacial photovoltaic installation in a desert climate. Renewable Energy, 159, 50-63.
17. Garrod, A., Hussain, S. N., Intwala, M. H., Poudhar, A., Manikandan, S., & Ghosh, A. (2024). Electrical and thermal performance of bifacial photovoltaics under varying albedo conditions at temperate climate (UK). Heliyon, 10(13).
18. Razongles, G., Sicot, L., Joanny, M., Gerritsen, E., Lefillastre, P., Schroder, S., & Lay, P. (2016). Bifacial photovoltaic modules: measurement challenges. Energy Procedia, 92, 188-198.

ISSN 3030-3907

19. Marwan, M. D., Suhono, S., & Subekti, L. (2024). The potential of shading to optimize the performance ratio of a solar power system. e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 10, 100768.
20. Longares, J. M., García-Jiménez, A., & García-Polanco, N. (2023). Multiphysics simulation of bifacial photovoltaic modules and software comparison. Solar Energy, 257, 155-163.
21. Rodríguez-Gallegos, C. D., Liu, H., Gandhi, O., Singh, J. P., Krishnamurthy, V., Kumar, A., ... & Peters, I. M. (2020). Global techno-economic performance of bifacial and tracking photovoltaic systems. Joule, 4(7), 1514-1541.
22. Mohamed, N. S. S., Sulaiman, S. I., Rahim, S. R. A., & Azmi, A. (2024). Optimal sizing of a fixed-tilt ground-mounted grid-connected photovoltaic system with bifacial modules using Harris Hawks Optimization. Energy Conversion and Management, 314, 118738.
23. Ghenai, C., Ahmad, F. F., Rejeb, O., & Hamid, A. K. (2021). Sensitivity analysis of design parameters and power gain correlations of bi-facial solar PV system using response surface methodology. Solar Energy, 223, 44-53.
24. Shigenobu, R., Ito, M., & Taoka, H. (2021). Optimal design of bifacial PV system to mitigate duck-curve problem of power system with the UC problem. Energy Reports, 7, 7004-7014.
25. Sahu, P. K., Chakraborty, C., & Roy, J. N. (2024). Comparative Economic Analysis of Bifacial Roof-top PV Systems. Energy for Sustainable Development, 83, 101593.
26. Mouhib, E., Fernández-Solas, Á., Pérez-Higueras, P. J., Fernández-Ocaña, A. M., Micheli, L., Almonacid, F., & Fernández, E. F. (2024). Enhancing land use: Integrating bifacial PV and olive trees in agrivoltaic systems. Applied Energy, 359, 122660.
27. Khan, M. R., Hanna, A., Sun, X., & Alam, M. A. (2017). Vertical bifacial solar farms: Physics, design, and global optimization. Applied energy, 206, 240-248.
28. Об утверждении Стратегии по переходу Республики Узбекистан на «зеленую» экономику на период 2019 — 2030 годов. Постановление Президента Республики Узбекистан, от 04.10.2019 г. № ПП-4477.
29. “Зеленая” энергетика в Узбекистане: перспективы солнечных и ветряных электростанций. URL: https://sreda.uz/rubriki/klimat/zelenaya-energetika-v-uzbekistane-perspektivy-solnechnyh-i-vetryanyh-elektrostantsij/?utm_source=chatgpt.com. (Accessed 02.04.2025).
30. Global Solar Atlas. ESMAP, Solargis, World Bank Group. URL: https://globalsolaratlas.info/download/uzbekistan. (Accessed 02.04.2025).

ISSN 3030-3907

31. “Green” energy in Uzbekistan: prospects of solar and wind power plants. URL: https://uzembassy.org.tr/news/4639?language=en&utm. (Accessed 02.04.2025).

ISSN 3030-3907