ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2025, № 9, с. 84–93

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

ТЕХНОЛОГИИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ИНДИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

© 2025 г. A. Verma[a], S. Kumar[b], S. Sengupta[a, *]

[a]*Amity Institute for Advanced Research and Studies (Materials and Devices), Amity University Uttar Pradesh, Noida, 201301 India*

[b]*GAP Solar Private Limited, Plot D1, C Block Community Centre Naraina Vihar, New Delhi, 110028 India*

*****e-mail: ssengupta1@amity.edu*

Поступила в редакцию 29.04.2024 г.
После доработки 24.09.2024 г.
Принята к публикации 30.10.2024 г.

В Индии использование солнечной энергии, особенно концентрированной солнечной энергии (КСЭ) (CSP – от англ. concentrated solar power), является весьма перспективным направлением производства чистой и возобновляемой энергии. Благодаря амбициозным планам правительства по увеличению мощности солнечной энергетики, а также изобилию солнечного излучения технология КСЭ оказалась в центре особого внимания. Однако, несмотря на большой потенциал этой технологии, ее внедрение сталкивается с серьезными препятствиями, затрудняющими ее широкое распространение. Среди трудностей – отсутствие надежных данных, ограниченные возможности отечественного производства оборудования и конкуренция со стороны фотоэлектрических (PV) технологий. В большинстве районов Индии более 300 ясных дней в году с солнечной радиацией 1700–1900 кВт · ч на 1 кВт пиковой мощности, что делает Индию одной из наиболее перспективных стран для производства электроэнергии с использованием гелиосистем. Правительство Индии поставило цель ввести к 2030 г. дополнительно 448 ГВт солнечной генерации. В данном обзоре проводится оценка текущего состояния КСЭ-технологии в Индии, обсуждаются существующие препятствия к широкому ее использованию и будущие перспективы ее реализации. Данный обзор нацелен на предоставление ценной информации для исследователей, политиков, представителей промышленности и специалистов в области возобновляемой энергетики. Авторы надеются, что благодаря результатам данного исследования развитие КСЭ-технологии как распределенного производства энергии в изолированных и автономных районах страны может получить финансовые преференции.

Ключевые слова: концентрированная солнечная энергия, КСЭ-технология, ситуация в Индии, препятствия к широкому использованию КСЭ, перспективы развития КСЭ в Индии

DOI: 10.56304/S0040363625700997

Мировые запасы невозобновляемых энергетических ресурсов истощаются довольно быстрыми темпами, в то время как спрос на энергию постоянно растет. Поэтому поиск альтернативных источников энергии, таких как возобновляемые, является крайне важным, поскольку они широкодоступны и экологически безопасны [1]. В настоящее время ископаемое топливо обеспечивает около 80% мировых энергетических потребностей, но в ближайшем будущем его максимальное использование приведет к серьезным проблемам в связи с международным давлением, оказываемым на развивающиеся страны, цель которого – вынудить их сократить потребление ископаемого топлива, чтобы снизить выбросы углекислого газа [2].

Рост валового внутреннего продукта сопровождается увеличением потребления энергии. По предварительным оценкам, энергопотребление в Индии повысилось с 30354 ПДж в 2020–2021 гг. до 33508 ПДж в 2021–2022 гг., или на 10.39%. Наибольшую долю в общем годовом энергопотреблении (77.3%) составили уголь (15 556 ПДж) и сырая нефть (10 342 ПДж), что наглядно демонстрирует доминирование в энергобалансе ископаемого топлива [3]. С истощением ресурсов потребность в импорте ископаемого топлива будет только увеличиваться. Кроме того, использование ископаемого топлива представляет угрозу для окружающей среды. Его сжигание приводит к образованию смога, загрязнению воздуха и

глобальному потеплению. Согласно оценкам, повышение глобальной температуры относительно доиндустриального уровня должно оставаться ниже 2°C. В 2015 г. Индия вместе со 190 странами подписала Парижское соглашение по климату, выполнение которого должно способствовать решению данной проблемы. Естественно, что в стране возрос интерес к использованию возобновляемых источников энергии [4].

В Индии увеличивается число электростанций, работающих по технологии КСЭ. Так, по состоянию на 31 марта 2015 г. их суммарная установленная мощность составляла всего 3743.97 МВт. Однако в течение последующих двух лет этот показатель вырос почти в 4 раза, и к 31 марта 2017 г. установленная мощность КСЭ-станций в Индии достигла 12288.83 МВт. Лидером по использованию КСЭ-технологий является штат Раджастхан (установленная мощность 1812.93 МВт). За ним следуют штаты Гуджарат (1249.37 МВт) и Тамил-Наду (1691.83 МВт). До 2022 г. мощность КСЭ-станций оставалась стабильной, достигнув пикового значения в 2019 г. (343 МВт) [5, 6].

Существуют два метода получения солнечной энергии: с помощью фотоэлектрических элементов (ФЭ) и солнечных тепловых коллекторов, которые также известны как технология концентрирования солнечной энергии. В ФЭ солнечная энергия напрямую преобразуется в электрическую. В настоящее время на рынке ФЭ преобладают кремниевые и тонкопленочные солнечные батареи, КПД которых составляет от 17 до 21% [7]. Наибольший прогресс наблюдается в развитии именно ФЭ-технологий. Эффективность фотоэлементов третьего и четвертого поколений, таких как тандемные и перовскитные солнечные батареи, достигает 35–47%. Однако их надежность вызывает вопросы, поскольку они деградируют в течение двух-трех лет [8].

Тепло солнечного излучения, улавливаемое коллекторами, может использоваться либо в промышленных процессах, либо на тепловых электростанциях. Технология КСЭ хорошо зарекомендовала себя в солнечной энергетике, поскольку КПД установок может составлять от 7 до 21% [9]. Главное преимущество КСЭ-технологии – это возможность аккумулирования энергии и использования ее в часы пикового спроса. Это снижает зависимость технологии от нестабильности солнечного излучения, повышает ее надежность. Преимущество коллекторов перед ФЭ заключается в их способности снижать скачки нагрузки в сети в периоды пикового потребления [10]. Благодаря этому технология КСЭ является весьма привлекательной для инвестирования.

В установках КСЭ используются различные системы для концентрирования солнечного излучения, такие как линейная линза Френеля, солнечная тарелка Стирлинга, солнечная башня и солнечный коллектор с параболическим желобом. Многие исследователи изучали потенциал и возможность внедрения КСЭ в различных отраслях по всему миру. Ведущими странами по применению КСЭ являются Испания, США и Индия [11]. Геоинформационные технологии показывают, что Южная Африка может значительно выиграть от использования КСЭ, поскольку с помощью коллектора с параболическими желобами можно вырабатывать до 547.6 ГВт электроэнергии. В [12] рассмотрены три концепции технологии башенных электростанций, каждая из них имеет определенные преимущества. При их реализации могут быть удовлетворены потребности производителя в электроэнергии.

Согласно имеющимся данным, Индия располагает большими возможностями в развитии КСЭ. В предлагаемом обзоре рассматривается текущее состояние технологии КСЭ в Индии, а также проблемы, с которыми сталкиваются специалисты при ее внедрении.

СИСТЕМЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Солнце является источником всей энергии на Земле, включая ископаемое топливо. Ежегодно на Землю поступает 885 млн ТВт · ч энергии, что многократно превышает глобальное ее потребление. Солнечная энергия – это часть солнечного излучения (радиации), достигающая поверхности Земли. Прежде чем достичь поверхности, солнечное излучение проходит через космическое пространство. Из общего поступающего солнечного излучения, составляющего 340 Вт/м^2, около 29% рассеивается атмосферой (рассеянное излучение) [13, 14]. Из оставшихся 71% примерно 23% поглощается атмосферой, а оставшиеся 48% достигают поверхности Земли. Атмосфера затем обратно отдает тепло, эквивалентное 59% поступающего солнечного излучения, тогда как поверхность выделяет всего 12% в результате процессов испарения, конвекции и теплового инфракрасного излучения [15].

Часть солнечного излучения, поступающая перпендикулярно поверхности Земли, называется прямым нормальным облучением (ПНО), а рассеянная часть, обусловленная влиянием атмосферы Земли, – рассеянным горизонтальным облучением (РГО) [6]. Это две основные составляющие солнечной энергии, падающей на горизонтальную поверхность Земли.

В солнечном тепловом коллекторе, в отличие от фотоэлектрических элементов, поглощаемое солнечное излучение преобразуется в тепловую энергию, которая может применяться для технологического нагрева или для выработки пара,

приводящего в действие турбину. Солнечные тепловые коллекторы бывают двух типов: неконцентрирующие, которые поглощают падающее солнечное излучение без использования концентраторов (отражателей), и концентрирующие, в которых применяются зеркала или линзы для увеличения плотности энергии на поглощающей поверхности коллектора.

Система для концентрирования солнечной энергии, также известная как концентрирующий коллектор, работает за счет использования ПНО. Основными компонентами системы КСЭ являются отражатели, которые фокусируют солнечное излучение на приемнике (абсорбере), где оно поглощается и преобразуется в тепловую энергию [16]. В приемнике циркулирует теплоноситель, который поглощает, а затем передает полученную тепловую энергию в теплообменник или накопитель тепловой энергии (НТЭ) для получения пара. Пар используется либо для технологического нагрева, либо для выработки электроэнергии.

Схема работы КСЭ-станции показана на рисунке. Солнечное излучение собирается с помощью концентраторов, в которых используется эффект преломления или отражения солнечных лучей. В результате отраженное или преломленное излучение направляется на небольшую поглощающую поверхность для увеличения потока энергии в зоне приемника. Теплоноситель, проходящий через абсорбер, нагревается. Во время непиковых часов потребления электроэнергии нагретый теплоноситель направляется в систему НТЭ. В многоступенчатой турбинной системе, работающей по термодинамическому циклу, тепловая энергия преобразуется в механическую, затем с помощью генератора вырабатывается электроэнергия, при этом часть энергии теряется в окружающей среде.



Схема КСЭ-станции с коллектором с параболическим желобом

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ КСЭ

В настоящее время от 40 до 43% энергии в мире извлекается из нефти. В XXI в. мировому сообществу необходимо решить проблему растущих темпов потребления нефти, так как это напрямую связано с изменением климата. Уголь и нефть являются основными ископаемыми видами топлива, ответственными за 40% глобального потепления. Концентрирование солнечной энергии представляет собой одну из перспективных технологий в сфере нетрадиционных энергетических систем и рассматривается как главный источник для производства электроэнергии в ближайшем будущем. Преимущества этой технологии заключаются в том, что она является чистой и экологически безопасной, а также более эффективной для генерации электроэнергии по сравнению с ФЭ-технологией и системами на основе других возобновляемых источников энергии [17].

Следует отметить, что не все страны расположены в климатических зонах, благоприятных для использования солнечного излучения. Существует еще один недостаток КСЭ-технологии: в некоторых тропических странах из-за туманов значительно снижается годовая выработка электроэнергии с помощью КСЭ-установок [18]. Из-за этой проблемы экваториальным странам сложно разрабатывать собственные уникальные КСЭ-установки. В табл. 1 видно, что большинство регионов мира обладают значительным потенциалом для развития технологии КСЭ. Страны же, расположенные в тропических широтах, обладают достаточными ресурсами солнечного излучения для создания КСЭ-станций.

РАЗВИТИЕ КСЭ-ТЕХНОЛОГИИ В ИНДИИ

Согласно прогнозам, к 2032 г. первичное энергопотребление в Индии увеличится в 3–4 раза. При этом Индия обладает значительными солнечными ресурсами. Интенсивность солнечного излучения в стране составляет 200 МВт/км^2. В связи с этим требуется быстрый переход на технологии возобновляемой энергетики. В штатах

Таблица 1. Электроэнергия, вырабатываемая КСЭ-станциями, % общего потребления электроэнергии [18]

Страны	Год			
	2020	2030	2040	2050
Австралия, Центральная Азия, Чили, Индия (Гуджарат, Раджастхан), Мексика, Ближний Восток, Северная Африка, Перу, Южная Африка, Юго-запад США	5	12	30	40
Остальная часть США	3	6	15	20
Европа (в основном за счет импорта), Турция	3	6	10	15
Остальная часть Африки, Аргентина, Бразилия, остальная часть Индии	1	5	8	15
Индонезия (за счет импорта)	0.5	1.5	3	7
Китай, Россия (за счет импорта)	0.5	1.5	3	4

Мадхья-Прадеш, Гуджарат, Ладакх, Андхра-Прадеш, Махараштра и Раджастхан достаточно высокий уровень солнечного излучения. По сравнению с другими регионами Индии, именно эти штаты имеют наибольшие среднегодовые показатели солнечной радиации [19]. Уже создано и успешно функционирует довольно большое число солнечных электростанций (табл. 2).

В отчете, опубликованном в 2022 г. Министерством статистики и реализации программ (МСРП) и Министерством новых и возобновляемых источников энергии (МНВИЭ), сообщается, что установленная мощность сетей, поставляющих электроэнергию от возобновляемых источников в Индии, составляет примерно 109.9 ГВт. При этом солнечная энергетика имеет наибольшую установленную мощность – около 54 ГВт – это почти 50% общей установленной мощности возобновляемой электроэнергетики в 2022 г.

В целях модернизации солнечной электроэнергетики 11 января 2010 г. в Индии была создана Национальная солнечная миссия Джавахарлала Неру (НСМДН). Информация о проектах этой миссии приведена в табл. 3. Эта миссия стремилась достичь к 2022 г. 20 ГВт установленной мощности КСЭ-станций, подключенных к сети. Однако к концу 2022 г. общая установленная мощность таких станций составила всего 7.3 ГВт, при этом на солнечные панели, подключенные к сети на крышах зданий, приходилось чуть более 1.1 ГВт. Частично причиной отставания страны от намеченной цели стали проблемы, связанные с пандемией COVID-19.

Реализация миссией проектов должна была осуществляться в три этапа (табл. 4). На первом этапе на мощности КСЭ и ФЭ приходилось по 500 МВт. К концу 2014 г. в эксплуатацию было введено 470 МВт мощностей КСЭ, хотя на этот период планировалось ввести только 200 МВт. На втором этапе Министерство новых и возобновляемых источников энергии сократило долю КСЭ до 30% из-за неудовлетворительных показателей этих систем. Тем не менее стало очевидно, что второй этап поставил под угрозу преимущественно ФЭ, когда МНВИЭ сформулировало правила для второго этапа. В 2014 г. МНВИЭ запустило программу создания децентрализованных автономных солнечных тепловых станций в целях развития автономных солнечных тепловых технологий [21].

В феврале 2018 г. МНВИЭ объявило о планах добавить 90000 м^2 площади солнечных коллекторов к 2019–2020 гг. в рамках стратегии по децентрализованному использованию солнечной тепловой энергии (вне сети). В результате установленная мощность КСЭ в Индии теперь составляет 343 МВт. Тем не менее, было одобрено только 28524 м^2 площади, что эквивалентно 19 МВт, а 300 МВт КСЭ-проектов находятся в стадии строительства [22]. Следует отметить, что при внедрении технологии КСЭ трудности возникают по всей стране. Об этом свидетельствует тот факт, что более половины проектов все еще находятся в стадии реализации или не функционируют (см. табл. 3). Проблемы, препятствующие развитию КСЭ в Индии, обсуждаются в следующем разделе.

ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Нехватка квалифицированной рабочей силы

Как показал первый этап НСМДН, задержки в строительстве и вводе в эксплуатацию установок КСЭ были связаны с недостаточным опытом работы с компонентами солнечных систем. Поэтому наличие квалифицированной рабочей силы играет ключевую роль в своевременном завершении таких проектов [23]. Для широкого распространения технологий КСЭ необходимо наличие обученных специалистов. Государственные ор-

Таблица 2. Сравнительный анализ проектов КСЭ в Индии [20]

Проект	Концентратор	Статус	Город/регион	Владелец	Мощность турбины, МВт	Аккумулирование тепла
Abhijeet Solar Project	Параболический желоб	Строится	Phalodi/ Rajasthan	Corporate Ispat Alloys Ltd (100%)	50 (нетто), 50 (брутто)	Нет
ACME Solar Tower	Башенная система	В эксплуатации	Bikaner/ Rajasthan	ACME group (100%)	2.5 (нетто), 2.5 (брутто)	»
Dadri ISCC Plant	Линейный отражатель Френеля	Строится	Dadri/U.P.	NTCP	14	»
Dhursar	То же	В эксплуатации	Dhursar/ Rajasthan	Reliance Power (100%)	125 (брутто)	»
Diwakar	Параболический желоб	Строится	Askandra/ Rajasthan	Lanco Infratech (100%)	100 (брутто)	Да
Godawari Solar Project	То же	В эксплуатации	Nokh/ Rajasthan	Godawari Green Energy Ltd (100%)	50 (брутто)	Нет
Gujrat Solar One	»	Строится	Kutch/Gujrat	Cargo Solar Power (100%)	28 (брутто)	Да
KVK Energy Solar Project	»	»	Askandra/ Rajasthan	KVK Energy Ventures Ltd (100%)	100(брутто)	»
Megha Solar Plant	»	В эксплуатации	Anantapur Andra/Pradesh	Megha Engineering and Infrastructure (100%)	50 (брутто)	Нет
National Solar Thermal Power Facility	»	То же	Gurgaon/ Haryana	IIT Bombay	1 (брутто)	»

Таблица 3. Подробная информация о НСМДН [21]

Проект	Технология	Мощность, МВт	Текущий статус
Dhursar	Линейный отражатель Френеля	125	Эксплуатируется
Godawari Solar Project	Параболический желоб	50	То же
Megha Solar Project	То же	50	»
ACME Solar Tower	Солнечная башня	2.5	»
National Solar Thermal Power Facility	Параболический желоб	1	»
Diwakar	То же	100	Строится
KVK Energy Solar Plant	»	100	То же
Abhijeet Solar Project	»	50	»
Gujrat Solar One	»	25	»
Dadri ISCC Plant	Линейный отражатель Френеля	14	»
Rajasthan Solar One	Параболический желоб	10	»

Таблица 4. Этапы реализации миссии НСМДН [5]

Параметр	Этап миссии		
	2010–2013 гг.	2013–2017 гг.	2017–2022 гг.
Площадь поверхности солнечных коллекторов, млн м^2	7	15	20
Электрическая мощность, выдаваемая в сети, МВт	1000–2000	4000–10000	2000–20000
Электрическая мощность автономных солнечных систем, МВт	200	1000	2000

ганизации, такие как Национальный институт солнечной энергии (НИСЭ), могут в большой степени способствовать повышению квалификации рабочих путем проведения семинаров и обучающих курсов по установке и эксплуатации оборудования для солнечных систем. Однако проблемы, в том числе нехватка специалистов, остаются, что приводит к задержкам в реализации таких инициатив, как проект Godawari Green. Чтобы устранить дефицит в квалифицированных работниках и обеспечить успешную реализацию будущих КСЭ-проектов, рекомендуется внедрение специализированных магистерских программ и краткосрочных курсов, направленных на повышение осведомленности и компетенций в сфере КСЭ.

Недостаток понимания со стороны инвесторов

Отсутствие установок для демонстрации технологии КСЭ привело к снижению доверия со стороны инвесторов, что является одной из основных причин ограниченного распространения КСЭ в Индии. Доверие инвесторов играет решающую роль в успешном выходе любой технологии на рынок. Во время реализации первого этапа НСМДН демонстрационных установок еще не было, что усилило обеспокоенность инвесторов, поскольку это препятствовало процессу проведения оценки технико-экономической эффективности технологии КСЭ [23]. Дополнительно подорвало доверие инвесторов то, что не были предоставлены точные данные с действующих пилотных объектов. Проблему усугубили недостаточное финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, отсутствие четких политических руководящих принципов и ограниченность поставок оборудования, вызванная нехваткой отечественных производителей [24].

Капитальные затраты на КСЭ-проекты зависят от уровня солнечного излучения на конкретной территории страны. В результате КСЭ-объекты, расположенные в неодинаковых по инсоляции условиях, демонстрируют разную выработку электроэнергии, различаются капитальные затраты на их сооружение, а также коэффициенты использования установленной мощности (КИУМ).

Капитальные затраты, млрд дол., на создание КСЭ-установки, разработанной в рамках первого этапа НСМДН, мощностью 55.55 МВт с коллектором с параболическим желобом распределяются следующим образом:

Контур теплоносителя	39.60
Системы теплоносителя	16.40
Соединительные трубопроводы	2.35
Турбина	5.10
Системы баланса	53.32
Стоимость земли	7.00
Подготовка площадки	2.10
Общая стоимость	125.87
Стоимость 1 МВт	2.27

Капитальные затраты на создание этой установки рассчитаны Центральной комиссией по регулированию электроэнергетики (ЦКРЭ) в 2014–2015 гг. Коэффициент использования установленной мощности составил 23%.

Средний базовый тариф, разработанный ЦКРЭ для КСЭ-проектов в период 2010–2016 гг., снизился с 0.18 до 0.14 дол/(кВт · ч). Однако благодаря механизму “пакетирования”, введенному в рамках НСМДН, средний тариф на “объединенную“ электроэнергию, полученную от различных источников, варьировался в диапазоне 0.054–0.057 дол/(кВт · ч). Срок окупаемости КСЭ-установок в Индии составляет менее 25 лет, а дисконтированный срок окупаемости при ставке дисконтирования 10.70% – 9.76 года, что практически сопоставимо с аналогичными показателями для ФЭ-установок [25].

Несмотря на наличие пяти активных проектов (см. табл. 3), их жизнеспособность остается под вопросом, поэтому восстановление доверия инвесторов является ключевым фактором успешной коммерциализации КСЭ-технологий в стране. Для решения этой проблемы МНВИЭ усилило внимание к научным исследованиям и разработкам в сфере КСЭ. Среди предпринятых шагов – создание установки КСЭ мощностью 1 МВт в Бомбейском технологическом институте

для исследовательских целей. Кроме того, в Индийском технологическом институте в г. Джодхпур (IIT Jodhpur) разрабатываются три проекта КСЭ-установок мощностью по 5 МВт каждая для оценки эффективности и целесообразности внедрения сразу нескольких технологий КСЭ, что свидетельствует об обнадеживающих шагах в направлении возрождения доверия к ним инвесторов.

Проблемы с интеграцией в сеть

Одним из главных препятствий на пути широкого использования солнечных электростанций, основанных на КСЭ-технологиях (КСЭ-станций), в Индии является сложность подключения их к электросети. Поскольку выработка энергии на солнечных установках имеет прерывистый характер, для поддержания стабильности и надежности работы солнечных электростанций необходимы передовые технологии управления сетью. Однако непредсказуемость выработки электроэнергии такими электростанциями может привести к серьезным техническим проблемам в работе существующей сетевой инфраструктуры, например к колебаниям частоты и напряжения электрического тока [26].

Для решения проблем интеграции КСЭ-станций в электросеть и обеспечения их беспрепятственного подключения необходимо применять усовершенствованные методы прогнозирования для более точных предсказаний изменений погоды, внедрять сетевые технологии КСЭ с быстрым варьированием мощности, повышать возможности сетевого подключения и модернизировать инфраструктуру сети для улучшения ее гибкости.

Ограничения цепочки поставок

В Индии ограничения в цепочке поставок оборудования для КСЭ-станций связаны с трудностями в получении компонентов и материалов, необходимых для строительства и эксплуатации этих станций. Такими компонентами являются специализированные зеркала, приемники, блоки накопления тепла и другое важное оборудование для генерации и хранения солнечной энергии, а также преобразования ее в тепловую или электрическую энергию. Ограниченная доступность некоторых критически важных компонентов и материалов существенно затрудняет масштабируемость проектов КСЭ в Индии. Разработчики проектов сталкиваются с задержками поступления требуемого оборудования и материалов и не могут в полной мере использовать потенциал технологий КСЭ при отсутствии достаточного объема поставок этих специфических товаров. Трудности с обеспечением надежного и своевременного доступа к необходимым компонентам могут привести к задержкам, превышению бюджета и даже срыву ключевых этапов проекта [27]. Эти ограничения в цепочке поставок замедляют рост и развитие индустрии КСЭ в Индии, усложняя успешное и эффективное завершение проектов.

Для решения проблемы ограничений в цепочке поставок оборудования и материалов для КСЭ-станций в Индии следует поощрять развитие собственного производства, финансировать исследования и разработки локальных решений, формировать стратегические партнерства с зарубежными технологическими компаниями, а также ускорять нормативно-правовые процедуры для быстрого получения необходимых разрешений.

Конкуренция со стороны ФЭ

Конкурентноспособность фотоэлектрических систем является главным препятствием для широкого внедрения технологии КСЭ в Индии. Инвесторы предпочитают более дешевые и простые в обслуживании ФЭ-станции, поскольку капитальные затраты на 1 МВт на КСЭ почти в 2.5 раза выше, чем на ФЭ, а эксплуатация и техническое обслуживание КСЭ-станции сопряжены с большими сложностями. Однако для изменения этой тенденции необходимо изучить возможности снижения затрат на КСЭ. Одним из решений является гибридизация КСЭ с уже существующими угольными электростанциями, что может повысить эффективность капитальных вложений и потенциально снизить стоимость КСЭ-станций на 30–40% [28]. Преодоление препятствий для внедрения КСЭ благодаря таким инновационным методам позволит сократить разрыв в стоимости по сравнению с ФЭ, что откроет путь для более активного распространения и внедрения технологии КСЭ в Индии.

Отсутствие адекватной политики государства

Как и в других секторах энергетики, в сфере возобновляемых источников энергии также возникают споры, поскольку зачастую существует значительный разрыв между фактическим прогрессом и прогнозируемыми темпами роста в рамках краткосрочных и долгосрочных целей, направленных на удовлетворение растущих потребностей. Наиболее значительными препятствиями для развития солнечной энергетики в Индии являются политические и нормативные барьеры [29]. Государственная политика недостаточно способствует строительству КСЭ-станций. Поскольку Индия не является производителем компонентов для этих станций, траектория роста неизбежно подвержена влиянию сбоев в цепочке поставок, геополитической нестабильности, не-

хватки запасных частей и сервисного обслуживания, а также односторонних изменений цен. Кроме того, споры, связанные с захватом земель при их приобретении, могут привести к дополнительным финансовым затратам для разработчиков проектов и даже к их замораживанию. Таким образом, необходимо строгое соблюдение нормативных актов, что позволит избежать таких сбоев и обеспечить защиту прав сторон, участвующих в земельных спорах [20].

ПЕРСПЕКТИВЫ КСЭ-СТАНЦИЙ В ИНДИИ

Один из выводов, сделанных в результате эксплуатации одной из КСЭ-станций, заключается в том, что в конденсаторе должно отводиться значительное количество подводимой тепловой энергии. Высокие первоначальные затраты на КСЭ могут быть оправданы, если отведенная энергия будет полностью полезно использована, например, в системе многоступенчатой дистилляции (МД). Температуры пара на выходе из большинства паровых турбин соответствуют требованиям данной системы, которая работает при 70°C (абсолютное давление 30 кПа). Кроме того, КСЭ-станции, объединенные с системой МД, могут включать в себя системы охлаждения, для работы которых требуется тепловая энергия, например абсорбционных холодильных машин (АБХМ). Поскольку в Индии значительная часть сельскохозяйственной продукции теряется из-за нехватки складских помещений, потребность в хранилищах с холодильными установками становится критически важной. Такие станции, известные как полигенерационные (КСЭ, интегрированные с МД и АБХМ), являются наиболее эффективным решением, поскольку в них солнечная энергия используется максимально полезно [5].

Таким образом, полигенерационная станция будет производить электроэнергию и дистиллированную воду, а также обеспечивать подачу тепловой энергии для холодильных помещений, что приведет к трехкратной выгоде. Многоцелевой метод выработки энергии может способствовать снижению стоимости ее производства. Исследования показывают, что благодаря полигенерационной станции первичное энергопотребление можно сократить на 15.3% и повысить эквивалентную чистую выработку электроэнергии на 18.3% по сравнению с базовой КСЭ-станцией. Полигенерационный объект потребует несколько больших начальных капитальных вложений по сравнению с обычной электростанцией, однако в долгосрочной перспективе он должен оказаться более экономически эффективным [20].

Более того, использование модульных и стандартизированных компонентов позволит снизить капитальные затраты и повысить масштабируемость КСЭ-станций. Сокращение сроков реализации проектов и снижение их общей стоимости благодаря стандартизации компонентов и оптимизации процессов разработки, скорее всего, приведут к тому, что эти станции станут более конкурентоспособными на энергетическом рынке страны. Наконец, рыночные стимулы и законодательная база имеют решающее значение для продвижения строительства КСЭ-станций в Индии. Прозрачные и последовательные меры, такие как тарифы на поставку электроэнергии, налоговые льготы и целевые показатели по возобновляемым источникам энергии, будут способствовать внедрению КСЭ-технологии, а также стимулировать инвестиции и применение инноваций в этой отрасли.

ВЫВОДЫ

1. Индия обладает значительным потенциалом для развития КСЭ-технологии и может удовлетворять растущие потребности в энергии благодаря широкому использованию этой технологии.

2. В настоящее время установленная мощность КСЭ-станций в стране остается незначительной. Это связано с рядом препятствий, в том числе с несогласованностью данных о прямом нормальном облучении, жесткой конкуренцией со стороны фотоэлектрических технологий, а также с проблемами в законодательной сфере.

3. Существенным барьером для развития в стране КСЭ стало недоверие инвесторов к данной технологии.

4. Реализация проектов проходит успешно благодаря политике реверсивного аукциона, однако она не гарантирует их полноценного внедрения.

5. Приоритеты Индии сместились в сторону использования фотоэлектрических элементов, при этом КСЭ-технология остается практически без внимания, что привело к почти полному прекращению ее развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Prakash O., Kumar A., Sharaf-Eldeen Y.I.** Review on Indian solar drying status // Current Sustainable Renewable Energy Rep. 2016. V. 3. P. 113–120. https://doi.org/10.1007/s40518-016-0058-9
2. **Analysis** of CSP plants for the definition of energy policies: The influence on electricity cost of solar multiples, capacity factors and energy storage / S. Izquierdo, C. Montañs, C. Dopazo, N. Fueyo // Energy Policy. 2010. V. 38. Is. 10. P. 6215–6221. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2010.06.009

3. **Energy** Statistics India 2023. National Statistical Office. Ministry of Statistics and Programme Implementation Government of India. New Delhi, India, 2023. [Электрон. ресурс.] https://ruralindiaonline.org/ur/library/resource/energy-statistics-india-2023/
4. **The Paris** Agreement // UNFCCC. [Электрон. ресурс.] https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement
5. **Bijarniya J.P., Sudhakar K., Baredar P.** Concentrated solar power technology in India: A review // Renewable Sustainable Energy Rev. 2016. V. 63. P. 593–603. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.064
6. **Yadav A.K., Kumar A., Sinha S.** A review of concentrated solar power status and challenges in India // Solar Compass. 2024. V. 12. P. 100079. https://doi.org/10.1016/J.SOLCOM.2024.100079
7. **Solar** performance and efficiency. U.S. Department of Energy. [Электрон. ресурс.] https://www.energy.gov/eere/solar/solar-performance-and-efficiency
8. **Fourth-generation** solar cells: a review / F. Rehman, I.H. Syed, S. Khanam, S. Ijaz, H. Mehmood, M. Zubair, Y. Massoud, M.Q. Mehmood // Energy Adv. 2023. V. 2. Is. 9. P. 1239–1262. https://doi.org/10.1039/D3YA00179B
9. **Concentrated** solar power plants: Review and design methodology / H.L. Zhang, J. Baeyens, J. Degrève, G. Cacères // Renewable Sustainable Energy Rev. 2013. V. 22. P. 466–481. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.01.032
10. **Vergura S., Lameira V.** Technical-financial comparison between a PV plant and a CSP plant // SSRN Electron. J. 2011. V. 6. Is. 2. P. 210–220. https://doi.org/10.2139/SSRN.2050351
11. **Solar-hybrid** gas turbine-based power tower systems (REFOS) / R. Buck, T. Bräuning, T. Denk, M. Pfänder, P. Schwarzbözl, F. Tellez // J. Sol. Energy Eng. 2002. V. 124. Is. 1. P. 2–9. https://doi.org/10.1115/1.1445444
12. **Romero M., Buck R., Pacheco J.E.** An update on solar central receiver systems, projects, and technologies // J. Sol. Energy Eng. 2002. V. 124. Is. 2. P. 98–108. https://doi.org/10.1115/1.1467921
13. **Kashyap P.** Energy transition and energy security – A balancing act. Renewables Energy and Natural Resources, India. [Электрон. ресурс.] https://www.mondaq.com/india/renewables/1466960/energy-transition-and-energy-security-a-balancing-act
14. **Bannur S.** Concentrated solar power in India: current status, challenges and future outlook // Curr. Sci. 2018. V. 115. No. 2. P. 222–227. https://www.jstor.org/stable/26978185
15. **Trenberth K.E., Fasullo J.T., Kiehl J.** Climate and earth's energy budget // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2009. V. 90. Is. 3. P. 311–324. https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1
16. **Global** potential of concentrating solar power / F. Trieb, C. Schillings, M. O'Sullivan, T. Pregger, C. Hoyer-Klick // Proc. of the 15th Solar Paces Conf. Berlin, Germany, 15–18 Sept. 2009.
17. **A review** of concentrating solar power (CSP) in Malaysian environment / R. Affandi, M.R.A. Ghani, Ch.K. Gan, Jano, Zanariah // IJEAT. 2013. V. 3. Is. 2. P. 378–382. https://www.ijeat.org/portfolio-item/b2498123213/
18. **Hourly** global solar radiation estimates on a horizontal plane / A.M. Muzathik, W.S.W. Nik, Kh. Samo, M.Z. Ibrahim // J. Phys. Sci. 2010. V. 21. No. 2. https://jps.usm.my/solar-radiation-estimates/
19. **Ramachandra T.V., Kamakshi G., Shruthi B.V.** Bioresource status in Karnataka // Renewable Sustainable Energy Rev. 2004. V. 8. Is. 1. P. 1–47. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2003.09.001
20. **Thapar S.** Renewable energy: policies, project management and economics. Springer Singapore, 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9384-0
21. **Ministry** of New and Renewable Energy of India. [Электрон. ресурс.] https://mnre.gov.in/
22. **Shankar A., Saxena A.K., Mazumdar R.** Concentrating solar power plants with storage: deployment essential now. The Energy and Resources Indtitute, 2024. https://teriin.org/sites/default/files/2024-02/CSP_Report_2024_New.pdf
23. **CSE.** Newsletters April 2015. [Электрон. ресурс.] https://www.cseindia.org/newsletters-april-2015–5796
24. **Slow** development of CSP industry in India caused by policy approach. Press Releases, 2014. [Электрон. ресурс.] https://www.eco-business.com/press-releases/slow-development-of-csp-industry-in-india-caused-by-policy-approach/
25. **Kanv G., Ashish Kh.** Paving the way for a transformational future: lessons from Jawaharlal Nehru national solar mission phase one. ESMAP Paper. Washington DC: World Bank Group, 2013. [Электрон. ресурс.] http://documents.worldbank.org/curated/en/1648614-68049776027
26. **Grid** integration challenges of wind energy: A review / S.D. Ahmed, F.S.M. Al-Ismail, M. Shafiullah, F.A. Al-Sulaiman, I.M. El-Amin // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 10857–10878. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964896
27. **Techno-economic** analysis of concentrated solar power plants in terms of levelized cost of electricity / R. Musi, B. Grange, S. Sgouridis, R. Guedez, P. Armstrong, A. Slocum, N. Calvet // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1850. Is. 1. P. 160018. https://doi.org/10.1063/1.4984552
28. **India's** PV-led solar growth casts eyes on performance of CSP projects. World of Renewables. Home of The World Renewable Energy Association. [Электрон. ресурс.] https://worldofrenewables.com/indias-pv-led-solar-growth-casts-eyes-on-performance-of-csp-projects/
29. **Narayan P., Kar S., Jha K.N.** Disputes in renewable energy development: International and domestic interventions // J. Leg. Aff. Dispute Resolut. Eng. Constr. 2023. V. 16. Is. 2. P. 05023010. https://doi.org/10.1061/JLADAH.LADR-1128

Concentrating Solar Energy Technologies in India: Present Status, Challenges and Directions for Development (a Brief Report)

A. Verma[a], S. Kumar[b], and S. Sengupta[a, *]

[a] *Amity Institute for Advanced Research and Studies (Materials and Devices), Amity University Uttar Pradesh, Noida, 201301 India*

[b] *GAP Solar Private Limited, Plot D1, C Block Community Centre Naraina Vihar, New Delhi, 110028 India*

**e-mail: ssengupta1@amity.edu*

Abstract—In India, solar energy, especially concentrated solar power (CSP), offers a promising path toward the production of clean, renewable energy. The government's ambitions for increasing the capacity of solar electricity and the abundance of solar resources have brought CSP into further spotlight. Notwithstanding its potential, CSP has encountered noteworthy obstacles impeding its extensive use. These difficulties include the absence of trustworthy data, the limitations of domestic production capacity, and the rivalry posed by photovoltaic (PV) technology. India boasts over 300 clear sky days a year with solar radiation of 1700–1900 kW h per kilowatt peak, making it a country with significant potential for producing electricity from solar power systems per watt. The Indian government has set goals to generate an additional 104 GW of solar electricity by 2025 and 448 GW by 2030. In this review, we try to offer a thorough evaluation of the present status of the CSP in India and discuss the obstacle and future potential of the same. This review aims to provide insightful information for researchers, policymakers, industry stakeholders, and practitioners in the renewable energy field.

Keywords: concentrated solar power (CSP), Indian scenario, obstacles to the use of CSP, future prospect of CSP in India