

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.5)

УДК 621.311.22

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-44-51

Перспективы использования гибридных тепловых электростанций с применением солнечных технологий в энергетике Народной Республики Бангладеш

А.А. Ани, А.А. Дудолин

Существует неразрывная взаимосвязь и взаимозависимость условий обеспечения энергопотребления и загрязнения окружающей среды. Взаимодействие указанных факторов и развитие производственных сил постепенно привлекает внимание к проблеме взаимодействия теплоэнергетики и окружающей среды. На ранней стадии развития теплоэнергетики основным проявлением внимания был поиск в окружающей среде ресурсов, необходимых для обеспечения энергопотребления и стабильного энергоснабжения предприятий и жилых зданий. В дальнейшем границы проблемы охватили возможности более полного использования природных ресурсов путём изыскания и рационализации процессов и технологий, добычи и обогащения, переработки и сжигания топлива, а также совершенствования теплоэнергетических установок. Одним из способов развития тепловых электростанций и снижения воздействия на окружающую среду является гибридизация солнечных технологий с традиционными электростанциями.

С целью преодоления ограничений силовых установок простого цикла рассмотрены метод гибридизации традиционных электростанций с солнечными технологиями и его влияние на производительность.

Приведен краткий обзор солнечных технологий, применяемых в мировой энергетике. Изучение вопроса эффективности использования гибридных электростанций выполнено на примере одного из наиболее солнечных и активно развивающийся регионов мира — Народной Республики Бангладеш.

Проанализировано состояние энергетики, климатические особенности и возможность применения солнечных технологий для местных условий. Рассмотрена модель солнечной тепловой электростанции с параболическим коллектором и проанализирована эффективность подобных электростанций, выполнен обзор технологий совместного использования парогазовой установки (ПГУ) с солнечным парогенератором для производства электроэнергии.

Проведенные расчеты схем парогазовых установок с солнечным парогенератором показали, что интегрированный блок на пике летнего состояния позволяет дополнительно получить приблизительно 6,5% общей мощности блока по сравнению с аналогичным классическим блоком ПГУ, но без использования поля солнечных коллекторов и солнечного парогенератора. Применение одной современной газотурбинной установки типа GE 9371FB компании Дженерал Электрик позволяет увеличить КПД нетто на 3,9%, а КПД нетто комбинированного цикла — до 59% КПД. Улучшения в блоке выполнены с минимальным воздействием на работу комбинированного цикла из-за ограниченного вклада системы генерации пара от солнечной энергии. Интегрированная система позволяет снизить капитальные затраты на строительство электростанции. Сочетание ПГУ с солнечной установкой позволит создать высокоманевренный энергоблок с высокими показателями экономичности.

Ключевые слова: солнечная и возобновляемая типы энергии, технологии солнечных концентраторов, гибридные установки, парогазовая и тепловая электростанции.

Для цитирования: Ани А.А., Дудолин А.А. Перспективы использования гибридных тепловых электростанций с применением солнечных технологий в энергетике Народной Республики Бангладеш // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 44—51. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-44-51.

Prospects for the Use of Hybrid Thermal Power Plants with Applying Solar Technologies in the People's Republic of Bangladesh Energy Sector

A.A. Ani, A.A. Dudolin

There is an inextricable relationship and interdependence between the conditions of meeting energy consumption demands and environmental pollution. The interaction of these two factors and the development of production forces are gradually drawing attention to the problem of interaction between the thermal power engineering and environment. At the thermal power engineering early development stage, the main manifestation of this attention was the search in the environment for resources necessary to meet the energy consumption demands and stable energy supply to enterprises and residential buildings. In the subsequent, the problem boundaries were extended to the possibilities of a more complete use of natural resources through the search and improvement of processes and technology, extraction and enrichment, processing and combustion of fuel, as well as improvement of thermal power facilities. One of the ways to further develop thermal power plants and reduce their environmental impact is hybridization of solar technologies with conventional power plants.

To overcome the limitations of simple cycle power plants, a method for hybridizing conventional power plants with solar technologies and its influence on performance are considered.

The solar technologies used in the global energy sector are briefly overviewed. The efficiency of using hybrid power plants is studied with reference to the People's Republic of Bangladesh, which is one of the world's sunniest and actively developing regions. The state of the republic's energy sector, climatic features, and the possibility of using solar technologies for local conditions are analyzed. A solar thermal power plant model with a parabolic collector is considered; the efficiency of such power plants is analyzed, and technologies for using a combined-cycle power plant (CCPP) jointly with a solar steam generator for electricity generation are overviewed.

The schemes of combined-cycle power plants with a solar steam generator were numerically analyzed. The analysis results have shown that during the summer state peak, the use of the integrated power unit makes it possible to additionally obtain approximately 6.5% of the unit total power output in comparison with a similar classical CCPP, but without using the field of solar collectors and a solar steam generator. The use of one modern GE 9371FB gas turbine unit produced by General Electric makes it possible to increase the net efficiency by 3.9% and bring the combined cycle net efficiency up to 59%. The improvements in the power unit are carried out with the minimal impact on the combined cycle operation due to a limited contribution from the solar energy based steam generation system. The integrated system makes it possible to cut the capital costs for the power plant construction. The combination of a CCPP with a solar installation will open the possibility to construct a highly maneuverable power unit with high efficiency indicators.

Key words: solar energy, renewable energy, solar concentrator technologies, hybrid plants, combined cycle power plant, thermal power plant.

For citation: Ani A.A., Dudolin A.A. Prospects for the Use of Hybrid Thermal Power Plants with Applying Solar Technologies in the People's Republic of Bangladesh Energy Sector. Bulletin of MPEI. 2023;1:44—51. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-44-51.

Введение

В современном мире существует множество глобальных проблем. Одна из них — истощение природных ресурсов. Использование традиционных полезных ископаемых негативно влияет на мировую экологическую обстановку, поэтому человечество все больше задумывается об альтернативных источниках получения энергии. В этом смысле солнце — один из самых богатых и практически неисчерпаемых источников энергии. Солнечную энергию, полученную в форме радиации, можно напрямую или косвенно преобразовать в другие формы энергии, такие как тепло и электричество [1]. Достигнув земной атмосферы, солнечное излучение распадается на две компоненты — прямую нормальную и диффузионную. Излучение, рассеиваемое воздухом, молекулами воды и пыли в атмосфере, называют диффузионной компонентой. Прямая нормальная компонента излучения представляет собой часть солнечной радиации, достигающей поверхности земли, которая не была рассеяна или поглощена атмосферой. Ее считают интегральной величиной, определяющей ту часть нормального излучения, которая достигла земли за определенный промежуток времени ($\text{Дж}/\text{м}^2$ или $(\text{кВт}\cdot\text{ч})/\text{м}^2$). Концентраторы солнечной энергии (CSP-Concentrated Solar Power) или техноло-

гии гелиотермальной энергетики используют только прямое излучение. Вторую часть (диффузионное излучение) нельзя преобразовать в прямую радиацию, поэтому она бесполезна для CSP.

Как правило, территории с годовым объемом прямого излучения больше $1800 (\text{кВт}\cdot\text{ч})/\text{м}^2$ рассматривают в качестве потенциальных точек для развития CSP. Наибольший потенциал у системы CSP — в «солнечном поясе» Земли, расположенном между 20° южной широты и 40° северной широты [2].

В солнечных тепловых электростанциях солнечная энергия поглощается в форме тепла и преобразуется в электричество. Процесс преобразования проходит различными путями.

Технологии использования солнечной энергии делят на два основных типа:

- солнечные фотоэлектрические системы;
- технологии использования концентраторов солнечной энергии.

В солнечных фотоэлектрических системах солнечный свет, падающий на фотоэлектрический элемент, сначала напрямую преобразуется в постоянный электрический ток, а затем в переменный ток с помощью инвертора (рис. 1).

На солнечных тепловых электростанциях, использующих концентраторы солнечной энергии (CSP)

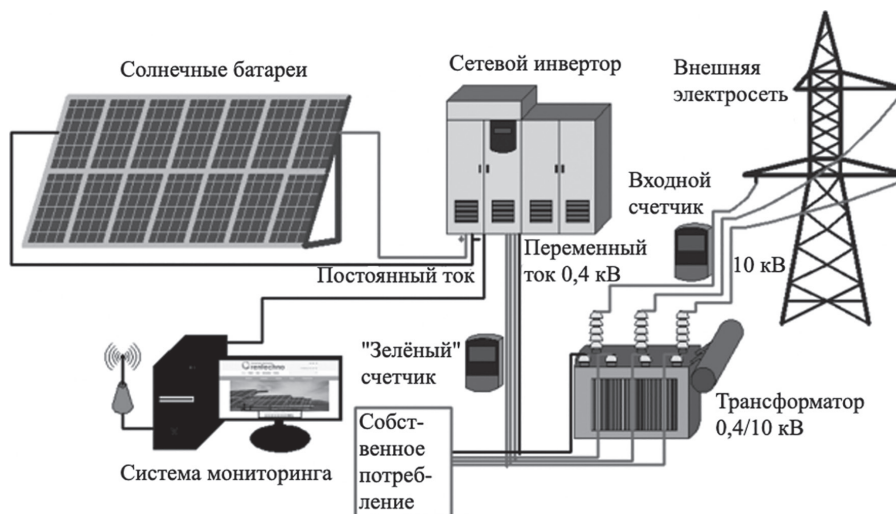


Рис. 1. Структурная схема сетевой фотоэлектрической электростанции

(рис. 2), энергию собирают при помощи различных типов зеркал, чтобы нагреть рабочую жидкость и вырабатывать пар. Пар необходим для вращения турбины или приведения в действие генераторов (на традиционных электростанциях). Для промышленных предприятий больше подходят технологии CSP, чем фотоэлектрической солнечной энергетикой [3].

Энергетический сектор Народной Республики Бангладеш в значительной степени зависит от ископаемого топлива. Около 62,9% производимой в стране электроэнергии обеспечивается природным газом, 10% — дизельным топливом, 5% — углем, 3% — тяжелой нефтью и 3,3% — возобновляемыми источниками [4, 5]. В 2020 г. уже 10% от общего объема выработки электроэнергии Бангладеш пришлось на возобновляемые

источники энергии (ветряную, гидро и солнечную энергию).

Доминирующая форма возобновляемой энергии в Бангладеш — солнечная, используемая в различных формах. Страна расположена между 20 и 26° северной широты и 88 и 92° восточной долготы, на западе, севере и востоке граничит с Индией, на юго-востоке — с Мьянмой. Географическое положение предполагает более высокое солнечное излучение. Климат — тропический, характеризуется мягкой зимой с октября по март и жарким летом с марта по июнь (рис. 3) [6]. Относительная влажность воздуха в течение года составляет порядка 60%. Количество солнечных часов зависит от времени года, в отдельные месяцы практически достигает 300 ч (рис. 4). Таким образом, значи-

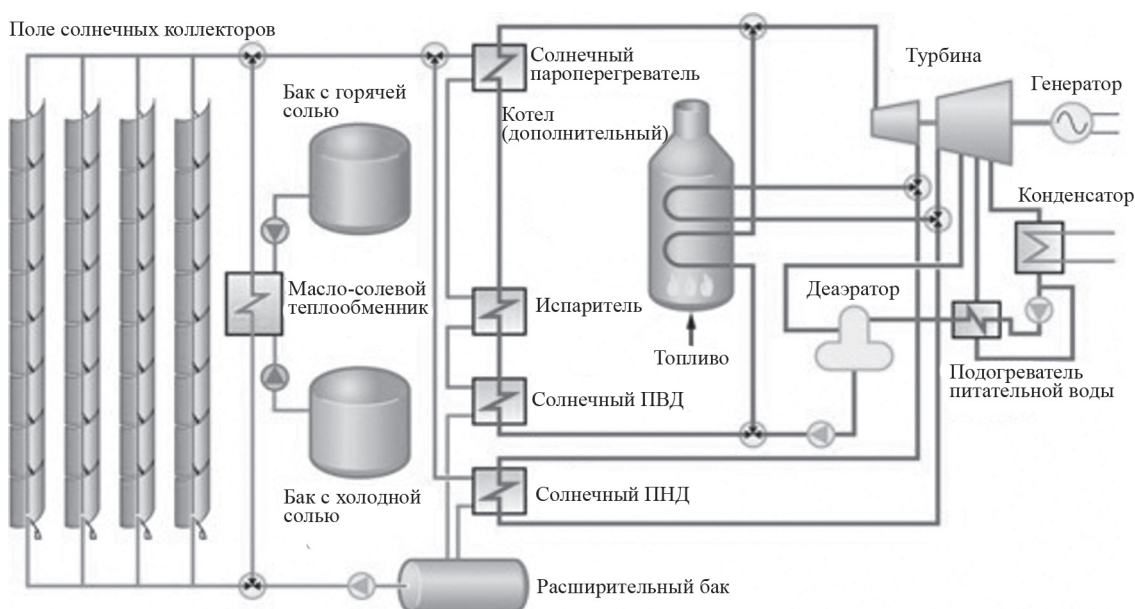


Рис. 2. Схема электростанции, использующей концентраторы солнечной энергии (CSP)

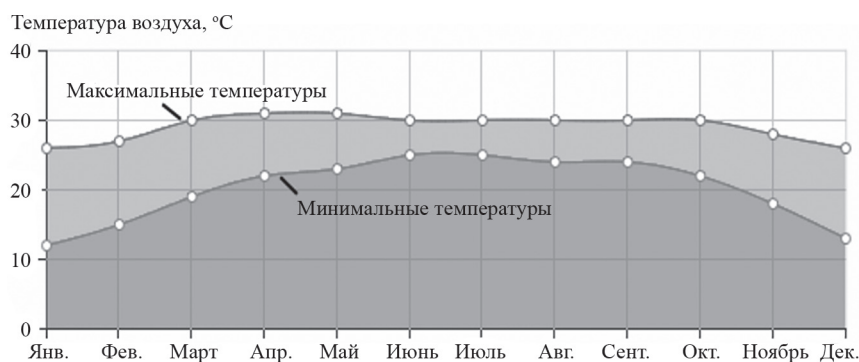


Рис. 3. Максимальные и минимальные температуры воздуха в течение года

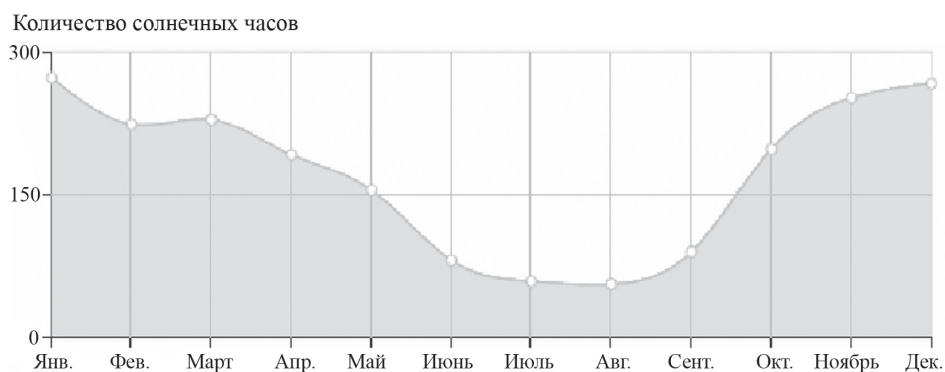


Рис. 4. Изменение количества солнечных часов в течение года

тельное количество солнечных дней в году, отсутствие резких температурных амплитуд и низких температур подтверждают значительный потенциал Народной Республики Бангладеш в использовании нетрадиционных источников энергии.

Солнечная паросиловая тепловая электростанция с параболическим желобом

Электростанция с параболическим желобом состоит из трех отдельных контуров: высокотемпературного на базе термомасла, пароводяного и циркуляционного охлаждения контура. Первый контур — высокотемпературный, заполнен термомаслом (обычно Therminol VP-1 [1]), протекающим через параболический желоб и нагревающимся за счет воздействия концентрированной солнечной энергии.

Важная особенность применения термомасел — их критическая температура, при которой оно начинает разлагаться. Обычно она выше 400 °C. Данный факт ограничивает температуру в термомасляном контуре с учетом температурного запаса ниже 390 °C, что ведет, в свою очередь, к ограничению температуры пара. Термомасло из солнечных коллекторов отправляется в парогенератор, где передает энергию паросиловому циклу, а избыток нагретого масла, если он есть, направляется в систему хранения тепловой энергии.

Энергетический цикл, используемый в установках с параболическим желобом, представляет собой обычный пароводяной цикл Ренкина–Клаузиуса с проме-

жуточным пароперегревателем. Из-за температурных ограничений термомасла термодинамические параметры пара на входе в турбину высокого давления составляют около 377 °C при 100 бар, что относительно мало по сравнению с современными паровыми электростанциями, работающими на органическом топливе. При подобных параметрах пара обычно требуется наличие испарительного охлаждения для обеспечения достаточно высокой эффективности цикла. Типичный электрический КПД силового блока электростанции с параболическим желобом составляет до 40%.

Рассмотрена модель солнечной тепловой электростанции SEGS VI (Solar Electric Generating Station VI) (см. рис. 3), расположенной в Крамер Джанкшен, Калифорния. Данная электростанция имеет схожие характеристики с климатическими условиями Бангладеш, поэтому энергоблок и параметры были взяты для первоначального исследования по данному энергообъекту. Схема смоделирована в программной среде «Термофлекс» производства компании «ThermoFlow». «Термофлекс» — программа для проведения термодинамических расчетов, анализа энергетических потоков жидкости и тепловых характеристик, используется многими крупными инженерными фирмами для решения сложных инженерных систем во многих отраслях и сферах применения.

Площадка рассматриваемого энергоблока расположена на уровне 35° северной широты, а ее высота над уровнем моря составляет 750 м, что считается важным фактором при определении уровня солнечной радиации.

Солнечные лучи отражаются от зеркал параболического желоба и фокусируются на трубе, по которой проходит термомасло. Контур термомасла передает тепло водяному контуру, создавая и нагревая пар. Электростанция представляет собой однократный цикл повторного нагрева с шестью нагревателями. В модели изображенного на рис. 5 энергоблока термомасло использовано в качестве теплоносителя с термодинамическими параметрами, соответствующими ограниченному диапазону рабочих температур термомасла.

Рассчитанное поле коллекторов состоит из 100 рядов зеркал, расположенных на площади порядка 70 га, что составляет 1,9 га на 1 МВт.

Результаты расчета энергоблока с солнечным парогенератором

Давление окружающей среды, бар	0,9265
Температура окружающей среды, °C	35
Относительная влажность, %	30
Температура окружающей среды по влажному термометру, °C	21,18
Мощность электрическая (брутто), кВт	34457
КПД электрический (брутто), %	38,21
Удельный расход тепла (брутто), кДж/кВт·ч	9422
Мощность электрическая (нетто), кВт	31909
КПД электрический (нетто), %	35,38
Удельный расход тепла (нетто), кДж/кВт·ч	10174
Тепловая мощность солнечных коллекторов, кВт	90179
Коэффициент использования теплоты топлива, %	35,38
Затраты электроэнергии на собственные нужды, кВт	2548,2
Расход питательной воды, т/ч	29,12
Расходование воды на солнечный парогенератор, т/ч	6,128

Проведенные расчеты показали, что КПД (нетто) составляет порядка 35% и считается относительно высоким для тепловых электрических станций небольшой мощности. Однако относительно низкие параметры пара негативно сказываются на работе механических систем турбины в цилиндрах низкого давления и приводят к эрозии лопаток. Отметим, что подобные низкие параметры пара ($P_0 = 0,1$ МПа, $t_0 = 371$ °C) ограничивают КПД цикла. Одно из решений этой проблемы — переход к газотурбинным и комбинированным циклам ПГУ.

Интегрированная солнечная комбинированная схема (ISCC— Integrated Solar Plant Combined Cycle)

Интегрированная солнечная комбинированная схема ТЭС — техническое решение, объединяющее параболическую систему концентрирования солнечной энергии с газотурбинным комбинированным циклом. Интегрированная концепция солнечной электростанции была изначально предложена компанией «LuzSolar International» (США). В начале XXI в. первые этапы исследования данных электростанций в некоторых развивающихся странах были поддержаны Глобальным экологическим фондом. Они касались оперативных вопросов и затрат, связанных с созданием первых блоков в Египте, Иране и Алжире. Пример тепловой схемы ПГУ (ISCC) дан на рис. 6.

В настоящее время такие типы электростанций широко применяют во многих странах мира (таблица).

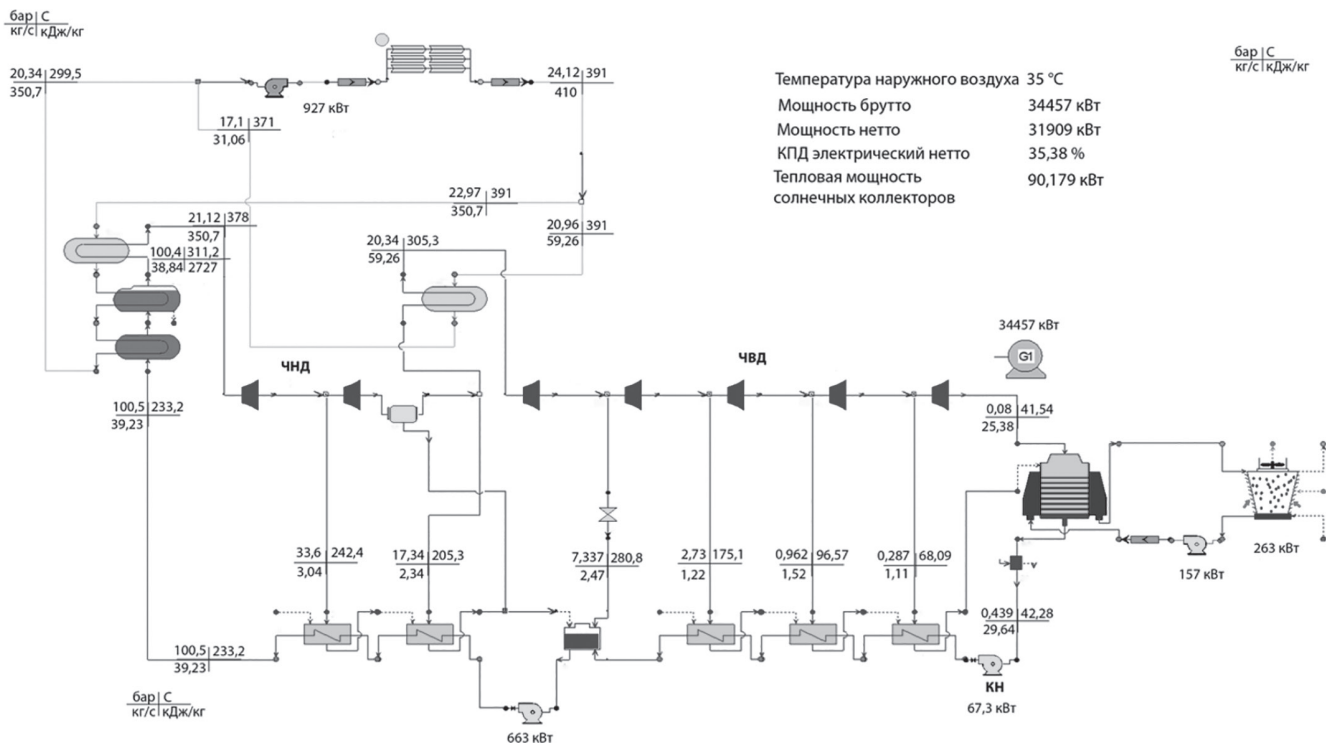


Рис. 5. Расчетная модель солнечной ТЭС с параболическим желобом

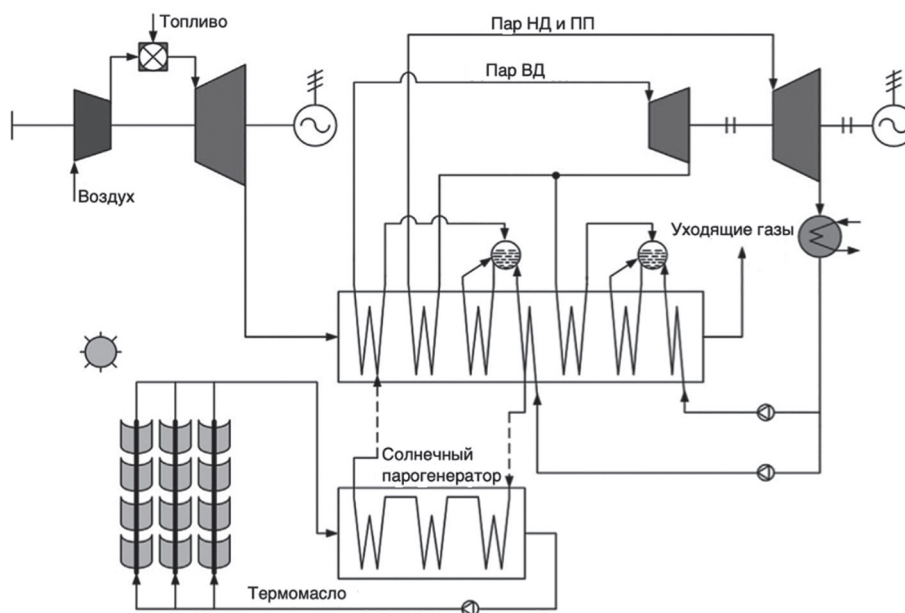


Рис. 6. Интегрированная солнечная комбинированная схема ПГУ

Проекты ISCC в мире

Проект	Страна	Полная мощность, МВт	Мощность CSP, МВт	Статус
Martin Next Generation Solar Energy Center (MNGSEC)	США	1125	75	Работает с 2010 г.
Archimede Combined Cycle Power Plant	Италия	636	15	
Hassi R'mel Integrated Solar Combined Cycle Power Station	Алжир	155	25	Работает с 2011 г.
ISCC Ain Beni Mathar	Марокко	472	20	
ISCC Kuraymat	Египет	140	20	
Yazd Solar Power Station	Иран	467	17	
Waad Al Shamal ISCC Plant	Саудовская Аравия	1390	50	В стадии строительства

Однако, для Бангладеш исследований по эффективности применения подобных электростанций не проводили.

С целью изучения особенностей работы данной тепловой схемы (ISCC) ПГУ с солнечными элементами в условиях Народной Республики Бангладеш было выполнено моделирование энергообъекта в программе «Термофлекс» на базе моноблока ПГУ с газовыми турбинами типа 9FB фирмы «Дженерал электрик» (рис. 7).

Комбинированный цикл ПГУ в сочетании с солнечным генератором способен производить перегретый пар высокого давления. Как следует из принципиальной схемы рис. 7, поле параболических солнечных коллекторов нагревает термомасло «Therminol VP-1», которое затем направляется через серию кожухотрубных теплообменников к котлу-утилизатору. В теплообменники также поступает предварительно нагретая питательная вода. На выходе из теплообменников генерируется перегретый пар. Поскольку температура

термомасла ограничена уровнем в 400 °С, требуется окончательный перегрев пара в пароперегревателе котла-утилизатора. Таким образом, солнечный генератор получает часть предварительно нагретой питательной воды от котла-утилизатора и возвращает перегретый пар, смешиваемый с паром высокого давления, выходящим из контура высокого давления пароперегревателя (HPS0). Смесь перегревается в пароперегревателе (HPS3) до параметров, используемых в паровой турбине (приблизительно 550 °С) перед стопорными клапанами.

Котел-утилизатор (КУ) снабжен дополнительным дожигающим устройством, служащим для получения дополнительного количества пара, когда солнечный генератор недоступен. Конфигурация представленной модели ПГУ позволяет получать порядка 25% тепла пара высокого давления в солнечном генераторе, а остальные 75% производятся в КУ [7 — 11]. Учитывая изменение солнечного излучения в сочетании с воздействием температуры окружающей среды на произ-

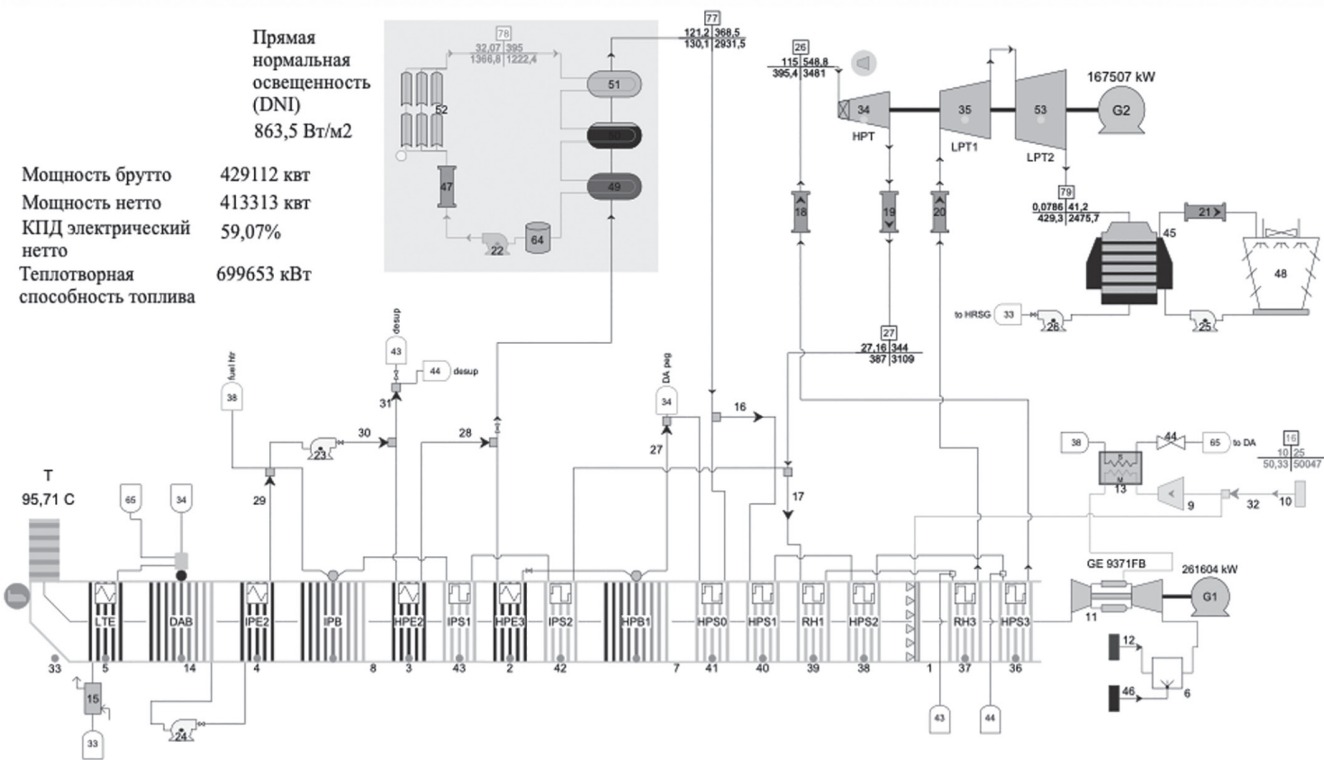


Рис. 7. Расчетная модель энергоблока ПГУ с солнечным парогенератором на базе ГТУ типа GE 9371FB фирмы «Дженерал Электрик»

водительность газовой турбины, солнечный генератор может производить до 35% тепла пара высокого давления при пиковых летних условиях, и гораздо меньше в зимние периоды работы. Применение в блоке зеркал с высокой отражающей способностью доказало свою долговечность на открытом воздухе, что подтверждено Национальной лабораторией возобновляемых источников энергии («NREL»), а система управления и привода гарантирует точность отслеживания (5% от 1°) и высокую надежность.

Рассчитанное поле коллекторов состоит из 68 рядов зеркал и оценочно занимает поле почти 34 га для обеспечения летнего пика в объеме 415 МВт электроэнергии (нетто).

Результаты расчета энергоблока ПГУ с солнечным парогенератором на базе ГТУ типа GE 9371FB фирмы «Дженерал Электрик»

Давление окружающей среды, бар	1,007
Температура окружающей среды, °C	35
Относительная влажность, %	40
Температура окружающей среды по влажному термометру, °C	23,93
Мощность электрическая (брутто), кВт	429112
КПД электрический (брутто), %	61,33
Удельный расход тепла (брутто), кДж/кВт·ч	5870
Мощность электрическая (нетто), кВт	413313
КПД электрический (нетто), %	59,07

Удельный расход тепла (нетто), кДж/кВт·ч	6094
Теплотворная способность топлива, кВт	699653
Коэффициент использования теплоты топлива, %	59,07
Затраты электроэнергии на собственные нужды, кВт	15799
Расход питательной воды, т/ч	504,6
Расход воды на солнечный парогенератор, т/ч	103,3

Выводы

Проведенные расчеты показали, что интегрированный блок ПГУ с солнечным парогенератором на пике летнего состояния позволяет дополнительно получить около 27,5 МВт мощности (нетто) (6,5% общей мощности блока), по сравнению с аналогичным блоком ПГУ [4], но без использования поля солнечных коллекторов и солнечного парогенератора. При этом, решение на базе ГТУ типа GE 9371FB увеличивает КПД (нетто) на 3,9%, а КПД (нетто) комбинированного цикла становится выше 59%. Следует отметить, что проведенные улучшения в блоке выполнены с минимальным воздействием на работу комбинированного цикла из-за ограниченного вклада от системы генерации пара от солнечной энергии. При использовании более мощных солнечных парогенераторов появляется возможность увеличить количество генерируемого пара. В таком случае будет наблюдаться пропорционально большее влияние на мощность и эффективность всего энергоблока, но в то же время это увеличит стоимость, усложнит проектирование и эксплуатацию установки.

Литература

References

1. **Spelling J., Laumert B., Fransson T.** Advanced Hybrid Solar Tower Combined-cycle Power Plants // *Energy Technol.* 2014. V. 49. Pp. 1207—1217.

2. **Попель О.С.** Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике // *Российский химический журнал.* 2008. Т. 52. С. 95—106.

3. **Статистика** международного энергетического агентства [Официальный сайт] <https://www.iea.org/> (дата обращения 08.02.2022).

4. **Taheruzzaman M., Janik P.** Electric Energy Access in Bangladesh // *Trans. Environment and Electrical Eng.* 2016. V. 1. No. 2. Pp. 6—17.

5. **Saleh E.S.** Bangladesh Power Sector Review for 2020 [Электрон. ресурс] https://www.researchgate.net/publication/343813020_Bangladesh_Power_Sector_Review_for_2020 (дата обращения 08.02.2022).

6. **Bangladesh** Meteorological Dept. [Официальный сайт] <http://live3.bmd.gov.bd/> (дата обращения 20.05.2022).

7. **Rahman M.** Solar Energy Potential in Bangladesh // *Proc. Intern. Conf. Mechanical Eng. and Renewable Energy.* 2013. Pp. 1—5.

8. **Bangladesh** Power Development Board <https://www.bpdb.gov.bd/> [Официальный сайт] (дата обращения 22.05.2022).

9. **Barua A. e a.** Analysis of Concentrated Solar Power Technologies' Feasibility, Selection and Promotional Strategy for Bangladesh // *J. Mechanical Eng.* 2014. V. 44. No. 2. Pp. 112—116.

10. **Popov D.** Innovative Solar Augmentation of Gas Turbine Combined Cycle Plants // *Appl. Thermal Eng.* 2014. V. 64. Pp. 40—50.

11. **Дудолин А.А., Ани А.А., Олейникова Е.Н.** Создание парогазовых энергоблоков с солнечными парогенераторами // *Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики: Сб. трудов IV Всерос. науч. конф. Изд-во ЧГУ им И. Н. Ульянова, 2016. С. 145—148.*

1. **Spelling J., Laumert B., Fransson T.** Advanced Hybrid Solar Tower Combined-cycle Power Plants. *Energy Technol.* 2014;49:1207—1217.

2. **Popel' O.S.** Vozobnovlyaemye Istochniki Energii: Rol' i Mesto v Sovremennoy i Perspektivnoy Energetike. *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal.* 2008;52:95—106. (in Russian).

3. **Statistika** Mezhdunarodnogo Energeticheskogo Agentstva [Ofits. Sayt] <https://www.iea.org/> (Data Obrashcheniya 08.02.2022). (in Russian).

4. **Taheruzzaman M., Janik P.** Electric Energy Access in Bangladesh. *Trans. Environment and Electrical Eng.* 2016;1;2:6—17.

5. **Saleh E.S.** Bangladesh Power Sector Review for 2020 [Elektron. Resurs] https://www.researchgate.net/publication/343813020_Bangladesh_Power_Sector_Review_for_2020 (Data Obrashcheniya 08.02.2022).

6. **Bangladesh** Meteorological Dept. [Ofits. Sayt] <http://live3.bmd.gov.bd/> (Data Obrashcheniya 20.05.2022).

7. **Rahman M.** Solar Energy Potential in Bangladesh. *Proc. Intern. Conf. Mechanical Eng. and Renewable Energy.* 2013:1—5.

8. **Bangladesh** Power Development Board <https://www.bpdb.gov.bd/> [Ofits. Sayt] (Data Obrashcheniya 22.05.2022).

9. **Barua A. e a.** Analysis of Concentrated Solar Power Technologies' Feasibility, Selection and Promotional Strategy for Bangladesh. *J. Mechanical Eng.* 2014; 44;2:112—116.

10. **Popov D.** Innovative Solar Augmentation of Gas Turbine Combined Cycle Plants. *Appl. Thermal Eng.* 2014;64:40—50.

11. **Dudolin A.A., Ani A.A., Oleynikova E.N.** Sozdanie Parogazovykh Energoblokov s Solnechnymi Parogeneratorami. *Nanostrukturirovannye Materialy i Preobrazovatel'nye Ustroystva dlya Solnechnoy Energetiki: Sb. Trudov IV Vseros. Nauch. Konf. Izd-vo CHGU im I. N. Ul'yanova, 2016:145—148.* (in Russian).

Сведения об авторах:

Ани Арноб Алам — аспирант, ассистент кафедры тепловых электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: AniA@mpei.ru
Дудолин Алексей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: DudolinAA@mpei.ru

Information about authors:

Ani Arnob Alam — Ph.D.-student, Assistant of Thermal Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: AniA@mpei.ru
Dudolin Aleksey A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Thermal Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: DudolinAA@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Работа выполнена при поддержке: Министерства образования и науки России (Шифр научной темы FSWF-2020-0021)
The work is executed at support: Ministry of Education and Science of Russia (Code of Scientific Topic SWF-2020-0021)

Статья поступила в редакцию: 15.07.2022

The article received to the editor: 15.07.2022

Статья принята к публикации: 24.10.2022

The article has been accepted for publication: 24.10.2022