НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408
электронный научно-технический журнал

Перспективная солнечная энергоустановка башенного типа с газотурбинным преобразователем энергии

 # 11, ноябрь 2012
DOI: 10.7463/1112.0483782
Иванов А. Е., Манушин Э. А.
УДК.621.311.26

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
frezerovschik@gmail.com

Введение

Главные достоинства башенных солнечных электростанций (СЭС) – возможность комбинирования их с тепловыми установками для создания гибридных электростанций, получающих солнечную энергию в светлое время суток и, тем самым, экономящих ресурсы ископаемого топлива. Кроме того, гибридизация и аккумулирование теплоты повышают экономическую ценность производимой электроэнергии и снижают ее среднюю стоимость. С учетом циклического и случайного характера солнечного излучения башенные СЭС могут быть источником дублирующей мощности в энергосистеме и предназначаться для экономии дефицитного органического топлива.

По сравнению с традиционно используемыми в башенных СЭС паротурбинными установками (ПТУ), работающими по паровому циклу Ренкина, использование в качестве преобразователя солнечной энергии газотурбинных установок (ГТУ), работающих по открытому циклу Брайтона, позволяет избавиться от трудностей, связанных с применением водяного пара в замкнутом контуре, и использовать в качестве рабочего тела турбомашины продукты сгорания различного топлива в воздухе. Важным достоинством ГТУ по сравнению с ПТУ является их высокая маневренность, а также возможность использования разнообразных видов топлива, в том числе перспективного биогаза. Это позволяет создавать полностью автономную электростанцию для населенных пунктов с децентрализованным энергоснабжением или районов, где стоимость электроэнергии высока.

В условиях Российской Федерации наибольший интерес для исследования представляют солнечные электростанции мощностью несколько мегаватт, способные обеспечивать

электроэнергией небольшие отдаленные поселки. При этом СЭС должна иметь возможность использовать органическое топливо и регулировать его потребление в зависимости от мощности потребляемого солнечного излучения.

Общая схема установки

В соответствии с принятой классификацией ГТУ в составе башенных СЭС мощностью несколько мегаватт относятся к установкам малой мощности. Такие установки в сравнении с ГТУ средней и большой мощности по ряду объективно присущих им причин характеризуются меньшими КПД, однако такой уровень мощности дает возможность в башенных СЭС применять ГТУ, работающие как по открытому термодинамическому циклу, так и ГТУ замкнутого цикла, в которых рабочее тело циркулирует по замкнутому контуру.

В последних в качестве рабочего тела могут применяться воздух, азот, инертные газы и их смеси (например, гелиево-ксеноновая смесь), циркулирующие при больших давлениях. При определенной мощности СЭС турбокомпрессорный блок, как показывает опыт проектирования, получается весьма компактным. Это существенное достоинство замкнутых ГТУ для башенных СЭС, облегчающее компоновку части ГТУ в ограниченном пространстве на вершине башни. Особенно это справедливо для замкнутых ГТУ мощностью в сотни киловатт. Однако из-за больших давлений рабочего тела становится невозможным получение высоких КПД компрессоров и турбин, следовательно, и ГТУ в целом. Кроме того, для отвода теплоты из цикла после расширения рабочего тела в турбине обязательно требуется дополнительный агрегат – концевой газоохладитель, создание которого для работы в условиях СЭС представляет собой трудно решаемую конструкторскую задачу. Все это снижает показатели надежности и экономичности ГТУ и всей СЭС.

Более привлекательным остается вариант ГТУ открытого цикла, КПД которой по сравнению с ГТУ простейшего цикла может быть повышен разными способами. Например, рассматривалась возможность использования таких известных способов повышения КПД ГТУ, как промежуточное охлаждение вместе с промежуточным подогревом рабочего тела в цикле, применения комбинированных парогазовых установок и другие [1]. Однако все эти способы в условиях СЭС трудно применимы, поскольку, как можно показать, приводят к значительному увеличению габаритов башни, к усложнению ее конструкции и, как следствие, к удорожанию СЭС в целом.

Наиболее применимым из всех возможных решений, связанных с усложнением термодинамического цикла ГТУ, является, по нашему мнению, применение регенеративных ГТУ открытого цикла. Принципиальная схема СЭС с такой ГТУ приведена на рис. 1.

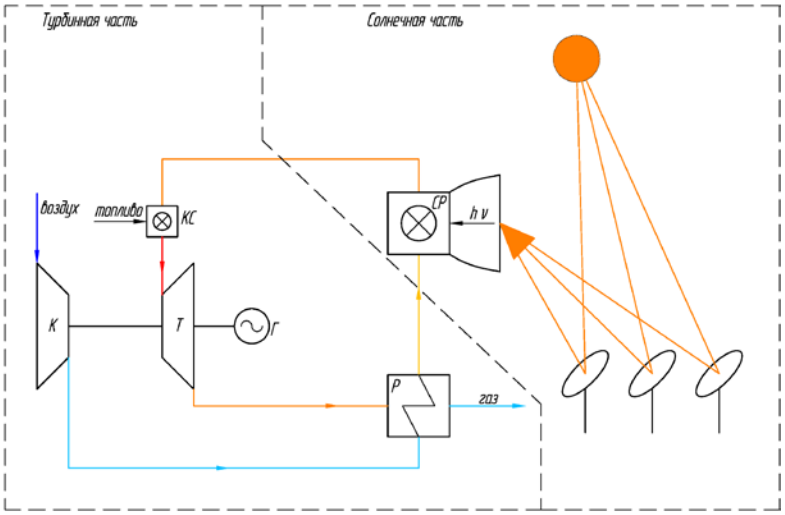

Рис. 1. Принципиальная схема СЭС с регенеративной ГТУ открытого цикла: *К* – компрессор; *Т* – турбина; *Г* – электрогенератор; *Р* – регенератор; *КС* – камера сгорания ГТУ; *СР* – солнечный ресивер

Атмосферный воздух поступает в компрессор *К*, где происходит его сжатие с одновременным повышением температуры. Затем воздух поступает в регенератор *Р*, где происходит его нагрев продуктами сгорания, отработавшими в газовой турбине *Т*. Нагретый воздух поступает в солнечный ресивер *СР* и нагревается за счет излучения, отраженного гелиостатами. Далее воздух следует в камеру сгорания *КС*, где в зависимости от величины принятого количества теплоты в солнечном ресивере нагревается до начальной температуры сгорания топлива. Затем продукты сгорания поступают в турбину, расширяются, после чего протекают через регенератор и выходят в атмосферу. Мощность, создаваемая на валу турбины, частично расходуется на привод компрессора, а частично передается электрогенератору.

Заметим, что в солнечном ресивере по условию прочности его деталей воздух может быть подогрет не выше, чем до 1273 К. По этой причине даже при максимальном уровне солнечного излучения требуется подвод топлива в камеру сгорания для получения заданной температуры газа перед турбиной.

Выполнен проект СЭС электрической мощностью 4000 кВт, работающей по описанной схеме. Основные параметры спроектированной установки приведены в таблице.

Основные параметры установки

Параметр	Единица измерения	Значение
Начальная температура воздуха	К	288
Начальное давление воздуха	МПа	0,101
КПД компрессора	–	0,85
КПД турбины	–	0,92
Коэффициент полноты горения топлива	–	0,99
Степень регенерации	–	0,7
Коэффициент сохранения полного давления в ресивере	–	0,95
Степень повышения давления в компрессоре	–	9,5
Температура воздуха за компрессором	К	594
Давление воздуха за компрессором	МПа	0,953
Температура газа перед турбиной	К	1423
Давление газа перед турбиной	МПа	0,852
Давление газа за турбиной	МПа	0,104
Степень понижения давления в турбине	МПа	8,16

Расчетный термодинамический КПД ГТУ в отсутствие солнечного излучения составляет 34,3 %.

Общая компоновка всего оборудования, устанавливаемого на верху башни, приведена на рис. 2.

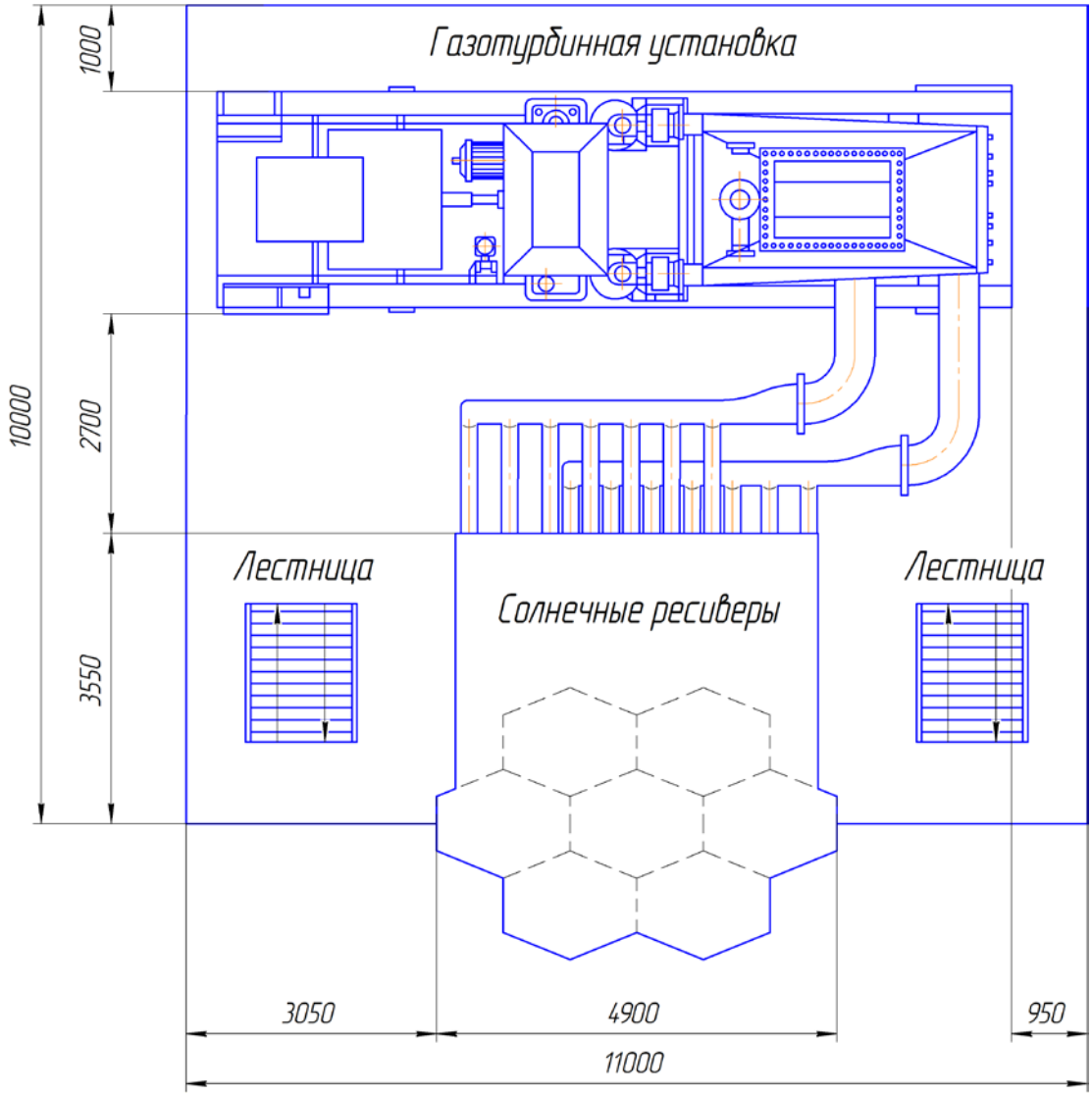

Рис. 2. Общая компоновка оборудования на верху башни

Солнечные ресиверы

Известны два типа солнечных ресиверов – трубчатые и объемные, которые могут применяться в системах центрального приемника солнечного излучения (СЦП). С трубчатыми приемниками связаны первые проектные разработки СЦП, их достоинства заключаются в простоте изготовления и отработанной технологии производства трубчатых теплообменников. Ресиверы объемного типа появились позднее, вместе с тем, в настоящее время они являются наиболее распространенными. Преимущества объемных ресиверов перед трубчатыми – простота конструкции, меньшая стоимость, большая эффективность и компактность.

В выполненном проекте в качестве прототипа выбран современный ресивер типа REFOS (Pressurized Air Receiver) для газотурбинных и комбинированных систем башенных СЭС [2]. Выполнено моделирование прототипа для расчетной тепловой мощности спроектированной

установки. Ресивер-прототип имеет следующие характеристики: тепловая мощность – 400 кВт, максимальная температура газа на выходе из ресивера – 1273 К, КПД ресивера – 80%.

Конструктивная схема ресивера приведена на рис. 3. Вторичный концентратор в форме параболоида с диаметром на входе D направляет поток солнечного излучения, собранный полем гелиостатов. Входное сечение параболоида переходит в шестигранник, что обеспечивает модульность конструкции и возможность сборки общего поля вторичных концентраторов требуемой тепловой мощности из нескольких ресиверов. Концентрированный солнечный свет проходит через окно куполообразной формы из кварцевого стекла диаметром d_w, затем поглощаясь объемным абсорбером. Сжатый воздух, подогретый в регенераторе, поступает в ресивер и при течении в нем нагревается во всем объеме нагретой структуры объемного поглотителя. Нагретый воздух выходит из ресивера через выходную трубу и поступает в камеру сгорания, где осуществляется окончательный подогрев до требуемой температуры.

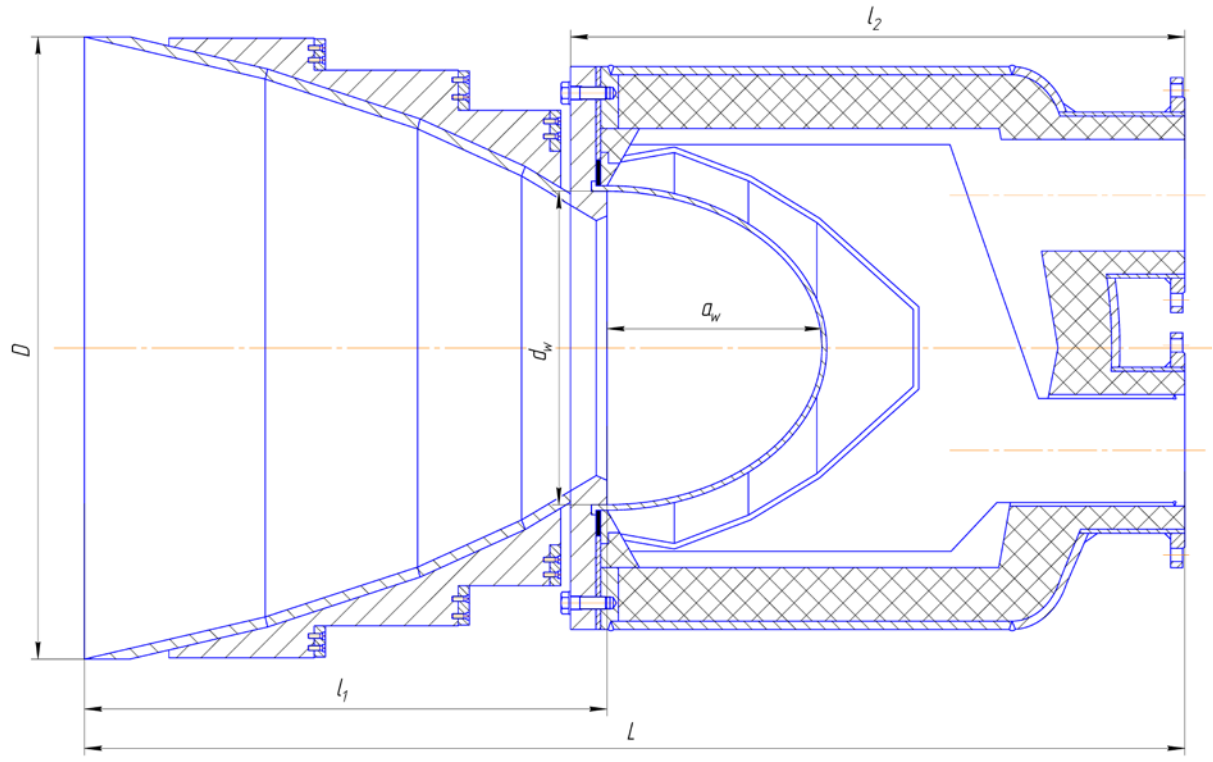

Рис. 3. Конструктивная схема ресивера

В результате проведенных исследований выбрана система из семи ресиверов, смоделированных на основе прототипа. При этом изменена конструкция вторичных концентраторов – в качестве них выбраны фоконы (фокусирующие конусы), изготавливаемые

методом гальванопластики, что позволяет увеличить интегральный коэффициент пропускания фоконов до 0,91 [3]. Расчетный КПД такой системы 80%.

Система слежения гелиостатов за Солнцем

Для того чтобы максимальное количество солнечной энергии отражалось в приемник излучения, необходимо отслеживать положение Солнца с высокой степенью точности. В проекте СЭС применена система слежения открытого типа, которая основана на принципе регулирования без обратной связи. В такой системе положение гелиостатов регулируется в зависимости от времени суток и географических координат местности благодаря использованию известных координат Солнца в каждый момент времени. Данная система по сравнению с закрытыми системами, основанными на принципах регулирования с обратной связью, позволяет осуществлять независимое регулирование каждого гелиостата в автоматическом режиме.

Система состоит из контроллера, приемника сигнала GPS (глобальной системы позиционирования), моторов для управления положением гелиостатов, адаптера питания и управляющей программы регулирования. Принципиальная схема приведена на рис. 4.

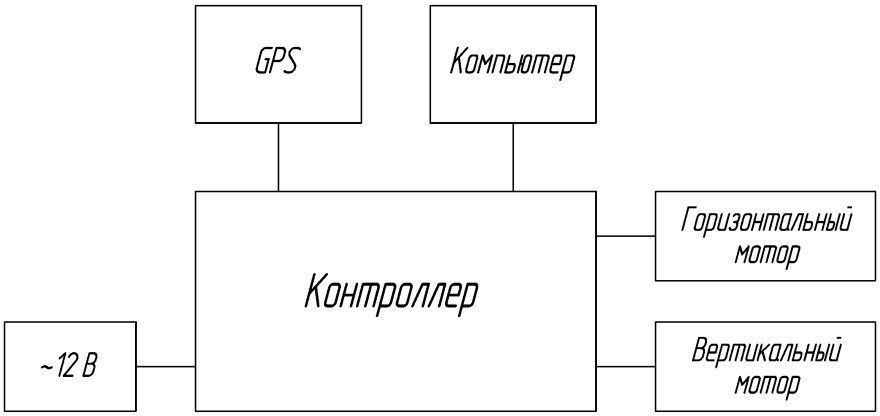

Рис. 4. Принципиальная схема системы слежения гелиостатов за Солнцем

Микроконтроллер на основе данных, передаваемых на приемник GPS со спутников, регулирует положение каждого гелиостата с помощью двух однополюсных шаговых электромоторов. Система имеет высокую точность регулирования, при этом она проста и надежна.

Поле гелиостатов и башня

Исследованы параметры рационального расположения концентраторов, обеспечивающие максимальную эффективность работы гелиостатов, при которых обеспечивается наименьшая

площадь поля концентраторов, минимальное число гелиостатов, наименьшая высота башни. Общее количество гелиостатов составило около 1000 шт. Площадь поля, занимаемого гелиостатами, составляет 15,9 га. Оптимальная высота башни при этом равна 100 м. Конфигурация поля гелиостатов представлена на рис. 5.

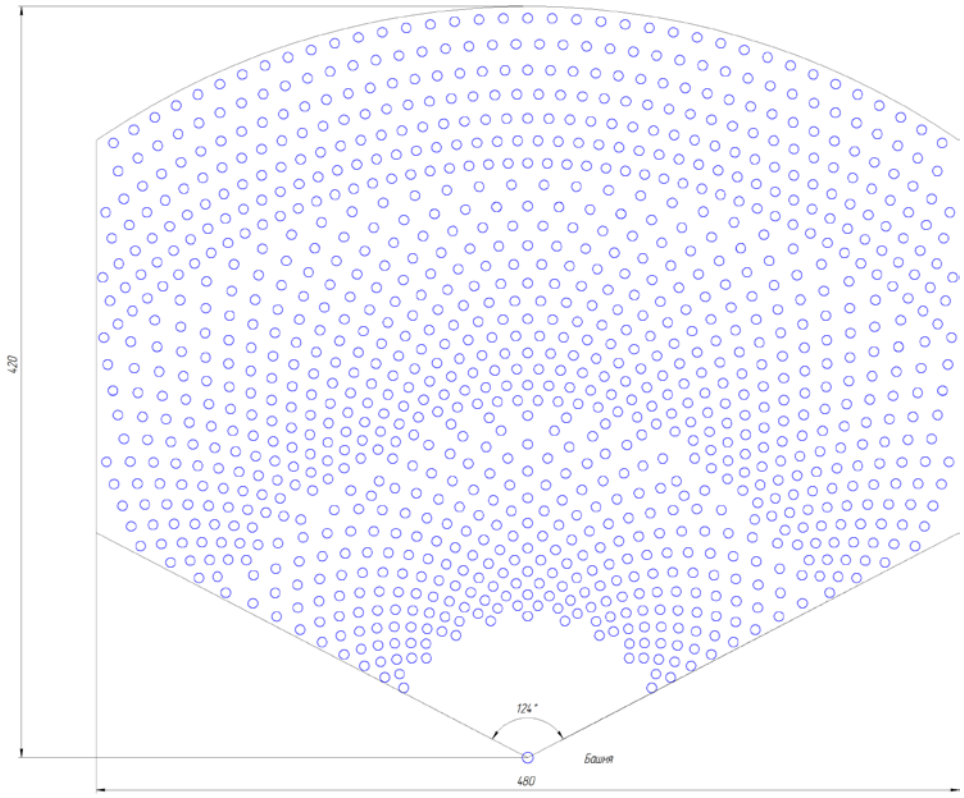

Рис. 5. Конфигурация поля гелиостатов

Перспективы внедрения спроектированной СЭС

Согласно данным о среднегодовых уровнях падения прямого солнечного излучения на Землю на территории Российской Федерации, приведенным в работе [4], одним из наиболее перспективных регионов внедрения башенных СЭС является Приморский край. В окрестностях Владивостока среднесуточная норма солнечной радиации составляет 5,5 кВт·ч/(м^2·день), что эквивалентно средней мощности солнечного излучения 230 Вт/м^2. При работе установки постоянно в режиме максимальной мощности при указанной мощности излучения среднегодовая экономия газообразного топлива за счет использования солнечной энергии составляет 22 %. На эту же величину снижаются выбросы в атмосферу углекислого газа. При работе установки только в светлое время суток экономия топлива достигает 60 % при максимальном рассматриваемом уровне мощности солнечного излучения (600 Вт/м^2). Установка может быть рекомендована для использования на территории Дальнего Востока,

Северного Кавказа и в других регионах с высоким уровнем прихода прямого солнечного излучения на Землю.

Список литературы

1. Schwarzbözl P., Buck R., Sugarmen C., Ring A., Crespo M.J., Altwegg P., Enrile J.. Solar gas turbine systems: Design, cost and perspectives // Solar Energy. 2006. Vol. 80, no. 10. P. 1231-1240. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.09.007

2. Buck R., Bräuning T., Denk T., Pfänder M., Schwarzbözl P., Téllez F. Solar-hybrid gas turbine-based power tower systems // Journal of Solar Energy Engineering. Transactions of the ASME. 2002. Vol. 124, no. 1. P. 2-9. DOI: http://dx.doi.org/10.1115/1.1445444

3. Стребков Д.С., Тверьянович Э.В. Концентраторы солнечного излучения. М.: Изд. ГНУ ВИЭСХ, 2007. 315 с.

4. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: Объединённый институт высоких температур РАН, 2010. 86 с.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Prospective solar power tower with gas turbine energy convertor

 # 11, November 2012

DOI: 10.7463/1112.0483782

Ivanov A.E., Manushin E.A

Russia, Bauman Moscow State Technical University

frezerovschik@gmail.com

This paper presents research results of schematics, design parameters of prototype combined solar power tower with a gas turbine energy convertor of the power level of 4 MW. Computations of the main components of the power plant (solar receivers, solar tracking system, field of heliostats etc.) which determine its appearance and output parameters were conducted. On this basis design drawings were made. The environmental effect of application of such plants is shown. Estimation of the prospects of using solar tower power plants in Russia is presented.

Publications with keywords:field of heliostats, tracking system, solar power tower, solar receiver, gas turbine unit

Publications with words:field of heliostats, tracking system, solar power tower, solar receiver, gas turbine unit

References

1. Schwarzbözl P., Buck R., Sugarmen C., Ring A., Crespo M.J., Altwegg P., Enrile J.. Solar gas turbine systems: Design, cost and perspectives. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, no. 10, pp. 1231-1240. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.09.007

2. Buck R., Bräuning T., Denk T., Pfänder M., Schwarzbözl P., Téllez F. Solar-hybrid gas turbine-based power tower systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, Transactions of the ASME, 2002, vol. 124, no. 1, pp. 2-9. DOI: http://dx.doi.org/10.1115/1.1445444

3. Strebkov D.S., Tver'ianovich E.V. *Kontsentratory solnechnogo izlucheniia* [Concentrator of solar radiation]. Moscow, GNU VIESKh Publ., 2007. 315 p.

4. Popel' O.S., Frid S.E., Kolomiets Iu.G., Kiseleva S.V., Terekhova E.N. *Atlas resursov solnechnoi energii na territorii Rossii* [Atlas of the resources of solar energy on the territory of Russia]. Moscow, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Publ., 2010. 86 p.