

World Scientific and Engineering Congress

Дүниежүзілік
инженерлер мен
ғалымдардың
конгресі

Всемирный Конгресс
инженеров и ученых

«Future energy:
innovation scenarios
and methods of their
implementation»
WSEC-2017

«Болашақтың
энергиясы:
инновациялық
сценарийлер және
олардың жүзеге асыру
әдістері» WSEC-2017

«Энергия будущего:
инновационные
сценарии и методы
их реализации»
WSEC-2017

19-20

june/маусым/июня
2017

Astana/Астана

3

CONGRESS PROCEEDINGS | VOLUME 3
КОНГРЕСТІҢ МАТЕРИАЛДАРЫ | 3 ТОМ
МАТЕРИАЛЫ КОНГРЕССА | ТОМ 3

PROCEEDINGS
World Scientists and Engineers Congress
**«Energy of the future: innovative scenarios and
methods of their implementation» WSEC-2017**

June 19-20, 2017, Astana

Under the general editorship of academician
N. Abykayev and B. Zhumagulov

VOLUME 3



**«Болашақтың энергиясы: инновациялық сценарийлер және
оларды жүзеге асыру әдістері» WSEC-2017 Дүниежүзілік
инженерлер мен ғалымдардың Конгресінің
МАТЕРИАЛДАРЫ**

19-20 маусым, 2017, Астана

Н.Ә. Әбіқаев және Б.Т. Жұмағұлов академиктері
басқарған жалпы редакциясында

ТОМ 3



МАТЕРИАЛЫ
Всемирного Конгресса инженеров и ученых
**«Энергия будущего: инновационные сценарии и методы
их реализации» WSEC-2017**

19-20 июня, 2017, Астана

Под общей редакцией академиков
Н. А. Абыкаева и Б. Т. Жумагулова

ТОМ 3

Energy of the future: innovative scenarios and methods of their implementation:
World Congress of Engineers and Scientists proceedings (June 19-20, 2017, Astana, Kazakhstan). Under the general editorship of academicians N.A. Abykayev, B.T. Zhumagulov. – Т.3. – Almaty, 2017. – 342 p.

ISBN 978-601-06-4271-3

The proceedings includes speeches and papers of the participants of the World Congress of Engineers and Scientists "Energy of the Future: Innovative Scenarios and Methods of their Implementation" hosted within the framework of the World Exhibition EXPO-2017 in four areas:

- Prospects and scenarios for the development of the world power industry until 2050.
- Balance of the energy trilemma: safety, availability and environmental sustainability
- Trends in the development of world energy resources
- Scientific resource staffing.

Leaders of authoritative international organizations and research centers, major energy companies, leading foreign and Kazakhstan universities, prominent scientists, engineers and specialists participated in the Congress.

The papers of proceedings are of interest to the leaders of energy industries and companies, specialists in public administration, engineers, scientists and workers in the field of training scientific and engineering personnel.

The plenary papers of the Nobel Prize laureates and the International Global Energy Prize will be published in a separate edition in the working languages of the Congress.

ISBN 978-601-06-4271-3

© National Engineering Academy of the Republic of
Kazakhstan, Kazakhstan National Academy of
Natural Sciences, 2017

Болашақ
жүзеге асыр
териалдары
академиктері

ISBN 978

«ЭКСПО
ИННОВАЦИЯЛЫ
МЕН ҒАЛЫМДА
МАКАЛАТАРЫ
• Бүкіл
сценарийлері
• Энерг
ЭКОЛОГИЯЛЫҚ
• Әлемді
• Ғылым

Беделді ха
компаниялар
нымал ғалым
Жинақтағ
мемлекеттік б
инженерлік к
танытады.
Нобель ж
планарлық ба

ISBN 978-601-4

Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации: материалы Всемирного Конгресса инженеров и ученых (19-20 июня, 2017, Астана, Казахстан). Под общ. ред. акад. Н.А. Абыкаева, Б.Т. Жумагулова. – Т.3.– Алматы, 2017. – 342 с.

ISBN 978-601-06-4271-3

Сборник включает выступления и доклады участников Всемирного Конгресса инженеров и ученых «Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации», проведенного в рамках Всемирной выставки «ЭКСПО-2017», по четырем направлениям:

- Перспективы и сценарии развития мировой энергетики до 2050 г.
- Баланс энергетической трилеммы: безопасность, доступность и экологическая устойчивость.
- Тренды развития мировых энергоресурсов.
- Научное кадровое обеспечение.

В Конгрессе приняли участие руководители авторитетных международных организаций и исследовательских центров, крупных энергетических компаний, ведущих зарубежных и казахстанских вузов, видные ученые, инженеры и специалисты.

Материалы сборника представляют интерес для руководителей энергетических отраслей и компаний, специалистов государственного управления, инженеров, ученых и работников сферы подготовки научных и инженерных кадров.

Пленарные доклады лауреатов Нобелевской премии и международной премии «Глобальная энергия» будут опубликованы в отдельном издании на рабочих языках Конгресса.

ISBN 978-601-06-4271-3

© Национальная инженерная академия
Республики Казахстан, Казахская
национальная академия естественных
наук, 2017

Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Ляхова О.Н., Айдарханова А.К. Разработка методологии создания биологических площадок мониторинга экосистем зоны влияния АЭС.	250
Мун Г.А., Сулейменов И.Э., Игликов И.В., Габриелян О.А., Шалтыкова Д.Б., Ирмухаметова Г.С., Абдыкалыкова Р.А., Нурпеисова Ж., Панченко С.В., Нуртазин А. Системы энергосбережения на основе стимул-чувствительных полимеров и проблемы становления энергоэффективного общества.	252
Мусабеков М.О., Мусабекова А.М. Оценка влияния спиртовых присадок на процессы термохимических превращений топлив в энергоустановках.	259
Мухамедов Н.Е., Батырбеков Э. Г., Скаков М.К., Вурим А.Д., Дерявко И.И., Кукушкин И.М. Теплофизические свойства и фазовый состав натурного кориума быстрого энергетического реактора.	261
Нестеренков П.А., Нестеренкова Л.А., Абдуллаев К.А. Когенерационные установки с концентрацией излучения – новый тип оборудования для солнечной энергетики.	266
Новиков И.Ю. Венчурные инвестиции в инфраструктурные проекты.	273
Обозов А.Дж., Акпаралиев Р.А., Исаев Р.Э., Возможности применения технологий возобновляемых источников энергии для повышения энергоэффективности в строительном секторе Кыргызской Республики.	276
Сарапулов С.Ф., Силин В. Е. Уральский энергетический институт: активности в сфере «зеленых технологий»	284
Сармурзина Р.Г., Карабалин У.С., Бойко Г.И., Акчулаков Б.У. Энергоаккумулирующие вещества – как источник получения водорода из воды и катализаторов на их основе.	289
Субботин С.А., Алексеев П.Н., Гагаринский А. Ю., Семченков Ю. М. Стратегия развития двухкомпонентной ядерной энергетики.	295
Тажиббаева И.Л., Батырбеков Э.Г., Школьник В. С., Велихов Е.П., Азизов Э. А. Казахстанский материаловедческий ТОКАМАК и его роль в международных исследованиях в поддержку создания термоядерного реактора.	301
Таскинбаев К.М. Высоковязкие нефти, природные битумы и горючие сланцы в Республике Казахстан. перспективы развития нетрадиционных источников углеводородов.	308

КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ - НОВЫЙ ТИП ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

П. А. Нестеренков¹, Л.А. Нестеренкова¹, К. А. Абдуллаев²

¹КазНУ им. аль-Фараби, Казахстан,
stolkner@mail.ru;

²АО «КазНИИ Энергетики имени академика Ш.Ч.Чокина», Казахстан,
kazniiennerg@mail.ru

Аннотация Представлены результаты исследований когенерационных установок с оптимальным сочетанием концентрации солнечного излучения и интенсивности охлаждения фотоэлементов. Обоснованы принципы проектирования коммерческих установок, включая модульные концентраторы с плоскими зеркалами, линейные фотомодули, коллекторы, и концепция двухстадийного нагрева теплоносителей в теплообменнике в режиме противотока. Принципы и метод расчета годового производства электрической и тепловой энергии с применением оригинальной методики определения пиковой мощности фотоэлементов позволил провести сравнительный анализ солнечных установок разного типа.

Ключевые слова: фотоэлементы, концентратор, двусторонний коллектор, циркуляционный контур, теплообменник, когенерация, оптическая эффективность.

Abstract The results of investigations of cogeneration plants with an optimum combination of concentration of solar radiation and the intensity of cooling of photocells are presented. The principles of design of commercial units, including modular concentrators with flat mirrors, linear photomodules, collectors, and the concept of two-stage heating of heat carriers in the heat exchanger in the counterflow mode are grounded. The engineering method for calculating the annual production of electrical and thermal energy using the original technique for determining the peak power of photocells allowed to maintain comparative analysis of solar installations of different types.

Keywords: photocells, concentrator, bilateral collector, circulation circuit, heat exchanger, cogeneration, optical efficiency.

Введение. Третье поколение солнечного оборудования - когенерационные установки возникло с появлением зеркал концентраторов. Наиболее удачной разработкой среди них является установка Matarenki Light 5.3 шведской фирмы Engineering с шестикратной оптической концентрацией солнечного излучения в арсенид-галлиевых фотоэлементах [1]. Компания IBM разрабатывает установку Dsolar Sunflower с параболическим концентратором из 36 отражателей эллиптической формы, фокусирующих излучение на охлаждаемых чипах, предназначенных для получения 12 кВт электрической и 20 кВт тепловой мощности [2]. Среди установок с малой концентрацией излучения и одно-координатной системой слежения следует отметить C7 Tracker фирмы SunPower Corporation (США), вырабатывающую пиковую электрическую мощность 12,4 кВт при занимаемой площади 120 м². Удельная электрическая мощность, снимаемая с одного квадратного метра, составляет 103,3 Вт/м².

Обзор доведенных до промышленного производства когенерационных установок показывает, что они используют сложную систему слежения и охлаждения, не могут работать в условиях снежных осадков, неудобны для транспортировки на большие расстояния и имеют слишком дорогую технологию изготовления.

Целью данной работы является разработка нового типа оборудования - компактных когенерационных установок, свободных от перечисленных недостатков.

Результаты и дискуссии

Темпы развития когенерационных установок прямо пропорциональны пониманию эффекта **оптимального сочетания охлаждения и концентрации излучения** на поверхности однопереходных кремниевых фотоэлементов. Во всех типоразмерах когенерационные установки, имеющие аббревиатуру PVTSC – фотовольтаик термальные малой концентрации, включают опорную фермовую конструкцию, подвижную несущую платформу из металлического профиля, оптические концентраторы из плоских зеркал, линейные охлаждаемые фотомодули, теплообменники, систему слежения за солнцем и систему хранения электрической и тепловой энергии.

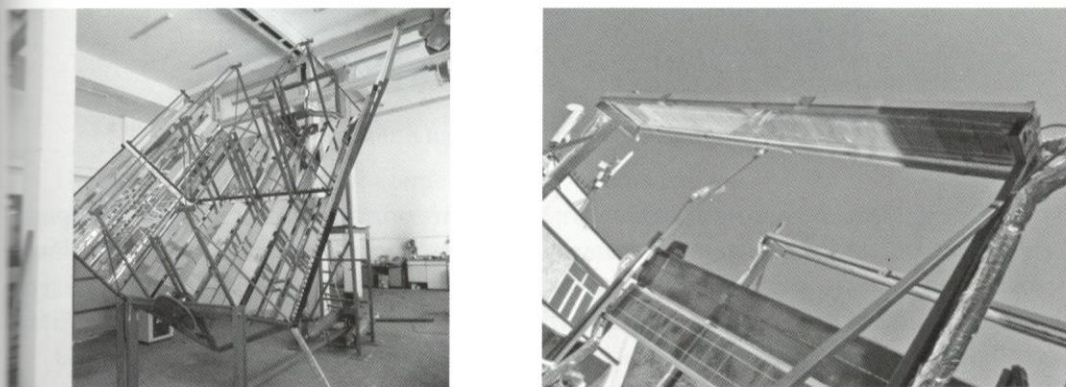


Рисунок 1 – Монтаж концентраторов в лаборатории и изображение фотомодуля со смещением отраженного пятна в утренние и вечерние часы

Несущая платформа и концентраторы состоят из двух секций, как это видно на рисунке 1 слева, что обеспечивает удобство доставки к месту инсталляции и скорость монтажа. Процесс слежения концентраторов за солнцем осуществляется путем вращения вдоль оси, направленной с юга на север, и периодической корректировке по высоте солнца с помощью трекеров. На *рисунке 1* справа показан пример смещения фокальной освещенной линии у нижнего торца фотомодулей, возникающего в утренние и вечерние часы. Эти концевые косинусные потери солнечной энергии исключаются путем удлинения зеркал за пределы фотомодулей. Надежность работы в условиях турбулентных ветровых потоков обеспечивается применением двух опорных подшипников. Ориентация фотомодулей под углом к горизонту позволяет реализовать естественное движение теплоносителей в каналах фотомодулей под действием градиента температуры. Тепловое излучение с поверхности фотомодулей, коллектора и теплообменника способствует очистке зеркал от свежеснежавшего снега, как это показано на *рисунке 2*. Процессы естественной очистки зеркал от загрязнений и снега значительно снижают стоимость сервисного обслуживания PVTSC установок.



Рисунок 2 – Тестирование установки в зимний период

Благодаря разделению низкотемпературных фотомодулей и высокотемпературных коллекторов по теплоносителю, осуществляются процессы теплообмена в теплообменнике в режиме противотока, обеспечивая одновременно высокую интенсивность охлаждения фотоэлементов и высокую температуру теплоносителя на выходе установки.

Особенность полностью смачиваемых теплоносителем каналов фотомодулей устраняет необходимость ведения неизвестной величины F , характеризующей перетоки тепла вдоль поверхности приемников излучения [4]. Аналитическая модель на основе дифференциальных уравнений сохранения энергии позволяет создать инженерный метод расчета фотомодулей и определять стандартную теплоносителем тепловую энергию [5]:

$$Q_{max} = G \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) = b \cdot L \cdot C_{op} \cdot k \cdot E \cdot \frac{(1-\eta)}{1,3},$$

где G и C_p – расход и теплоемкость теплоносителя; C_{op} – оптическая эффективность; b и L – ширина и длина канала; k – коэффициент концентрации; E – интенсивность солнечного излучения; η – КПД фотоэлемента; T_1, T_2 – температура пластин фотоэлемента, теплоносителя и окружающей среды.

Величина максимальной электрической энергии, вырабатываемой фотомодулями равна: $P_{max} = b \cdot L \cdot C_{op} \cdot k \cdot E \cdot \eta$, а отношение величин максимальной тепловой и электрической энергий при $\eta \approx 0,2$ равно $\approx 2,96$.

Параллельно с инженерным методом расчета разрабатывается методика определения пиковой мощности фотоэлементов, работающих в условиях малой концентрации излучения и повышенных температур [6]. На рисунке 3 представлены графики пиковой мощности фотоэлементов Махсон при фиксированной температуре (верхний) и температуре, реально установленной для данного расхода теплоносителя и концентрации излучения (нижний).

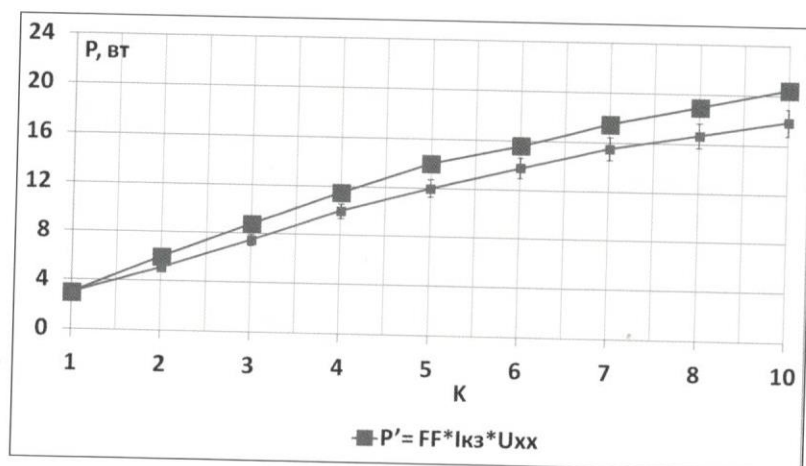


Рисунок 3 – График определения пиковой мощности фотоэлементов Махеоп

По величине оптической концентрации, например, $k_{op} = C_{op} \cdot k \approx 7,5$, по нижнему графику находится пиковая мощность фотоэлементов, составляющая величину $P_i \approx 16 \text{ Вт}$. После чего определяется суммарная электрическая мощность PVTSC установки, имеющей N фотомодулей: $\sum P \approx 18 \cdot N \cdot P_i \approx 288 \cdot N$, и суммарная тепловая мощность по выражению (2): $\sum Q \approx 2,96 \cdot \sum P = 852,5 \cdot N$.

Сравним производительность традиционных неподвижных фотопанелей и PVTSC установок. Фотопанели принимают суммарное солнечное излучение, а когенерационные установки в основном прямое солнечное излучение, поскольку отраженная от зеркал диффузная составляющая имеет малую величину. Оптическая эффективность установок соответственно равна:

$$C_{01} = K_r \cdot D \quad C_{02} = g \cdot K_{ref} \cdot D \cdot (1 - K_{dif}), \quad (2)$$

где K_r – коэффициент отражения солнечных лучей от поверхности фотопанелей; D – коэффициент пропускания, учитывающий поглощение и отражение солнечного излучения в защитном стекле; g – коэффициент, учитывающий косинусные геометрические потери из-за ориентации плоскостей зеркал; K_{ref} – коэффициент отражения зеркал; K_{dif} – составляющая диффузного излучения в общем излучении.

Из выражения (2) видно, что оптическая эффективность зависит от произведения трех технологических факторов и одного климатического, зависящего от места инсталляции установок. Если хоть один из них имеет малую величину, то и общая оптическая эффективность остается низкой. Из этого следует вывод: следует использовать высококачественные материалы с пороговым уровнем оптических свойств $\geq 0,93$. В обширном обзоре [7] представлены современные технологии производства параболических концентраторов и материалов для них, позволяющих получать $K_{ref} > 0,93$ и $D = 0,95$ с относительно низкой себестоимостью $\approx 20 \text{ \$}/\text{м}^2$. При движении солнца средний за день коэффициент пропускания принимает значение $D_{cp} \leq 0,92$, а оптическая эффективность фотопанелей: $C_{01} = K_r \cdot D_{cp} = 0,95 \cdot 0,92 \leq 0,87$. За счет концентрации солнца в десятки раз уменьшаются размеры фотопанелей, что дает возможность снижать толщину защитных термических стекол до 2 мм без потери механической прочности и получать величину $D \geq 0,96$. Геометрический коэффициент имеет вели-

чину $g = \sum \cos \varphi_i \geq 0,94$. В этом случае произведение трех оптических коэффициентов равно: $C_{o2} = g \cdot K_{ref} \cdot D \geq 0,83$.

Интенсивность солнечного излучения, поступающая через атмосферу на поверхность Земли равна $I = 1100 \text{ Вт/м}^2$ [8]. Угол падения лучей на поверхность фотоприемника от времени восхода t_6 до времени захода t_3 меняется в интервале $(-\pi/2; +\pi/2)$. Вследствие суточного движения солнца по небосклону со скоростью $\omega = 2\pi/24 = 0,262$ радиан/час дневная величина солнечного излучения, поступающего на неподвижную приемную поверхность площадью $S_0 = 1 \text{ м}^2$, определяется с помощью интеграла с пределами интегрирования от восхода до захода солнца:

$$W_1 = K_r \cdot D_{cp} \cdot \int I \cdot S_0 \cdot \cos(\omega t) dt = K_r \cdot D_{cp} \cdot I \cdot S_0 \cdot \frac{\sin \omega t_B - \sin \omega t_3}{\omega}.$$

Подвижные фотомодули апертурой $A = g \cdot S_0$ за это же время Δt получают количество излучения:

$$W_2 = g \cdot K_{ref} \cdot D \cdot I \cdot S_0 \cdot (1 - K_{dif}) \cdot \Delta t.$$

Найдем величину отношения поступающего солнечного излучения на подвижные и неподвижные приемники:

$$\frac{W_2}{W_1} \approx 0,93 \cdot (1 - K_{dif}) \cdot \Delta t \cdot \frac{\omega}{\sin \omega t_B - \sin \omega t_3}.$$

Для интервала времени $\Delta t = 12$ часов (от -6 до +6) имеем $W_1 = 0,87 \cdot 1100 \cdot 1 \cdot (0,262 \cdot 6 - \sin(0,262 \cdot (-6)))/0,262 = 7,31 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, а $W_2 = 0,83 \cdot 1100 \cdot 1 \cdot (1 - 0,2) \cdot 12 = 6,74 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

Мы получили **первый вывод** сравнительного анализа: в высоких широтах с большой величиной рассеянного солнечного излучения (более 35 % от суммарных) солнечные ресурсы неподвижных фотомодулей выше, а в южных широтах выше солнечные ресурсы когенерационных установок.

Сопоставим теперь производительность PVTSC установок и установок с высокой концентрацией и фотоэлементами из *GaAs*, имеющими коэффициент полезного действия $\eta_2 \approx 0,30$. Геометрическая концентрация установок одинаковой апертуры с учетом косинусных потерь соответственно равна: $k_1 \approx 0,9 \cdot S_a/S_1$ и $k_2 \approx 0,9 \cdot S_a/S_2$. Величина оптической эффективности плоских зеркал и линз Френеля примерно одинакова ($K_{ref} \cdot D \approx 0,85$). Величина отношения электрической энергии U_1 и U_2 , вырабатываемой установками за промежуток времени τ равна:

$$\frac{U_1}{U_2} = \eta_1 \cdot S_1 \cdot E_0 \cdot \tau \cdot \left(0,9 \cdot \frac{S_a}{S_1}\right) \cdot R_1 \cdot D_1 \cdot S_2 \cdot E_0 \cdot \tau \cdot \left(0,9 \cdot \frac{S_a}{S_2}\right) \cdot \frac{R_2 \cdot D_2}{\eta_2} \approx \frac{\eta_1}{\eta_2} \approx 1,5.$$

С учетом уравнения (1) теплоносителю передается тепловая энергия $Q_1 = S_1 \cdot E_0 \cdot \tau \cdot (0,9 \cdot S_a/S_1) \cdot R_1 \cdot D_1 \cdot (1 - \eta_1)/1,3$. Электрическая и тепловая энергия в сумме составляют: $(U_1 + Q_1) \approx 3,97 \cdot U_1$. Величина соотношения между производительностью сравниваемых установок равна:

$$\frac{U_1 + Q_1}{U_2} \approx 3,97 \cdot \frac{\eta_1}{\eta_2} \approx 2,3.$$

Отсюда получаем **второй вывод** - когенерационные установки при сопоставимых внешних условиях эксплуатации производят в 2,3 раза больше суммарной энергии в виде электричества и тепла, чем установки с высокой концентрацией излучения и генерацией только электричества.

На *рисунке 4* представлены результаты расчетов удельной годовой производительности PVTSC установок по электричеству (синие прямоугольники) и теплу для разных географических широт.

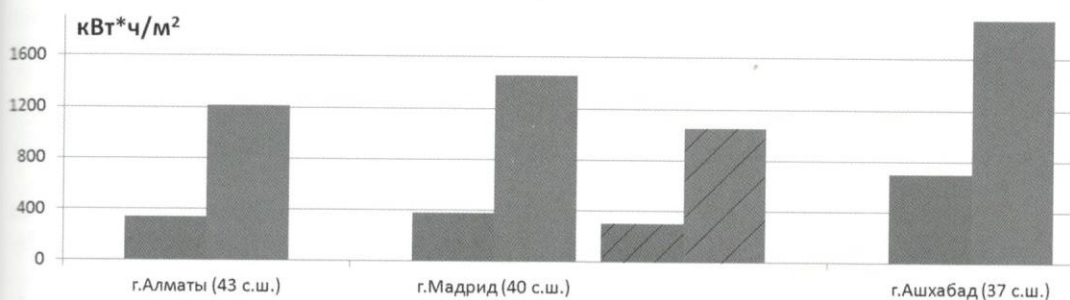


Рисунок 4 – Удельная годовая производительность PVTSC установок

Для сравнения там же представлены данные работы [9] на широте Мадрида (заштрихованные прямоугольники). Удельная производительность PVTSC установок значительно выше, что является следствием используемых технических решений в производстве PVTSC установок.

Выводы

1. Фотоэлементы с малой концентрацией успевают эффективно охлаждаться за счет теплообмена с жидким теплоносителем, а полученное тепло передается в теплообменнике в режиме противотока теплоносителю коллектора, повышая температуру последнего до 70 °C.

2. Относительно большая площадь фотоэлементов исключает необходимость в прецизионном слежении за солнцем, что снижает себестоимость системы слежения.

3. Себестоимость PVTSC установок и сервисного обслуживания снижается за счет изготовления модульных концентраторов с простой формой зеркал и размещения их под углом к горизонту для естественной очистки дождями и схода снега.

4. Возможность получения высокой температуры теплоносителей на выходе PVTSC установок при каскадной работе последовательно соединенных фотомодулей и коллекторов является основанием для проведения исследований в сфере технологий опреснения воды.

5. Сравнительный анализ производительности существующих типов солнечных установок показывает убедительное превосходство PVTSC установок по основным экономическим показателям – суммарной выработке энергии, стоимости установленной мощности, себестоимости электрической и тепловой энергии.

Литература

1. L. C. Chea, H. Håkansson, B. Karlsson. Performance evaluation of new two axes tracking pv-thermal concentrator. Journal of Civil Engineering and Architecture, ISSN 1934-7359, 2013, Volume 7, No. 12 (Serial No. 73), pp. 1485-1493
2. www.ibm.com
3. www.sunpower.com. Maxeon solar cells technology improvement.
4. Florschuetz L. W. Extension of the Hottel-Whiller model to the analysis of concentrating photovoltaic/thermal flat plate collectors. Sol Energy 1979; 22: p.361-6.
5. Nesterenkov P. A., Nesterenkov A. G. Hybrid Solar Collector.// Proceedings of the 24th International conference on energy materials, solar cells and solar energy applications 22-24 August 2013 University of MALAYA Kuala Lumpur, Malaysia p.283 -286 / ISBN 978-967-120670-6
6. Nesterenkov P.A., Nesterenkov A.G., Nesterenkova L. A. Fundamentals Of Designing Hybrid Concentrator Solar Systems. Proceeding of The 12th International Conference on Concentrating Photovoltaics (CPV-12), April 25-27, 2016, Freiburg, Germany.
7. Price H., Liipfert E., Kearney D., Zarza E., Gee Randy Cohen G., Mahoney R. Advanced Parabolic Trough Solar Power Technology/Journal of Solar Energy Engineering copying 2007 ASME, vol.124, May, p.163-174
8. V. Poulek, M.Libra. New solar tracker //Solar Energy Materials and Solar Cells. 55, 2 (1998), 113-120
9. L. R. Bernardo, B. Perers, H. Håkansson, B. Karlsson. Performance evaluation of new concentrating photovoltaic/thermal systems: A case study from Sweden. Solar Energy 85 (2011) 1499-1510