

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. Әбікаев 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

<i>Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Ляхова О.Н., Айдарханова А.К.</i> Разработка методологии создания биологических площадок мониторинга экосистем зоны влияния АЭС.	250
<i>Мун Г.А., Сулейменов И.Э., Изликов И.В., Габриелян О.А., Шалтыкова Д.Б., Ирмухаметова Г.С., Абдыкалыкова Р.А., Нурпеисова Ж., Панченко С.В., Нуртазин А.</i> Системы энергосбережения на основе стимул-чувствительных полимеров и проблемы становления энергоэффективного общества.	252
<i>Мусабеков М.О., Мусабекова А.М.</i> Оценка влияния спиртовых присадок на процессы термохимических превращений топлив в энергоустановках.	259
<i>Мухамедов Н.Е., Батырбеков Э. Г., Скаков М.К., Вурим А.Д., Дерявко И.И., Кукушкин И.М.</i> Теплофизические свойства и фазовый состав натурного кориума быстрого энергетического реактора.	261
<i>Нестеренков П.А., Нестеренкова Л.А., Абдуллаев К.А.</i> Когенерационные установки с концентрацией излучения – новый тип оборудования для солнечной энергетики.	266
<i>Новиков И.Ю.</i> Венчурные инвестиции в инфраструктурные проекты.	273
<i>Обозов А.Дж., Акпаралиев Р.А., Исаев Р.Э.,</i> Возможности применения технологий возобновляемых источников энергии для повышения энергоэффективности в строительном секторе Кыргызской Республики.	276
<i>Сарапулов С.Ф., Силин В. Е.</i> Уральский энергетический институт: активности в сфере «зеленых технологий».	284
<i>Сармурзина Р.Г., Карабалин У.С., Бойко Г.И., Акчулаков Б.У.</i> Энергоаккумулирующие вещества – как источник получения водорода из воды и катализаторов на их основе.	289
<i>Субботин С.А., Алексеев П. Н., Гагаринский А. Ю., Семченков Ю. М</i> Стратегия развития двухкомпонентной ядерной энергетики.	295
<i>Тажигаева И.Л., Батырбеков Э.Г., Школьник В. С., Велихов Е.П., Азизов Э. А.</i> Казахстанский материаловедческий ТОКАМАК и его роль в международных исследованиях в поддержку создания термоядерного реактора.	300
<i>Таскинбаев К.М.</i> 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. Абдуллин²

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

²АО «КазНИИ Энергетики имени академика Ш.Ч.Чокина», Казахстан,
kazniienerg@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 проточного течения. Инженерный 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, циркуляционная схема, 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 photomodule collectors, and the concept of two-stage heating of heat carriers in the heat exchanger in the mode of flow circulation are grounded. The engineering method for calculating the annual production of electric 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 удачным примером такой среди них является установка Mataranki 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 отражательных элементов в форме, 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 за солнцем следует отметить C7 Tracker фирмы SunPower Corporation (США), вырабатывающую пиковую электрическую мощность 12,4 кВт при занимаемой площади 10,3 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 - когенерационных установок, свободных от перечисленных недостатков.

Результаты и дискус-
сия развития ко-
генерационных установок опти-
ческого эффекта опти-
ческого излучения на поверхность
когенерационных установок
термальных, подвижных
концентраторов, систем
энергии.



Рисунок 1 - Монтаж
со смещением

платформа и
слева, что обеспе-
чивает. Процесс слеже-
ния вдоль оси, напр-
вления солнца с помо-
щью освещенной л-
чине и вечерние час-
путем удлине-
турбулентных
теплообменни-
естественное
градиента темпе-
теплообменни-
на рисун-
значитель-

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.

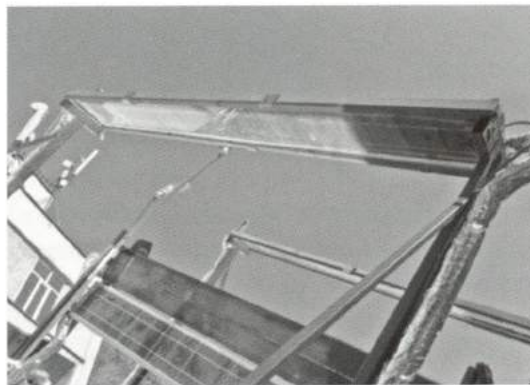


Рисунок 1 – Монтаж концентраторов в лаборатории и изображение фотомодуля со смещением отраженного пятна в утренние и вечерние часы

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 свежеснегавшего 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 линейном теплообменнике в режиме противотока, обеспечивая одновременно хорошую интенсивность охлаждения фотоэлементов и высокую температуру (более 70°C) теплоносителя на выходе установки.

Особенность полностью смачиваемых теплоносителем каналов фотомодулей устраняет необходимость ведения неизвестной величины F , характеризующей перетоки тепла вдоль поверхности приемников излучения [4], поэтому математическая модель на основе дифференциальных уравнений сохранения энергии позволяет создать инженерный метод расчета фотомодулей и определять отводимую 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_f , T_n – 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 Maxeon при фиксированной температуре 25°C (верхний) и температуре, реально установленной для данного расхода теплоносителя и концентрации излучения (нижний).

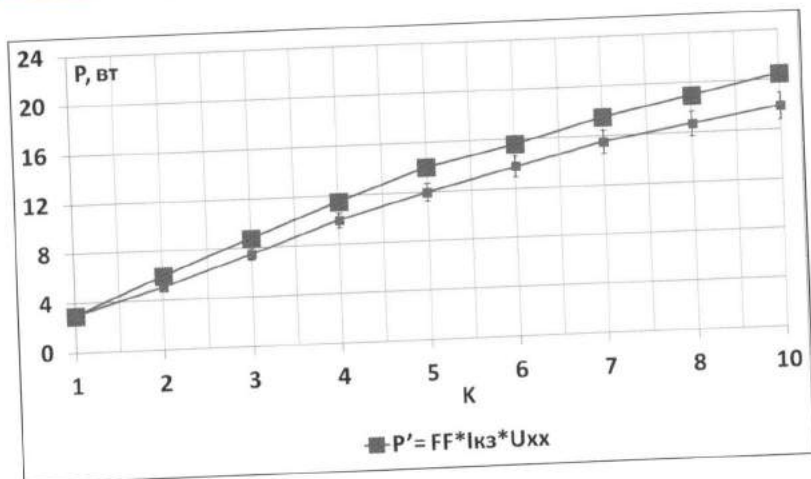


Рисунок 3 – График определения пиковой мощности фотоэлементов Махсон

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-

Н

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 фотопанелей 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:

$$W_1 = K_r \cdot D_{cp} \cdot \int I \cdot S_0 \cdot \cos(\omega t) dt = K_r \cdot D_{cp} \cdot I \cdot S_0 \cdot \frac{\sin \omega t_B - \sin \omega t_3}{\omega}. \quad (3)$$

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

$$W_2 = g \cdot K_{ref} \cdot D \cdot I \cdot S_0 \cdot (1 - K_{dif}) \cdot \Delta t. \quad (4)$$

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

$$\frac{W_2}{W_1} \approx 0,93 \cdot (1 - K_{dif}) \cdot \Delta t \cdot \frac{\omega}{\sin \omega t_B - \sin \omega t_3}. \quad (5)$$

Для интервала времени $\Delta t = 12$ часов (от -6 до +6) имеем $W_1 = 0,87 \cdot 1100 \cdot I \cdot S_0 \cdot (0,262 \cdot 6 - \sin(0,262 \cdot (-6)))/0,262 = 7,31 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, а $W_2 = 0,83 \cdot 1100 \cdot I \cdot (1 - 0,2) \cdot 12 = 8,76 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

Мы получили **первый вывод** сравнительного анализа: в высоких широтах с большой величиной рассеянного солнечного излучения (более 35 % от суммарной) 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 апертюры, 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:

$$\frac{U_1}{U_2} = \eta_1 \cdot S_1 \cdot E_0 \cdot \tau \cdot \left(0,9 \cdot \frac{S_a}{S_1}\right) \cdot R_1 \cdot D_1 \cdot S_2 \cdot E_0 \cdot \tau \cdot \left(0,9 \cdot \frac{S_a}{S_2}\right) \cdot \frac{R_2 \cdot D_2}{\eta_2} \approx \frac{\eta_1}{\eta_2} \approx 0,6. \quad (6)$$

С учетом уравнения (1) теплоносителю передается тепловая энергия $Q = S_1 \cdot E_0 \cdot \tau \cdot (0,9 \cdot S_a/S_1) \cdot R_1 \cdot D_1 \cdot (1 - \eta_1)/1,3$. 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 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.

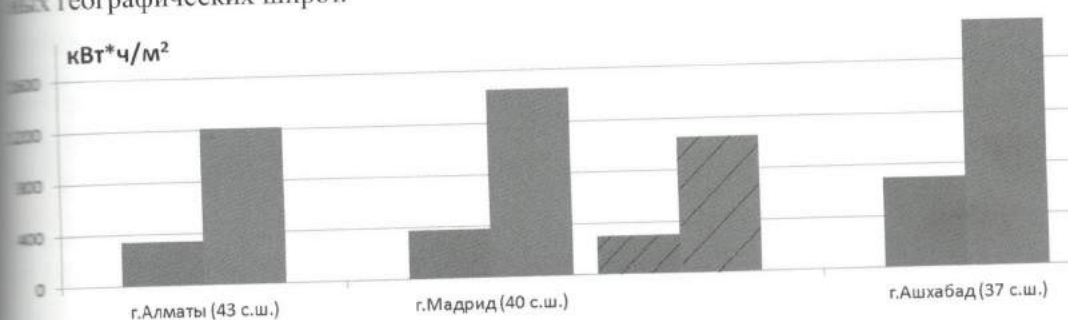


Рисунок 4 – Удельная годовая производительность PVTSC установок

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 °С.
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, USA. 2013, Volume 7, №о. 12 (Serial №. 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 combined 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 2nd 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 978-967-1206706
6. Nesterenkov P.A., Nesterenkov A.G., Nesterenkova L. A. Fundamentals Of Designing Hybrid Concentrator Solar Systems. Proceeding of The 12th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-12), April 25-27, 2016, Freiburg, Germany.
7. Price H., Liipfert E., Kearney D., Zarza E., Gee Randy Cohen G., Mahoney R. Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology/Journal of Solar Energy Engineering copyring 2002 by ASME, vol.124, May, p.163-174
8. V. Poulek, M.Libra. New solar tracker //Solar Energy Materials and Solar Cells, 51, 2 (1998), 113-120
9. L. R. Bernardo, B. Perers, H. Håkansson, B. Karlsson. Performance evaluation of low concentrating photovoltaic/thermal systems: A case study from Sweden. Solar Energy 85 (2011) 1499-1510

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