В рассмотренной модели температура фотоэлектрических преобразователей варьируется от 31 °С до 44 °С, что говорит о более эффективном охлаждении фотоэлектрических преобразователей без значительных перепадов температур, когда поток теплоносителя становится ещё более турбулизированным.

Благодаря представленному моделированию в системе конечно-элементного анализа проектировщик может детально задать режим номинальной работы модуля и подобрать оптимальные конструктивные параметры модуля.

Солнечные концентраторные теплофотоэлектрические модуля позволяют экономить фотоэлектрические преобразователи и получать на выходе модуля наряду с электроэнергией и тепловую энергию, что значительно увеличивает общую эффективность солнечного модуля.

1. Панченко В.А. Обзор и применение солнечных модулей, разрабатываемых и выпускаемых ГНУ ВИЭСХ // Вестник ВИЭСХ, 2014, № 4 (17), с. 20 – 29
2. Панченко В.А. Солнечные модули различной конструкции агроинженерного центра ВИМ // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики, 2017, с. 116 – 121.
3. Стребков Д.С., Панченко В.А., Филиппченкова Н.С. Обзор различных конструкций солнечных теплофотоэлектрических модулей (гибридных коллекторов) // Инновации в сельском хозяйстве, № 3 (13), 2015, с. 199 – 203.
4. Панченко В.А., Филиппченкова Н.С.. Теплофотоэлектрические бесконцентраторные солнечные модули (гибридные солнечные коллекторы) // Инновации в сельском хозяйстве, № 5 (15), 2015, с. 128 – 133.
5. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А. Исследование концентраторной установки с матричными солнечными элементами // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2012, № 2, с. 14-16.
6. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А. Солнечный тепло-фотоэлектрический модуль с параболоторическим концентратором // Альтернативная энергетика и экология, 2013, № 1-2 (118), с. 35-39.
7. Сеницын С.А., Стребков Д.С., Панченко В.А. Паркетирование поверхности параболического концентратора солнечного теплофотоэлектрического модуля по заданным дифференциально-геометрическим требованиям // Геометрия и графика, 2019, Т. 7, № 3, с. 15-27.
8. Сеницын С.А. Моделирование линейных погрешностей при конструировании поверхности концентратора солнечного модуля // Научный электронный журнал Меридиан, 2020, № 4 (38), с. 219-221.
9. Сеницын С.А. Информационная методика управления качеством поверхности солнечного концентратора, заданной дискретным множеством точек // E-Scio, 2020, № 1 (40), с. 421-427.

Панченко В.А.^{1,2}

**Испытания концентраторной солнечной установки с двигателем Стирлинга в
натурных условиях**

¹*Российский университет транспорта МИИТ*

²*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/lj-05-2020-33

idsp: ljjournal-05-2020-33

Аннотация

В статье рассмотрено исследование тепловых режимов работы солнечной концентраторной установки с термодинамическим преобразователем в виде двигателя Стирлинга. Равномерную освещенность в фокальной области горячего цилиндра двигателя обеспечивают два концентратора параболического типа. При подключении электрического генератора потребитель получает не только электроэнергию на выходе из модуля, но и тепловую энергию в виде нагретого теплоносителя.

Ключевые слова: солнечная энергетика, концентратор, двигатель Стирлинга, тепловые режимы, равномерность освещения.

Abstract

The article discusses the study of thermal operating conditions of a solar concentrator installation with a thermodynamic converter in the form of a Stirling engine. The uniform illumination in the focal region of the hot engine cylinder is provided by two paraboloid type concentrators. When connecting an electric generator, the consumer receives not only electricity at the outlet of the module, but also thermal energy in the form of a heated coolant.

Keywords: solar energy, concentrator, Stirling engine, thermal conditions, uniformity of lighting.

Преобразователи солнечной энергии в большинстве своём подразделяются на фотоэлектрические [1, 2] и термодинамические [3]. Планарные фотоэлектрические солнечные модули активно используются в солнечных станциях вот уже несколько десятилетий. Концентраторные и планарные теплофотоэлектрические солнечные установки на основе кремниевых фотопреобразователей также представляют большой интерес в виду высокой общей эффективности модуля, так как кроме электричества на выходе модуля потребитель получает и тепловую энергию [4 – 7]. Однако в условиях засветки концентрированным солнечным излучением способны работать не все кремниевые фотоэлектрические преобразователи, а только специально разработанные для таких целей, стоимость которых больше стандартных фотоэлектрических преобразователей. Также требования к точности проектирования и изготовления концентраторов солнечного излучения для таких установок очень высоки [8 – 10].

Одним из перспективных направлений в области термодинамического преобразования солнечной энергии является двигатель Стирлинга – двигатель с внешним подводом теплоты, тип которой для работы двигателя не важен (газ, солнечная энергия, радиоактивные элементы). Требования к точности изготовления профиля концентраторов солнечного излучения в зависимости от типа двигателя могут изменяться. При использовании двигателей Стирлинга с горячим цилиндром явно выраженной формы равномерность освещённости фокальной области может быть ниже, чем при использовании фотоэлектрических преобразователей. Эффективность двигателей подобного рода выше средней эффективности фотоэлектрических преобразователей (15 – 20 %) и может превышать 30 %.

В качестве реализации солнечного модуля с двигателем Стирлинга предложена конструкция модуля, где концентратор солнечного излучения обеспечивает высокую температуру поверхности горячего цилиндра двигателя Стирлинга с помощью концентратора параболического типа, обеспечивающего относительно равномерную освещённость цилиндра в фокальной области концентратора (рисунок 1). Холодный цилиндр оснащён радиатором водяного охлаждения, с помощью теплоносителя которого снимается тепловая энергия модуля. Модуль оснащён малым концентратором солнечного излучения для освещения боковой поверхности цилиндра и большим концентратором, который обеспечивает засветку торцевой области цилиндра.

Рис. 1 – Горячий цилиндр двигателя с малым концентратором (слева) и распределение солнечного излучения по поверхности цилиндра (справа)

Концентрация солнечного излучения по боковой и торцевой поверхностям горячего цилиндра представлены на рисунке 2. Освещённость поверхности концентрированным солнечным излучением достаточно равномерная.

Рис. 2 – Распределение концентрированного солнечного излучения по боковой (слева) и торцевой (справа) поверхностям горячего цилиндра

Температурные характеристики различных областей двигателя Стирлинга представлены на рисунке 3, где области 1, 2 и 3 относятся к горячему цилиндру, 4 температура радиатора холодного цилиндра, а 5 температура холодного цилиндра.

Рис. 3 – Температуры различных областей двигателя Стирлинга

Температуры не достаточно для постоянной работы двигателя. С целью обеспечения номинальной работы двигателя Стирлинга добавлен больший концентратор солнечного излучения (рисунок 4).

Рис. 4 – Двигатель Стирлинга с двумя концентраторами

На рисунке 5 показано распределение засветки на поверхности горячего цилиндра (рисунок 5). Концентрация составила около 30 крат с достаточно высокой равномерностью, что говорит о равномерном прогреве рабочего тела двигателя Стирлинга.

Рис. 5 – Распределение концентрации по поверхности цилиндра

Зависимости температур представлены на рисунке 6. Расход теплоносителя около 0,3 л/мин. Температура теплоносителя на выходе из двигателя Стирлинга 37 °С. При указанном уровне температуры двигатель Стирлинга работает на номинальном режиме и при подключении электрогенератора вырабатывает электроэнергию.

Рис. 6 – Зависимость температур различных областей двигателя Стирлинга

Оценка температурных состояний областей 4 и 5 показана на рисунке 7.

Рис. 7 – Зависимости температуры радиатора и холодного цилиндра от времени

В таблице 1 представлены параметры солнечной установки с двигателем Стирлинга на основе полученных результатов.

Таблица 1.

Характеристики солнечного модуля с концентраторами параболического типа и двигателем Стирлинга

Наименование	Единица измерения	Значение
Температура номинальной работы	°C	180 – 800
Используемый двигатель	-	Учебный
Максимальные размеры	мм	1050 / 850
Количество концентраторов	шт	2
Площадь миделя концентраторов	м ²	0,78
Масса	кг	5,5
Теплоноситель	-	воздух, вода, масло
Расход теплоносителя (вода)	кг/мин	0 (воздушное охлаждение) – 0,5
Температура теплоносителя (вода) на выходе	°C	35 – 40

Таким образом концентраторная солнечная установка с термодинамическим преобразователем в виде двигателя Стирлинга позволяет потребителю на ряду с электроэнергией получать и тепловую энергию в виде нагретой воды, что увеличивает общую эффективность солнечной установки. Подобные установки могут использоваться при автономном или параллельном с сетью энергоснабжении потребителей.

1. Панченко В.А. Обзор и применение солнечных модулей, разрабатываемых и выпускаемых ГНУ ВИЭСХ // Вестник ВИЭСХ, 2014, № 4 (17), с. 20 – 29
2. Панченко В.А. Солнечные модули Федерального научного агроинженерного центра ВИМ различных типов и конструкций для автономного энергоснабжения // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017, с. 1030 – 1033.
3. Панченко В.А. Термодинамическое преобразование возобновляемой энергии посредством двигателя Стирлинга // Альтернативный киловатт, 2010, № 5, С. 20-30.
4. Стребков Д.С., Панченко В.А., Филиппченкова Н.С. Обзор различных конструкций солнечных теплофотоэлектрических модулей (гибридных коллекторов) // Инновации в сельском хозяйстве, № 3 (13), 2015, с. 199 – 203.
5. Панченко В.А., Филиппченкова Н.С.. Теплофотоэлектрические бесконцентраторные солнечные модули (гибридные солнечные коллекторы) // Инновации в сельском хозяйстве, № 5 (15), 2015, с. 128 – 133.
6. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А. Солнечный тепло-фотоэлектрический модуль с параболическим концентратором // Альтернативная энергетика и экология, 2013, № 1-2 (118), с. 35-39.
7. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А. Исследование концентраторной установки с матричными солнечными элементами // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2012, № 2, с. 14-16.
8. Синицын С.А., Стребков Д.С., Панченко В.А. Паркетирование поверхности параболического концентратора солнечного теплофотоэлектрического модуля по заданным дифференциально-геометрическим требованиям // Геометрия и графика, 2019, Т. 7, № 3, с. 15-27.
9. Синицын С.А. Моделирование линейных погрешностей при конструировании поверхности концентратора солнечного модуля // Научный электронный журнал Меридиан, 2020, № 4 (38), с. 219-221.
10. Синицын С.А. Информационная методика управления качеством поверхности солнечного концентратора, заданной дискретным множеством точек // E-Scio, 2020, № 1 (40), с. 421-427.