

## **Выводы**

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. необходима корректировка нормативного сопротивления теплопередаче ( $R_{\text{норм}}$ ) при проектировании зданий и сооружений с учетом различных расчетных температур наружного воздуха по областям;
2. необходимо проведение дальнейших исследований для определения целесообразного сопротивления теплопередаче с учетом стоимости утеплителя и работ по его монтажу.

## **Список литературы**

1. Изменение №1 ТКП 45-2.04-43-2006(02250). Утверждено и введено в действие приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 29 декабря 2008 г. № 484.
2. СНБ 2.04.01-97 Строительная теплотехника. – Мн.: Минстройархитект. РБ, 1998. – 32 с.
3. ТТК-26. Типовая технологическая карта на многослойную кирпичную кладку наружных стен толщиной 640 мм с утеплением пенополистиролом толщиной 100 мм и воздушной прослойкой 40 мм со стеклопластиковыми связями. – Минск: ПК «Минскстрой», УП «Оргтехстрой», 2001. – 55 с.
4. Черноиван, В.Н. К оценке эксплуатационной эффективности многослойной кирпичной кладки несущих стен с плитным утеплителем/ В.Н. Черноиван, В.Г. Новосельцев, Н.В. Черноиван, Ковенько Ю.Г., Матвиенко Е.В. // Строительная наука и техника. – 2013. – № 2 (43) – С. 27–31.
5. ТКП 45-2.04-43-2006 (02250) Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования. – Мн.: Минстройархитект РБ., 2007. – 32 с.
6. Гагарин В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2010. №3. С. 8-16.
7. Гагарин В.Г. Экономический анализ повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2008. №9. С. 41-47.
8. СНБ 4.02.01-03 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Минск, 2004.

УДК 621.311.25

## **АНАЛИЗ СИСТЕМ СЛЕЖЕНИЯ ДЛЯ ГЕЛИОУСТАНОВОК**

**Янчилин П.Ф.**

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь, vig\_bstu@tut.by

*The article describes the classification of solar power plants. The analysis of various systems of tracking of solar power plants behind the Sun is made, presents the results of a comparison of their performance and cost.*

## **Введение**

Солнечное излучение (СИ) может быть относительно легко преобразовано в тепловую, механическую и электрическую энергию, а также использовано в химических и биологических процессах. Солнечные энергетические установки (СЭУ) работают в системах отопления и охлаждения жилых, общественных и

промышленных зданий, в технологических процессах, протекающих при любых температурах (от очень низких до ультравысоких). Сами технологические процессы преобразования и использования СИ по своей технологической сложности могут быть очень разными. Сами СЭУ могут быть по своим габаритам также различными: от микроминиатюрных источников питания микрокалькуляторов и ручных часов до огромных технических конструкций в башенных СЭС высотой 100 м и весом в сотни тонн [1]. Для повышения эффективности работы СЭУ применяют различные системы автоматического управления, позволяющие отслеживать положение Солнца.

### **Классификация СЭУ**

Наиболее характерные сегодня общие классификационные признаки современных типов и видов СЭУ. В каждом из этих общих признаков, безусловно, существуют и присущие им частные особенности использования СЭУ.

1. По виду преобразования и использования СИ в другие виды энергии: в тепловую, механическую, электрическую – СЭУ используются в химических и биологических процессах.

2. По месту размещения на Земле есть наземные и космические СЭУ.

3. По стационарности – переносные, передвижные и стационарные СЭУ.

4. По виду ориентации на Солнце СЭУ бывают с постоянной (неизменной) ориентацией на поверхности земли и с системой слежения за Солнцем с целью максимизации прихода СИ на ПП.

5. По технической сложности есть СЭУ: простые, или простейшие, и сложные по техническому циклу и исполнению. *К простым СЭУ можно отнести:* нагреватели воды различной конструкции; подогреватели воздуха; сушилки продуктов сельского хозяйства; отопительные системы; опреснители воды; теплицы; солнечные кухонные печи или нагреватели, холодильные и водоподъемные установки и т.д. Конструктивное изготовление подобных простых СЭУ, предназначенных для бытового потребления, весьма несложно даже в домашних условиях и в связи с этим ведет к большому их многообразию. *К сложным СЭУ можно отнести:* башенные СЭС; СЭУ с параболо-цилиндрическими концентраторами; солнечные коллекторы; концентраторы СИ и системы прямого преобразования СИ в электричество.

6. По принципу улавливания солнечной энергии различают *гелиоколлекторы*, представляющие собой лёгкие, компактные конструкции, собираемые по модульному принципу (основой является плёночно-трубчатый адсорбирующий коллектор); *гелиоконцентраторы* – представляют собой установки, фокусирующие параллельные солнечные лучи с помощью линзы в одной точке для выработки электричества или тепла.

Солнечные коллекторы бывают двух основных типов: плоские и концентрирующие. *Плоские гелиоколлекторы* на основе медных пластин с селективными покрытиями, с одной стороны, недороги и производятся массово из-за относительно легкой технологии нанесения покрытий и простоты манипуляций с медью, с другой – из-за высокой теплопроводности меди позволяют передать теплоносителю почти всю собранную энергию. Незначительно уступая в КПД концентрирующим, медные плоские коллекторы принципиально отличаются ценой в лучшую для потребителя сторону по сравнению с вакуумными коллекторами.

*Концентрирующие коллекторы*, как правило, используют вакуумные трубные элементы, на которых концентрируется солнечная энергия. Наибольшая проблема вакуумных коллекторов – потеря вакуума, что требует частой замены недешевых деталей. Кроме того, нагреваемая до большей температуры жидкость быстрее, чем в плоских коллекторах, теряет необходимые свойства, поэтому ее приходится менять, а без специального оборудования это сделать практически невозможно. Попадание в коллектор градин диаметром более 2,5 см может вызвать серьезные проблемы. Также высока вероятность закипания жидкости в трубах, что может привести к выходу из строя системы. В то же время концентрирующие системы обеспечивают съём солнечной энергии со значительной площади и ее концентрацию непосредственно на трубах с теплоносителем, а также меньшую площадь тепловых потерь, которые уходят только с поверхности труб – приемников излучения. Эта особенность обеспечивает более высокую тепловую эффективность концентрирующих коллекторов по сравнению с обычными плоскими.

Для достижения более высоких температур используется фокусировка солнечных лучей. Солнечная энергия отражается большой поверхностью на коллектор с меньшей площадью поверхности, где уже и преобразуется в тепло. Вследствие концентрации энергии на меньшей площади достигается больший ее нагрев и меньшие потери тепла от излучения и конвекции. Большинство таких коллекторов должны ориентироваться на лучи, приходящие непосредственно с диска Солнца, – что называется прямой инсоляцией (слежение за Солнцем в его движении по небу).

### **Системы слежения гелиоустановок**

Система слежения гелиоустановок за Солнцем (ССС), или трекер, является одним из конструктивных элементов СЭУ с концентраторами. Оптический КПД концентратора сильно зависит от точности работы системы слежения, что является следствием непрерывного вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца в течение года влияет на изменение положение Солнца на небе по двум угловым координатам: азимуту и высоте.

Системы слежения можно классифицировать так:

- *по количеству осей слежения*: двухосевые и одноосевые. Двухосевые системы слежения свойственны в первую очередь осесимметричным КСЭ, т.к. их оптический КПД зависит от точности наведения как по азимуту, так и по высоте; Одноосевые реализуют поворот солнечного модуля вокруг единственной центральной оси, что удобно для электростанций большого масштаба;

- *по принципу слежения за Солнцем*: активные и пассивные;

- *по принципу работы*: непрерывного и периодического действия.

Устройства, снабженные системой слежения за Солнцем, также могут различаться по типу и виду используемых датчиков, принципам функционирования системы управления, конструктивным особенностям.

Большинство активных ССС используют оптический датчик, чтобы определить положение Солнца, электронное управление и один или более двигателей для позиционирования. Одноосевые активные ССС устанавливаются

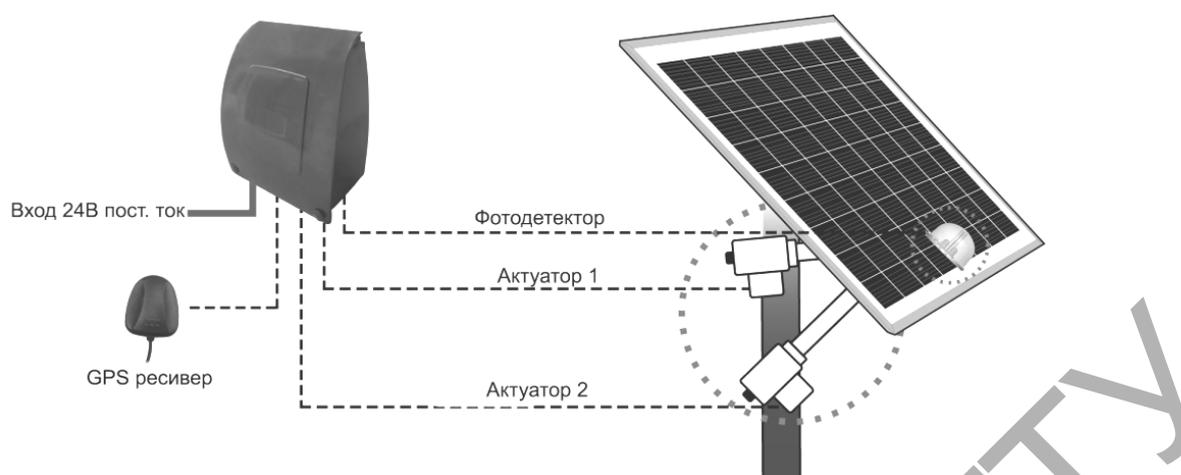
неподвижно под определённым углом наклона, который может быть отрегулирован в зависимости от сезона года, и отслеживают положение Солнца на небе по азимутальному углу. Двухосевые трекеры отслеживают две угловые координаты азимут и высоту Солнца (угол к горизонту) и обеспечивают самое точное слежение, но при этом их стоимость больше. Активные трекеры восприимчивы к близким ударам молнии, которые могут повредить двигатель и систему управления.

Пассивные ССС используют солнечное тепло, чтобы испарить жидкий фреон, содержащийся в специальных ёмкостях, установленных на трекере. Когда газ расширяется, он выдавливает жидкость в ёмкости на другую сторону трекера, и это изменение в весе заставляет его поворачиваться. Пассивные ССС являются одноосевыми и будут следить за Солнцем с востока на запад. Эти трекеры не отслеживают высотный угол, но могут иметь регулировку по этому углу в зависимости от сезона года. Основное преимущество пассивных трекеров – это то, что они могут функционировать независимо от электродвигателей или системы управления. Однако т.к. они управляются теплом и зависят от интенсивности поступающего солнечного излучения, эти системы могут испытывать затруднения в холодном климате и/или в туманных условиях, когда недостаточный прогрев фреона может уменьшить полную выработку энергии [2].

*Горизонтальные одноосевые системы слежения* обычно используются в солнечных электростанциях и широкомасштабных проектах. Сочетание улучшения энергоэффективности, низкой стоимости и простоты монтажа приводит к значительной экономии. Горизонтальные одноосевые устройства слежения также значительно повышают производительность в течение весны и лета, когда Солнце высоко в небе. Жесткость каркаса и простота механизма влекут за собой высокую надежность, что снижает затраты на техническое обслуживание. Так как панели горизонтальны, их можно компактно разместить на трубчатой оси, не опасаясь, что они будут друг друга затенять, а также оставив их легкодоступными для очистки.

*Вертикальные одноосевые системы слежения* вращаются только вокруг вертикальной оси, панели на них закрепляются вертикально под фиксированным, регулируемым или отслеживаемым углом наклона. Такие системы слежения с фиксированным или регулируемым (сезонно) углом наклона подходят для высоких широт, где верхняя точка видимой солнечной траектории находится не очень высоко.

Большое *преимущество активных систем слежения* состоит в том, что они очень точные. Тепловоспринимающая поверхность, установленная на них, всегда перпендикулярна Солнцу (ясная погода, и нет облачности). Кроме того, электрически управляемые трекеры возвращают тепловоспринимающую поверхность гелиоустановки на восток на закате так, чтобы максимально воспринимать солнечную энергию на рассвете. Второе преимущество активных трекеров, которые управляются электродвигателями, состоит в том, что они не зависят от температуры окружающей среды и теплового нагрева. Это обеспечивает большую точность в климате с холодными зимами. Третье потенциальное преимущество – это доставка и сборка. Так как трекер поставляется с завода-изготовителя не в сборе, а по частям, это уменьшает затраты на транспортировку и монтаж в любой местности.



**Рисунок 1** – Схема системы слежения за солнцем 01ARX1

**Таблица 1** - Технические характеристики системы 01ARX1

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Блок управления       |  |
| Максимальная мощность | 4A@24В пост. ток, до 2 актуаторов                        |
| Напряжение питания    | 24В пост. ток  |
| Диапазон азимута      | До 180° или 220° (в зависимости от управляющей системы)) |
| Элевация              | До 90° (в зависимости от управляющей системы)            |
| Защита                | Защита от перегрузки                                     |
| Размеры               | 110 x 220 x 300 мм                                       |
| Фотодетектор          |  |
| Размеры               | 82 x 98 x 50 мм  |
| GPS ресивер           |  |
| Энергопотребление     | 36mA@5В пост. ток  |
| Размеры               | 50 x 60 x 22 мм  |

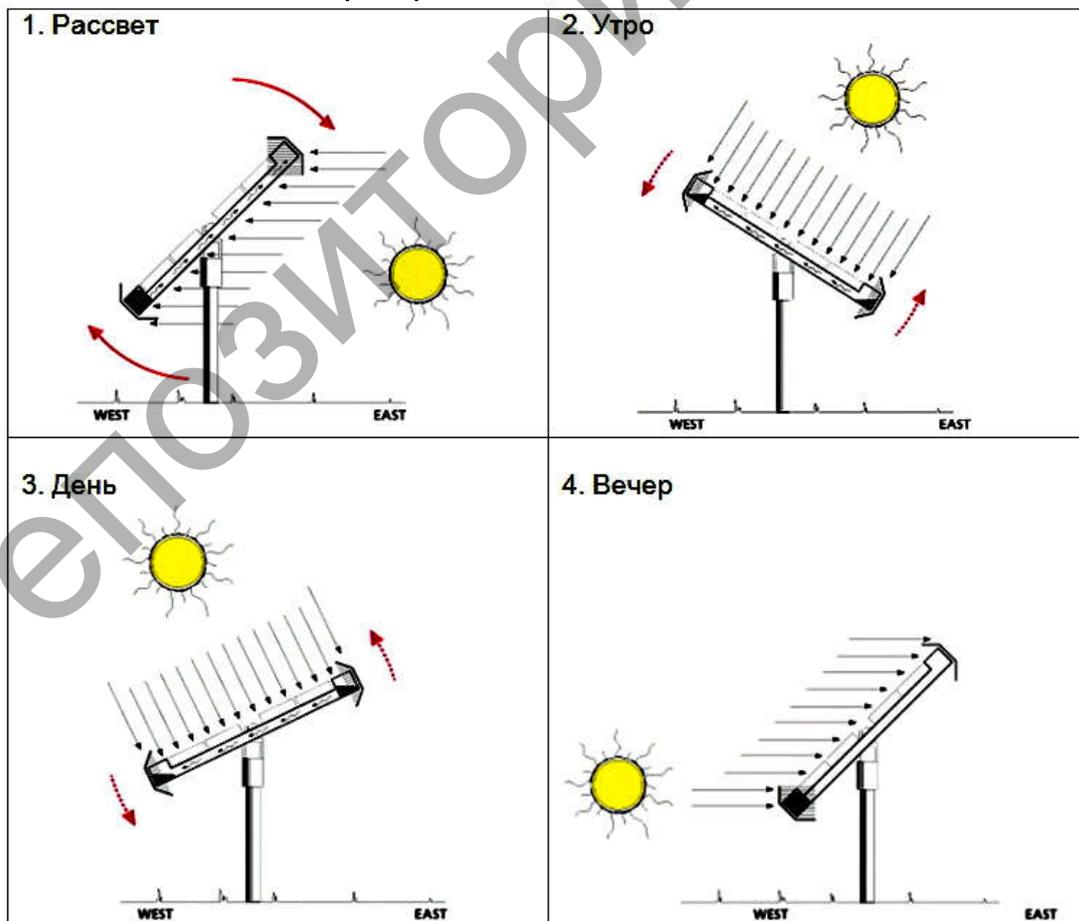
Система слежения за Солнцем для солнечных фотоэлектрических элементов 01ARX1 (рисунок 1) состоит из фотодетектора, блока управления, GPS-приемника [3]. Она может работать с одним актуатором (движение по одной оси) или двумя актуаторами (движение по 2 осям) для поворота панели солнечных элементов вслед за Солнцем. Технические характеристики установки приведены в таблице 1.

Основная проблема активных систем слежения – надежность. Эти трекары являются сложными устройствами и используют электронику и электродвигатели. Их надежность намного ниже, чем надежность пассивных трекаров. Активные трекары восприимчивы к ударам молнии, как вблизи, так и прямых, которые могут повредить электронику. Второй недостаток – это дороговизна. Начальная стоимость несколько больше, чем стоимость пассивных трекаров, ниже и надежность, что, вероятно, приведёт к увеличению затрат на обслуживание. Третий недостаток состоит в том, что эти системы используют некоторое количество электричества для работы. Идея отследить максимальную выработку энергии и для этого использовать электричество, уменьшает саму выработку энергии, однако немного. В среднем активные трекары потребляют около 5 Вт·ч в день. Это незначительная величина [4].



**Рисунок 2 – Установка с пассивной системой слежения**

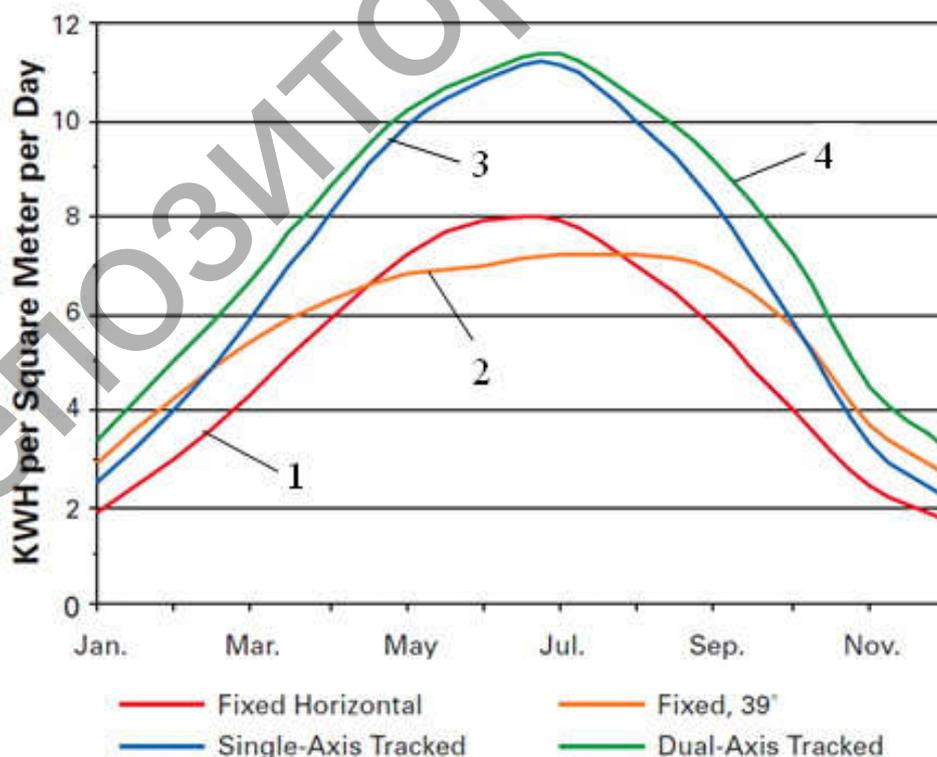
Большое преимущество пассивных систем слежения – это простота и, следовательно, надежность, так как нет никаких электрических частей, которые могли бы сломаться. Фреон находится в запаянных ёмкостях, не требуя ни обслуживания, ни электричества для работы, кроме солнечного тепла. Фреон в ёмкостях с двух сторон способствует трекеру следовать за Солнцем. Вторым достоинством является стоимость: пассивные трекары дешевле, чем активные.



**Рисунок 3 – Положения пассивного трекера в течении дня**

Основная проблема пассивных систем слежения состоит в том, что, будучи приведенными в действие солнечным теплом, они не спешат реагировать на солнечное движение. Ночью они остаются повернутыми на запад, и ранним утром солнечный свет возвращает тепловоспринимающую поверхность гелиоустановки на восток (рисунок 3). Этот процесс может занять час и больше в зависимости от температуры окружающей среды и скорости ветра. В зимний период, пассивные системы немного медленны и неточны в работе, т.к. они зависят от создания высокой температуры для испарения фреона. Вторым недостатком – это отслеживание только дневного движения Солнца с востока на запад: они не учитывают дневное и сезонное изменение высоты Солнца (движение север-юг). Пассивные системы слежения должны вручную настраиваться приблизительно четыре раза в год для компенсации высотного положения Солнца. Третьим потенциальным неудобством пассивных систем слежения является то, что некоторые модели поставляются полностью в сборе. Это делает доставку и монтаж трекера более сложной и дорогой.

В [4] представлены результаты исследований, проводившихся в США в Сакраменто, в штате Калифорния. Определялось количество выработанной электрической энергии при помощи фотоэлектрических элементов с разными системами слежения. Из графика на рисунке 4 видно, что при неподвижной горизонтальной ориентации панели (график 1) вырабатывается наименьшее количество энергии. Примерно столько же производит та же панель при вертикальном наклоне в 39° и неподвижной южной ориентации (график 2). Данная панель на 25-40% производит больше энергии при ориентации панели на Солнце: слежение по одной оси (график 3) и по двум осям (график 4). Видно, что двухосевая система слежения даёт немного лучший результат по сравнению с одноосевой системой.



**Рисунок 4** – Количество выработанной электроэнергии с использованием разных систем слежения

Также представлены результаты сравнения производительности и стоимости фотоэлектрических модулей с различными системами слежения США, Таксон, штат Аризона (таблица 2) [4].

**Таблица 2 - Сравнение стоимости различных систем слежения**

|   | Неподвижная южная ориентация | Пассивная одноосевая ССС | Активная двухосевая ССС |
|---|------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Мощность фотоэлектрических модулей, Вт      | 4,000                        | 3,000                    | 2,850                   |
| Произведённое количество энергии, кВт·ч/год | 6,651                        | 6,624                    | 6,686                   |
| Приблизительная стоимость установки         | \$34,400                     | \$27,390                 | \$28,500                |
| Стоимость кВт·ч произведённой энергии       | \$5,17                       | \$4,13                   | \$4,26                  |

Стоимость гелиоустановки с системами слежения меньше, чем стоимость стационарной установки ввиду использования меньшего количества фотоэлектрических модулей, которые при нормальной ориентации воспринимают столько же солнечного излучения, сколько неподвижные с южной ориентацией. Хотя из таблицы видно, что гелиоустановки с системами слежения получаются дешевле, нужно учесть, что в это сравнение стоимости не включены дополнительные затраты на дальнейшее обслуживание.

Конструктивное исполнение систем слежения может быть разным. Например, поворотный механизм автоматического слежения за солнцем (рисунок 5) представляет собой рамную поворотную конструкцию для модулей солнечных батарей (а) или концентраторов (б), которая динамически ориентируется относительно видимого положения Солнца, сохраняя оптимальное положение тепловоспринимающей поверхности [5].



**Рисунок 5 – Поворотный механизм автоматического слежения за Солнцем TITAN TRACKER**

Достоинства данной системы слежения:

- двухосевое слежение;
- достаточная устойчивость под ветровыми нагрузками: 5 точек крепления выдерживают до 125 км/ч (20 м/с) в любом месте;
- высокая производительность: до 219 м<sup>2</sup> поверхности фотомодулей;
- точность наведения: около 0,01 градуса.

Дизайн трекера основан на 5 несущих опорах: одной фиксированной центральной и четырёх роликовых опор, которые держат две симметричные рамы для тепловоспринимающей поверхности.

Производят также и установки с ручным поворотным механизмом. Обслуживание модуля заключается в удалении пыли и снега с поверхности. При монтаже модуля на мачте легко удалить снег или воду, кратковременно увеличив угол наклона. Большой слой пыли снижает эффективность работы модуля всего на 5-7%, поэтому солнечный модуль не требует постоянного ухода. Для повышения КПД *желательно периодически поворачивать модуль вслед за Солнцем и ориентировать угол его наклона* так, чтобы солнечные лучи падали на поверхность под углом около 90°. Основным недостатком данной солнечной установки заключается в том, что в ней отсутствует какая-либо система автоматического управления [6].

В связи с тем, что концентрирующие коллекторы используют в основном прямую составляющую солнечного излучения, их эффективность, несмотря на меньшие тепловые потери, ниже, чем эффективность плоских. Улучшить показатели можно, применяя системы слежения за Солнцем. В [7] приведена эффективность слежения разного вида систем. Если принять нормальную ориентацию тепловоспринимающей поверхности за единицу, то получим:

- вращение по двум осям (полное) – 1;
- вращение по одной оси;
- полярная ось – 0,94;
- ось север-юг – 0,84;
- ось восток-запад – 0,77;
- корректировка угла наклона – сезонная, 0,67.

Государственным научным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» (ГНУ ВИЭСХ) под руководством Д.С. Стребкова предлагается проект строительства солнечной электростанции мощностью 1 ГВт в пустыне Каракум, в Туркменистане. Представим её основные характеристики: электрическая мощность - 1 ГВт; КПД фотопреобразователей - 20%; годовое производство электроэнергии - 1,3 млрд. кВт·ч; территория - 15 км<sup>2</sup>.

**Таблица 3 - Месячная и годовая производительность СЭС, млн. кВт·ч**

| Ориентация панели                          | I    | II   | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI   | XII  | Год    |
|--|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|
| Стационарные панели, ориентированные на юг |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |        |
| Наклон 30°                                 | 61,8 | 72,0 | 91,6  | 108,7 | 137,1 | 142,1 | 148,6 | 151,2 | 136,0 | 114,8 | 74,0 | 55,7 | 1293,6 |
| Панели со слежением за Солнцем             |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |        |
| Полярная ось                               | 74,8 | 87,2 | 111,2 | 135,3 | 182,4 | 195,5 | 204,0 | 209,2 | 182,1 | 149,3 | 91,7 | 67,2 | 1689,9 |
| Две оси                                    | 77,3 | 87,9 | 111,5 | 137,5 | 191,4 | 209,4 | 215,3 | 213,1 | 182,2 | 151,1 | 94,8 | 70,2 | 1741,7 |

Месячная и годовая производительность фотоэлектрической СЭС представлена в таблице 3 и соответствует приведённой выше эффективности различных систем слежения. В таблице 4 дана сравнительная характеристика основных типов солнечных установок [8].

**Таблица 4 - Характеристика основных типов солнечных коллекторов**

| Тип солнечного коллектора                      | Рабочая температура, °С | КПД коллектора, % | Относительная требуемая площадь, % | Слежение за Солнцем       |
|--|-------------------------|-------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Плоский КСЭ                                    | 30-100                  | 30-50             | 100                                | Не требуется              |
| Солнечный пруд                                 | 40-100                  | 15-25             | 130                                | Не требуется              |
| Центральный приемник с полем гелиостатов       | до 1000                 | 60-75             | 20-40                              | Вращение вокруг двух осей |
| Параболоцилиндрический концентратор            | до 500                  | 50-70             | 30-50                              | Вращение вокруг одной оси |
| Вакуумированный стеклянный трубчатый коллектор | 90-300                  | 40-60             | 50-75                              | Не требуется              |

### **Вывод**

Для повышения эффективности работы на гелиоустановках применяют различные системы автоматического управления, позволяющие отслеживать положение Солнца и тем самым повышать КПД работы подобных установок. Система слежения за Солнцем – это устройство для ориентирования панели солнечных батарей или для удержания солнечного отражателя или линзы повернутыми к Солнцу, подобно гелиостату. От устройств, снабженных такой системой, требуется высокая точность, чтобы быть уверенным в том, что собранные солнечные лучи падают прямо на соответствующее приспособление. Приведены достоинства и недостатки активных и пассивных ССС.

При сравнении гелиоустройств с разными системами слежения видно, что при неподвижной горизонтальной ориентации теплоприёмного устройства вырабатывается наименьшее количество энергии, примерно столько же – при вертикальном наклоне в 39° и неподвижной южной ориентации. Данная панель при ориентации теплоприёмника на Солнце – слежение по одной и двум осям – вырабатывает на 25-40% больше энергии. Двухосевая система слежения даёт несколько лучший результат по сравнению с одноосевой системой. Стоимость гелиоустройств с системами слежения ниже стоимости чем без систем за счёт использования меньшего количества теплоприёмных устройств, которые при нормальной ориентации воспринимают столько же солнечного излучения, сколько и неподвижные с южной ориентацией.

### **Список литературы**

1. Фокин, В.М. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. 240 с.
2. Justine Sanchez "TRACKED. PV Array Systems & Performance". HOME POWER 131 / june & july 2009. – p. 50–56.
3. [http://www.aktuator.ru/Solar\\_Actuator/01ARX1.shtml](http://www.aktuator.ru/Solar_Actuator/01ARX1.shtml)
4. Richard Perez "To Track... or Not to Track". HOME POWER 101 / june & july 2004. – p. 60–63.
5. [http://www.titantracker.es/v\\_portal/apartados/apartado.asp?te=684](http://www.titantracker.es/v_portal/apartados/apartado.asp?te=684)
6. <http://www.rusveter.ru>
7. Аvezов, Р.Р. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения. М.:Стройиздат, 1990. – 328 с.
8. Харченко, Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М. Энергоатомиздат, 1991 г. – 208 с.