

ПОРТЫ, ПОРТОВОЕ ХОЗЯЙСТВО И ТРАНСПОРТНАЯ ЛОГИСТИКА

УДК 620.91:621.472

М. Ф. Руденко, А. И. Давыденко

ФОТОКОНЦЕНТРАТОРЫ ДЛЯ МОРСКИХ И БЕРЕГОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Для автономного снабжения электрической энергией объектов различного назначения, значительно удаленных от промышленных энергосетей, перспективным направлением является использование солнечной энергии путем преобразования ее в фотоэлектрических батареях. Цель исследования – повышение эффективности работы фотоэлектрических элементов за счет применения плоских концентраторов, рационального выбора конструкции и расположения адаптирующей и отражающей поверхности при оптимальной площади проникновения солнечных лучей. Предложенные конструктивные решения позволят значительно снизить массогабаритные характеристики солнечных батарей, эксплуатируемых на морских платформах, маяках, судовых и береговых объектах и комплексах, имеющих ограниченные рабочие площади. Поставленная цель достигается решением следующих задач: выбором качественных, недорогих и технологичных в изготовлении фотоэлементов; созданием максимального освещения фотоэлемента солнечной энергией, определяющего максимальный коэффициент концентрации солнечного излучения на адаптирующую поверхность; определением рационального взаиморасположения фотомодулей в плоских зеркалах, а также нахождением оптимальных значений углов раскрытия зеркал. Проведен обзорный анализ существующих в настоящее время способов изготовления и использования фотоэлектрических элементов в солнечных батареях: поликристаллический кремний, монокристаллический кремний, аморфный кремний, фотоэлементы на основе теллурида кадмия. Проанализирована работа фотоэлементов, имеющих адаптирующую поверхность в форме правильного треугольника со стороной a , установленного в центре двух плоских зеркал с углом раскрытия θ . Получены математические выражения и графические зависимости, определяющие эффективность работы концентратора через оптический коэффициент концентрации. Аналитические исследования показывают, что эффективными являются параметры концентраторов при $W = 4a$ (поверхность входа солнечных лучей), $\theta = 45\text{--}50^\circ$, при этом энергетическая эффективность возрастает на 40 %, а номинальная стоимость снижается на 25 %.

Ключевые слова: фотоэлементы, плоские зеркала, концентраторы солнечной энергии, поликристаллический кремний, адаптирующие устройства.

Введение

Целью настоящего исследования является разработка способов повышения эффективности фотоэлектрических элементов за счет применения плоских концентраторов, выбора рациональной конструкции и взаимного расположения адаптирующей и отражающей поверхности при оптимальной площади проникновения солнечных лучей. Компактность солнечных батарей, созданных на основе исследуемых нами конструктивных решений, позволит значительно снизить массогабаритные характеристики, что весьма актуально при эксплуатации солнечных батарей на морских платформах, судах морского и речного назначения, маяках, судовых и береговых объектах и комплексах, имеющих ограниченные рабочие площади. Поставленная нами цель достигается решением следующих задач:

– выбор качественных, недорогих и технологичных в изготовлении фотоэлементов;

– обеспечение максимального освещения фотоэлемента в целях получения максимального коэффициента концентрации солнечного излучения на адаптирующую поверхность;
 – определение рационального способа расположения фотомодулей в плоских зеркалах, а также нахождение оптимальных углов раскрытия зеркал.

Для автономного снабжения электрической энергией объектов различного назначения, значительно удаленных от промышленных энергосетей, перспективным направлением является применение и использование солнечной энергии путем преобразования ее в фотоэлектрических батареях [1].

Из известных способов преобразования солнечной энергии наиболее эффективным и проверенным считается фотоэлектрический, с помощью полупроводниковых солнечных элементов.

Анализ фотоэлектрических модулей

Наиболее распространенным типом фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в настоящее время являются системы на основе поли- и монокристаллического кремния (рис. 1). Кремний занимает второе место по распространенности после кислорода среди всех химических элементов на Земле. Но, являясь самым удобным сырьем для фотоэнергетики, от получения и обработки до «солнечного качества» кремний проходит долгий путь, который содержит ряд технологических процессов, требующих значительных энергетических затрат.

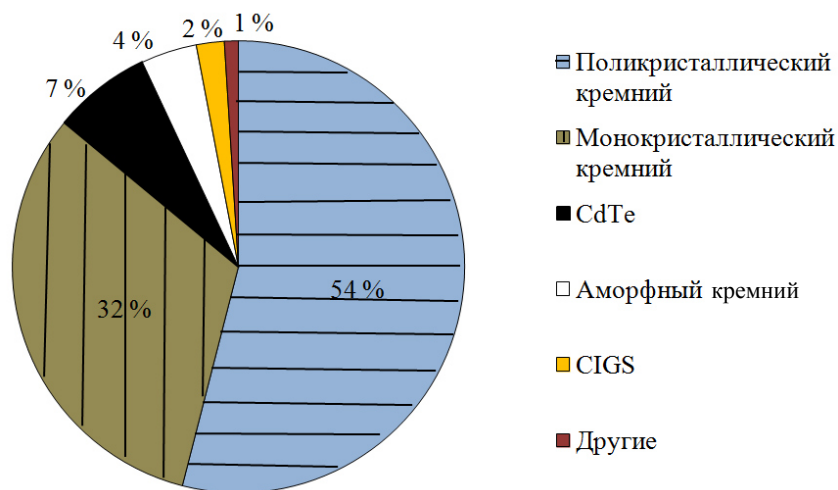


Рис. 1. Структура производства фотоэлектрических преобразователей по виду технологии и используемых материалов (данные 2012 г.) [2]

Монокристаллические кремниевые солнечные элементы (рис. 2, *а*) производятся из кремниевых пластин толщиной 0,3 мм путем их легирования донорными и акцепторными примесями, создания омических контактов (сплошного тыльного и решеточного лицевого) и направленного химического травления поверхности для создания антиотражающих свойств [2].

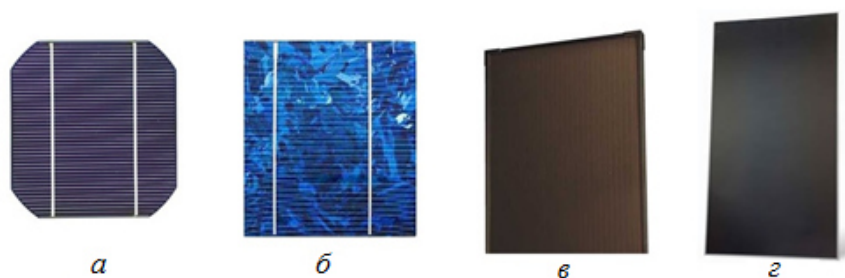


Рис. 2. Классификация фотоэлектрических преобразователей: *а* – монокристаллический кремний; *б* – поликристаллический кремний; *в* – аморфный кремний; *г* – теллурид кадмия

Солнечные элементы, разработанные на основе монокристаллов, обладают самым высоким КПД среди всех существующих кремниевых пластин (16–20 %). В связи с тем, что ячейка обладает однородной структурой, солнечные лучи равномерно освещают всю ее поверхность, не поддаваясь рассеиванию на кристаллических неровностях, они также равномерно преобразуются в электроток. Иными словами, эффективность данной ячейки находится только под влиянием свойств самого кристалла, она не убывает от вторичных отражений лучей (что характерно для полипластин).

Поликристаллические фотопреобразователи коммерчески более привлекательны (рис. 2, б). Поликристаллические кремниевые солнечные элементы по технологии изготовления принципиально не отличаются от монокристаллических. Основное отличие заключается в том, что для их производства применяется менее чистый и более дешевый кремний. Различают поликремний «электронного» (полупроводникового) качества (содержание примесей менее 1×10^{-10} %) и поликремний «солнечного» качества (содержание примесей менее 1×10^{-5} %) [2]. Создание поликристаллического кремния происходит при медленном охлаждении кремниевого расплава. В отличие от производства монокристаллов стадия вытягивания отсутствует, что делает весь процесс менее энергоемким и, соответственно, менее затратным. Однако внутри кристалла поликристаллического кремния имеются области, отделенные зернистыми границами, ослабляющие эффективность элементов (13–16 %).

На рынке также широкое распространение получили и тонкопленочные ФЭП, создаваемые из аморфного кремния (рис. 2, в) [3]. Фотоэлектрические модули на основе аморфного кремния производятся осаждением пленок кремния на стеклянную или стальную поверхность (с нанесением характерных защитных и промежуточных покрытий). Осаждение производится способом пиролиза моносилана или его плазмохимического разложения. Пленки легируют бором и фосфором для осуществления проводимости разных видов. В таких модулях не используются кристаллы, они представляют собой тонкопленочные солнечные элементы сложной структуры, корнем технологического процесса изготовления которых является послойное нанесение всевозможными способами подходящих соединений тонких пленок [4]. КПД таких ФЭП невелик (6–10 %), но относительно низкая стоимость – их преимущество на рынке.

Фотоэлектрические преобразователи на основе теллурида кадмия (CdTe), обладая большим КПД (10–12 %), чем ФЭП из аморфного кремния, токсичны, что не дает им широко распространиться на рынке (рис. 2, г). Методы нанесения теллурида кадмия весьма разнообразны, что открывает широкие возможности для оптимизации и удешевления солнечных элементов. Среди этих методов наиболее перспективными являются вакуумная сублимация, методы химического осаждения, напыление, электроосаждение [5]. Наилучшие характеристики в настоящее время показывают CdTe-солнечные элементы, изготовленные по CBD/CSS технологии. С целью упорядочения нанесенных тонких пленок и повышения КПД солнечного элемента тонкие пленки после нанесения подвергаются высокотемпературному отжигу при 400–500 °С для образования Cd(S, Te)-контактного гетероперехода. Фотоэлектрические преобразователи на основе CdTe имеют вполне оптимальные параметры для фотовольтаического преобразования солнечного света: большой коэффициент оптического поглощения ($\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$) в видимом диапазоне и почти идеальную ширину запрещенной зоны (1,5 эВ) для ячеек с одним переходом. Благодаря этому пленка CdTe толщиной всего несколько микрон поглощает ~ 90 % солнечного излучения. Все это говорит о том, что возможности таких ФЭП являются достаточно перспективными для усовершенствования и оптимизации технологии производства и, следовательно, для снижения их себестоимости.

Существуют также и другие ФЭП, отличающиеся по видам технологии и используемым материалам, но по ряду причин они не получили должного распространения и их производство весьма ограничено. Примером может послужить ФЭП на основе $A^{III}B^V$ соединений (цифры обозначают, из каких групп находятся в этом полупроводниковом соединении химические элементы). У таких ФЭП довольно высокий показатель КПД (25–30 %), но их производство отличается сложностью и низкой экологичностью. Кроме того, химические элементы, используемые в ФЭП данного типа, относятся к категории редко встречающихся на Земле [11], поэтому такие ФЭП, в связи с их высокой радиационной стойкостью и высоким КПД, используются в основном для получения энергии в космосе.

Не так давно на рынке появился и совершенно новый вид ФЭП, при создании которых используются полупроводниковые наночастицы: нанопроволоки, нанопалочки, наноточки. При уменьшении размеров полупроводниковых наночастиц (начиная с определенного значения, характерного для каждого типа полупроводника) наблюдается увеличение запрещенной зоны и сдвиг оптического спектра в коротковолновую область, поэтому использование многослойных тонкопленочных систем с нанокристаллической структурой в настоящее время является перспективным направлением.

Таким образом, внедрение эффективных, недорогих, компактных фотоэлектрических элементов на морских и береговых объектах позволит создать комфортные технологические условия обеспечения их электроснабжением.

Способы повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей

Повысить эффективность работы гелиоэнергетических устройств на основе фотоэлементов можно путем применения плоских зеркальных концентраторов солнечной энергии и совершенствования их конструкций посредством определения оптимальных геометрических размеров и совершенствования форм адаптирующей поверхности гелиоприемников [7, 8]. При этом возможно снижение компоновки энергетического оборудования, что немаловажно для использования на отдельных объектах: морских платформах, береговых или горных станциях, на крышах административных зданий и элитных коттеджей.

Концентраторы позволяют фокусировать рассеянную энергию на адаптирующую поверхность в форме радиационно-частотного энергетического потока, повышающего мощность устройств и уровень потенциала их теплофизических характеристик. Уровень энергетического воздействия при этом увеличивается на несколько порядков. Градиент температурного распределения на инсолирующей поверхности может достигать критических параметров.

Создание эффективных концентраторов позволит выйти на новый уровень в производстве и использовании энергоэффективной техники, откроет новые возможности для создания на их основе современных энергосберегающих технологий и новые перспективы внедрения солнечной энергетики.

Нами рассмотрена конструкция адаптирующего устройства, имеющего форму правильного треугольника с установленными в центре двумя зеркальными поверхностями (рис. 3). Основные геометрические параметры такого концентратора связаны аналитически через длину адаптирующего устройства a и фиктивный угол раскрытия зеркал θ .

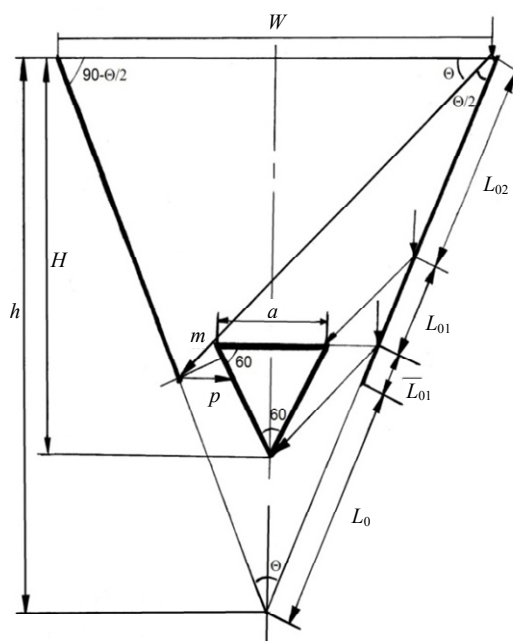


Рис. 3. Расчетная модель для определения коэффициентов концентрации на адаптирующее устройство треугольной формы при $W = 4a$ и $\Theta = 45^\circ$

Аналитические исследования

Исследовалась эффективность облучения поверхности адаптирующего устройства прямой и отраженной от зеркал энергией солнечной радиации при различных величинах входящего через поверхность W потока в концентратор. Длина адаптирующего устройства a была постоянной.

Изменялись величины W входящего потока при различных соотношениях W ($2a$; $3a$; $4a$) и углах раскрытия зеркал θ (30° ; 45° ; 60° ; 90°).

На рис. 3 представлена расчетная модель с $W = 4a$ и $\theta = 45^\circ$. Геометрические параметры всех элементов концентратора связаны между собой следующими тригонометрическими выражениями через a и θ :

$$H = (L_{01} + L_{02} + a) \cdot \cos \frac{\Theta}{2};$$

$$h = 2a \cdot \cos \frac{\Theta}{2};$$

$$L_{01} = \frac{2a \cdot \sin(60 - \Theta)}{\sin(90 + \Theta) \cdot \cos \frac{\Theta}{2}};$$

$$\overline{L_{01}} = \left[4a \cdot \sin \Theta - (L_{01} + L_{02}) \cdot \sin(180 - \frac{3}{2}\Theta) \right] / \cos \frac{\Theta}{2};$$

$$L_{02} = \frac{a \cdot \sin \Theta}{\sin \frac{\Theta}{2}};$$

$$L = L_{01} + L_{02} + \overline{L_{01}},$$

где L – длина одного зеркала; H – высота концентрирующего устройства; h – фиктивная высота.

Аналогичные модели были построены и для других геометрических соотношений концентраторов.

В аналитическом исследовании принимались следующие допущения:

– площади концентратора, ввиду их одинаковых значений по длине, в расчетной модели заменены профилями конструкции;

– угол падения солнечных лучей на зеркальные поверхности равен углу отражения от нее;

– солнечные лучи падают строго параллельно плоскости симметрии модели концентратора;

– вся энергия солнечной радиации полностью отражается от зеркальных поверхностей и полностью поглощается площадями адаптирующей поверхности независимо от углов отражения и поглощения солнечных лучей [8].

Эффективность работы концентратора оценивалась через оптический коэффициент концентрации, равный отношению солнечной энергии, падающей на всю поверхность адаптирующего устройства (по геометрическому расчету $a + a + a = 3a$), к поверхности одной стороны a :

$$C_{03} = \frac{n \cdot a}{a},$$

где n – доля солнечной энергии, облучающей адаптирующее устройство.

Для модели (рис. 3) оптический коэффициент концентрации выражается следующим соотношением:

$$C_{03} = \frac{a + 2a + 2a + 2pm}{a},$$

где a – прямое попадание солнечных лучей на верхнюю поверхность a адаптирующего устройства; $2a$ – отражение солнечной энергии от зеркал на верхнюю поверхность a и боковые поверхности a адаптирующего устройства; $2pm$ – двойное отражение солнечной энергии от зеркал на боковые поверхности a адаптирующего устройства:

$$pm = \frac{\left[4a \cdot \sin \Theta - (L_{01} + L_{02}) \cdot \sin\left(180 - \frac{3}{2} \Theta\right) \right]}{\cos 30}$$

В результате расчета эффективности таких концентраторов получены величины, представленные соответствующими точками на рис. 4. По вертикали указаны значения коэффициентов оптической концентрации C_{O3} , а по горизонтали – углы раскрытия зеркал θ .

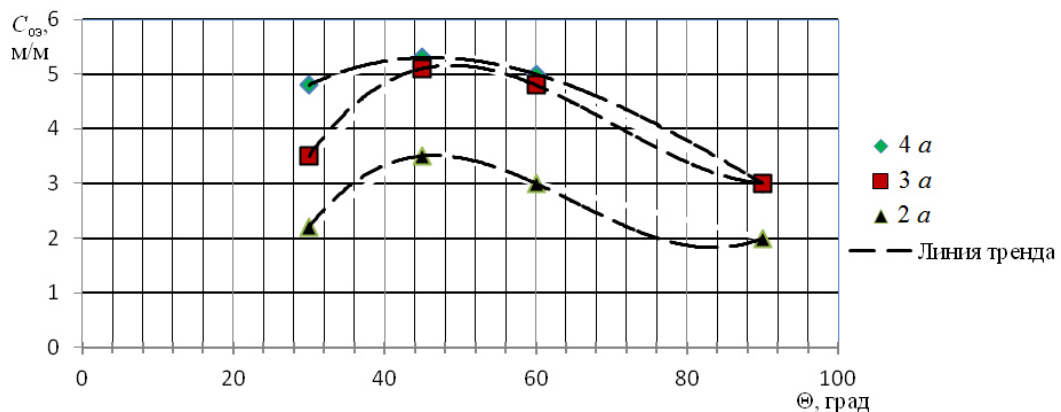


Рис. 4. Графики значений оптических коэффициентов концентрации на адаптирующую поверхность треугольной формы при облучении двумя зеркалами

Расчетные точки оптических коэффициентов эффективности можно связать расчетными зависимостями через политропные выражения, тогда для $W = 2a$ будет соответствовать уравнение

$$C_{O3} = 7E - 0,5 \cdot \Theta^3 - 0,013 \cdot \Theta^2 + 0,776 \cdot \Theta - 11,2;$$

для $W = 3a$:

$$C_{O3} = 6E - 0,5 \cdot \Theta^3 - 0,011 \cdot \Theta^2 + 0,748 \cdot \Theta - 9,9;$$

для $W = 4a$:

$$C_{O3} = 1E - 0,5 \cdot \Theta^3 - 0,003 \cdot \Theta^2 + 0,238 \cdot \Theta + 0,4.$$

Графики имеют явные экстремальные значения в пределах углов раскрытия зеркал, равных 40–50°, максимальные значения при $W = 4a$, $C_{O3} = 5,78$.

Заключение

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы. Фотоэлементы, выполненные из поликристаллического кремния, можно рекомендовать как наиболее перспективные. В ходе исследования установлено, что при перпендикулярном облучении треугольных равносторонних конструкций адаптирующих устройств эффективными являются следующие параметры концентраторов: $W = 4a$; $\theta = 45-50^\circ$. В этом случае, при одинаковой компактности известных устройств и исследуемых нами, энергетическая эффективность последних возрастает на 40 %, а номинальная стоимость снижается на 25 %. Стабильность исследуемых параметров в таких конструкциях достигается применением следящих за солнечным потоком систем. В настоящее время солнечные батареи, выполненные на основе исследуемых конструкций, можно

рекомендовать к установке на судах и использовать их в качестве источников энергии для радиостанций, судовой бытовой техники, освещения и сигнализации на стоянках судов в портах, не прибегая к подключению берегового питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко М. Ф., Шипулина Ю. В. Фотоконцентраторы судовых энергетических комплексов // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2010. № 2. С. 109–113.
2. Ильин Р. А., Давыденко А. И. Фотоэлектрические преобразователи как независимый источник электроэнергии на собственные нужды производственных предприятий // Символ науки. 2015. № 11. С. 27–31.
3. Гременок В. Ф., Тиванов М. С., Залесский В. Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. Минск: Центр БГУ, 2007. 222 с.
4. Калабушкина Н. М., Киселёва С. В., Михайлин С. В., Тарасенко А. Б., Усанов А. Б. Традиционные и перспективные фотоэлектрические модули и их применение в фотоэнергетических системах // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 5. С. 111–116.
5. Дергачева М. Б., Гуделева Н. Н., Уразов К. А. Новые преобразователи солнечной энергии для нефтегазового комплекса // Нефть и газ. 2016. № 3. С. 97–112.
6. Дергачева М. Б., Гуделева Н. Н. Тонкопленочные фотоэлементы на основе халькогенидов для преобразования солнечной энергии // Научно-технологическое развитие нефтегазового комплекса: докл. X Междунар. науч. Надировских чтений. Атырау, 2012. С. 445–463.
7. Руденко М. Ф., Туркпенбаева Б. Ж., Чивиленко Ю. В. Теоретические основы проектирования экологически безопасной гелиоэнергетической техники для производства теплоты. Актау, 2008. С. 9–15.
8. Руденко М. Ф. Эффективность гелиоприёмных устройств с концентраторами для систем тепло- и хладоснабжения. Саратов: ЛНЭ ОЭП СНЦ РАН, 2001. С. 63.

Статья поступила в редакцию 09.11.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Руденко Михаил Фёдорович – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности и гидромеханики; rudenko@astu.org.

Давыденко Андрей Иванович – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; магистрант кафедры теплоэнергетики; dai_94@mail.ru.



M. F. Rudenko, A. I. Davydenko

PHOTOCONCENTRATORS FOR SEA AND COASTAL POWER COMPLEXES

Abstract. For independent supply of electric energy of objects of the various purposes considerably removed from the industrial energy networks the perspective direction is the application and the use of a solar energy by means of its transformation to photo-electric batteries. The purpose of the present research is to improve the efficiency of photo-electric elements due to the application of flat concentrators, a rational choice of design and a relative positioning of an adapting and reflecting surface at the optimum area of penetration of solar beams. The suggested constructive solutions will allow reducing weight and sizing characteristics of solar batteries considerably, applying on sea platforms, beacons, ship and coastal objects and the complexes having the limited working areas. The given goal is achieved by solving the following problems: choose qualitative, not expensive and technological photoelements in manufacturing; create the maximal illumination of photoelement by solar energy, defining the maximum coefficient of solar radiation concentration on adapting surface; define

rational interposition of photomodules in flat mirrors, and also find optimum angles of mirrors' disclosure. The survey analysis of existing ways of manufacturing and usage of photo-electric elements in solar batteries has been conducted: polycrystalline silicon, monocrystal silicon, amorphous silicon, photo elements on the basis of telluride of cadmium, etc. The research of the photo elements, having adapting surface in the form of a correct triangle with the side "a" established in center of two flat mirrors with a corner of disclosing Q , has been carried out. Mathematical expressions and the graphic dependences defining an overall performance of the concentrator through optical factor of concentration have been received. The analytical researches show, that parameters of concentrators are effective at $W = 4a$ (a surface of an input of solar beams), $Q = 45\text{--}50^\circ$, while power efficiency is increased by 40%, and the nominal value is reduced by 25%.

Key words: photoelements, flat mirrors, concentrators of a solar energy, polycrystalline silicon, adapting devices.

REFERENCES

1. Rudenko M. F., Shipulina Iu. V. Fotokonsentratory sudovykh energeticheskikh kompleksov [Photo concentrators of marine energy complexes]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 2, pp. 109–113.
2. Il'in R. A., Davydenko A. I. Fotoelektricheskie preobrazovateli kak nezavisimyi istochnik elektroenergii na sobstvennye nuzhdy proizvodstvennykh predpriiatii [The photoelectric converters as an independent source of electricity for own needs of industrial enterprises]. *Simvol nauki*, 2015, no. 11, pp. 27–31.
3. Gremenok V. F., Tivanov M. S., Zaleskii V. B. *Solnechnye elementy na osnove poluprovodnikovyykh materialov* [Solar elements based on semiconducting materials]. Minsk, Tsentr BGU, 2007. 222 p.
4. Kalabushkina N. M., Kiseleva S. V., Mikhailin S. V., Tarasenko A. B., Usanov A. B. Traditsionnye i perspektivnye fotoelektricheskie moduli i ikh primenenie v fotoenergeticheskikh sistemakh [Traditional and advanced photovoltaic modules and their application in photovoltaic systems]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, 2013, no. 5, pp. 111–116.
5. Dergacheva M. B., Gudeleva N. N., Urazov K. A. Novye preobrazovateli solnechnoi energii dlia neftegazovogo kompleksa [New converters of solar energy for the oil and gas complex]. *Nefit' i gaz*, 2016, no. 3, pp. 97–112.
6. Dergacheva M. B., Gudeleva N. N. Tonkoplennochnye fotoelementy na osnove khal'kogenidov dlia preobrazovaniia solnechnoi energii [The thin film solar cells based on chalcogenides for the conversion of solar energy]. *Nauchno-tekhnologicheskoe razvitie neftegazovogo kompleksa: doklady X Mezhdunarodnykh nauchnykh Nadirovskikh chtenii*. Atyrau, 2012. Pp. 445–463.
7. Rudenko M. F., Turkpenbaeva B. Zh., Chivilenko Iu. V. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniia ekologicheski bezopasnoi gelienergeticheskoi tekhniki dlia proizvodstva teploty* [Theoretical bases of designing environmentally friendly helio energy echnology for heat production]. Aktau, 2008. Pp. 9–15.
8. Rudenko M. F. *Effektivnost' geliopriemnykh ustroystv s konsentratorami dlia sistem teplo- i khladosnabzheniia* [Efficiency of helio – receivers with concentrators for heating and cooling systems]. Saratov, LNE OEP SNTs RAN, 2001. P. 63.

The article submitted to the editors 09.11.2016

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rudenko Mikhail Fedorovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Life Security and Hydromechanics; rudenko@astu.org.

Davydenko Andrey Ivanovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Undergraduate Student of the Department of Power Engineering; dai_94@mail.ru.

