

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Гвоздкова Ю. Д.<sup>1</sup>, Гвоздкова И. А.<sup>2</sup>, Горбачев С. И.<sup>3</sup><sup>1,3</sup> ФГБОУ ВО «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ

(национальный исследовательский университет)», Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4,

<sup>1</sup>gina94@yandex.ru, <sup>3</sup>gor-sergey1@yandex.ru<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Россия, 117997, г. Москва, ул. Садовническая, 33, стр. 1, gvozdкова@yandex.ru

**Аннотация.** В статье проанализированы проблемы, достижения, перспективы и темпы развития тонкопленочной фотовольтаики, основанной на использовании различных органических соединений. Обоснована необходимость проведения сравнительного многокритериального анализа перспективных технологий и материалов указанного сектора солнечной электроэнергетики с целью обеспечения компромисса между технико-экономической эффективностью их разработки, внедрения и использования и сохранением окружающей среды. Обобщены результаты исследований жизненных циклов фотоэлектрических устройств с активным слоем на основе высокомолекулярных и низкомолекулярных донорно-акцепторных органических соединений, полученных при помощи растворных и вакуумных технологий. Систематизированы технические, эксплуатационные и экологические критерии оценки преимуществ и недостатков тонкопленочных органических фотоэлементов и модулей на различных стадиях их жизненного цикла. Даны рекомендации по оптимизации эколого-ориентированного выбора органических солнечных батарей с учетом специфики их предназначения, условий эксплуатации и региональных предпочтений в сфере обеспечения энергетической, экологической и техносферной безопасности. Рассмотрено применение методов анализа иерархий и Монте-Карло для реализации статистически надежного многофакторного выбора органических фотовольтаических устройств и энергоустановок на их основе с учетом экологических и иных ограничений. Рассчитан эколого-технический рейтинг наиболее перспективных фотоэлектрических систем указанного вида и выявлен их оптимальный тип, способный конкурировать с фотоэлементами на неорганических тонких пленках. Проведены компьютерные эксперименты, позволившие сравнить комплексную конкурентоспособность наилучших органических фотоэлементов с их тонкопленочными аналогами на основе теллурида кадмия. Сформулированы перспективные направления развития использованного оптимизационного подхода в сфере фотоэлектрического сегмента солнечной энергетики.

**Предмет исследования:** технико-экономические и экологические характеристики фотоэлектрических энергоустановок с активным слоем из органических материалов на различных стадиях жизненного цикла

**Материалы и методы:** органические материалы активного слоя солнечных фотоэлементов и энергоустановок на их основе, метод анализа иерархий, метод Монте-Карло, методы математической статистики, компьютерное моделирование с использованием средств MS Excel и VBA

**Результаты:** выявлен оптимальный тип органических солнечных батарей, удовлетворяющий эколого-техническим требованиям и ограничениям и соответствующая ему технология получения активного слоя; проведена статистически обоснованная комплексная сравнительная оценка наилучших органических фотоэлементов и тонкопленочных солнечных модулей с активным слоем на основе теллурида кадмия

**Выводы:** доказана комплексная конкурентоспособность тонкопленочных фотоэлементов на основе низкомолекулярных донорно-акцепторных органических соединений, полученных с помощью вакуумных технологий

**Ключевые слова:** фотоэлектрические энергоустановки, тонкопленочные фотоэлементы, органические материалы активного слоя, многокритериальная эколого-ориентированная оценка, метод анализа иерархий, метод Монте-Карло.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время солнечная электроэнергетика имеет самые высокие темпы роста среди всех источников электроэнергии: на начало 2020 г. прирост ее мощностей составлял 48 % от общего прироста мощностей мирового электроэнергетического комплекса. Доля солнечной энергии в выработке электричества сейчас превышает 2,6 % [1]. Самым перспективным направлением развития гелиоэнергетики стал фотовольтаический сектор, основанный на прямом преобразовании энергии Солнца в электрический

ток с помощью солнечных батарей (СБ), называемых также солнечными фотоэлементами.

К основным достоинствам СБ относятся:

-доступность и неисчерпаемость солнечной энергии (для удовлетворения глобальной энергетической потребности достаточно покрыть примерно 0,1 % поверхности Земли солнечными преобразователями с КПД 10 %, что соответствует площади 700 x 700 км<sup>2</sup>);

-высокая степень безопасности для окружающей среды (ОС);

-значительно более низкие капитальные и эксплуатационные затраты по сравнению с устройствами традиционной углеводородной

энергетики; постоянное снижение стоимости «солнечной» электроэнергии;

-мобильность и долговечность (средний срок эксплуатации не менее 30 лет);

-отсутствие движущихся частей.

Главные недостатки солнечных батарей:

-зависимость выработки электроэнергии от погодных условий и времени суток, что требует соответствующих систем аккумуляции энергии;

-сильная зависимость степени токсичности от вида материала активного слоя фотоэлемента и аккумулятора произведенной с помощью него электроэнергии;

-себестоимость солнечной электроэнергии может быть выше средних показателей по энергетике.

Ключевым фактором, определяющим технико-экономическую эффективность, степень экологической безопасности и конкурентоспособность солнечных фотоэлементов, является вид материалов, на основе которых создается их активный слой [2]. Наиболее распространенными материалами указанного слоя являются кремний, теллурид кадмия, арсенид галлия, медь, селен, индий, галлий.

Основные проблемы современной фотовольтаики связаны с поиском способов увеличения КПД, долговечности, стабильности, степени экологичности солнечных батарей, а также со снижением их стоимости. Поэтому в различных научно-технологических лабораториях идет активный поиск новых процессов получения и видов материалов для фотоэлектрических энергоустановок.

К перспективным материалам активного слоя СБ относятся донорно-акцепторные низкомолекулярные и высокомолекулярные органические соединения и перовскиты [3-5]. Фотоэлементы, создаваемые на их основе, принято относить к третьему поколению. Главные достоинства указанных материалов заключаются в потенциально низкой стоимости, высокой экологичности (кроме перовскитов, содержащих свинец) и сильной поглощательной способности в максимуме солнечного спектра, обеспечивающей создание на их основе ультратонких фотоэлектрических элементов (с активным слоем толщиной 100 нм и менее). Основным недостатком рассматриваемых соединений – нестабильность и деградация изготовленных из них фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии, проявляющиеся в уменьшении их КПД из-за воздействия атмосферного кислорода и влажности, ультрафиолетового излучения и повышенных температур [6].

Органическая фотовольтаика является одной из наиболее развивающихся областей альтернативной энергетики, интерес к которой в настоящий момент возрастает экспоненциально, что проявляется прежде всего в росте количества научных работ, посвященных указанной инновационной тематике.

В данной статье изложены результаты многокритериального эколого-ориентированного анализа перспектив использования различных органических материалов в фотоэлектрических энергоустановках. Указанные результаты были получены методами анализа иерархий и Монте-Карло.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящий момент более 90 % фотовольтаического рынка приходится на солнечные батареи из мультикристаллического (multi-Si) и монокристаллического (mono-Si) кремния. Ключевым конкурентным преимуществом таких устройств является высокая эффективность преобразования энергии Солнца (20-25 % для коммерчески доступных солнечных модулей) [5]. Среди недостатков рассматриваемых фотоэлементов отмечается прежде всего сложность технологии производства, хрупкость, непрозрачность и большой вес панелей (толщина активного слоя кремниевых СБ около 3 мкм, плотность кремния 2,33 г/см<sup>3</sup> [7]). Кроме этого, энергоустановки на основе кремниевых кристаллических солнечных батарей требуют дорогостоящих и затратных по времени установки и обслуживания.

Наиболее перспективной альтернативой фотоэлементам на основе кристаллического кремния являются тонкопленочные солнечные батареи (им принадлежит сейчас около 7,5 % рынка фотовольтаических устройств) [5]. Тонкопленочные фотоэлементы (ТФ) изготавливают путем нанесения одного или нескольких тонких слоев или тонкой пленки фотоэлектрического материала на стеклянную, металлическую или пластиковую подложку [8].

К доминирующим материалам активного слоя фотоэлектрических ячеек на тонких пленках относятся теллурид кадмия (CdTe), диселенид меди-индия-галлия (CIGS,  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ ,  $0 \leq x \leq 1$ ), аморфный кремний (a-Si), нанокристаллический кремний (nc-Si), микрокристаллический кремний (μc-Si) [5, 6, 8].

Сравнение коммерческих тонкопленочных фотоэлементов с солнечными батареями на основе кристаллического кремния приводит к следующим выводам:

- 1) средние показатели эффективности преобразования солнечной энергии у ТФ ниже (рис. 1) [5];
- 2) цена сопоставимая (около 0,3 \$/Вт) [5];
- 3) ФЭП на тонких пленках более прочные [8];
- 4) ТФ имеют меньший вес (что особенно важно при их перевозке и эксплуатации в различных транспортных средствах, включая авиацию) [8];
- 5) ТФ могут быть изготовлены на гибких подложках, что позволяет покрывать ими поверхности разнообразной формы (как плоские, так и криволинейные), резать на части, выпускать в рулонах [8];

6) благодаря высокой степени прозрачности ТФ могут использоваться вместо остекления [8];

7) климатические и экологические изменения, слабая освещенность, рассеянность света, высокие и низкие температуры оказывают на ТФ гораздо меньшее негативное воздействие [6, 8, 9];

8) средний срок энергетической окупаемости, определяемый промежутком времени, в течение

которого должна функционировать фотоэлектрическая энергосистема, чтобы сгенерировать такое же количество энергии, какое было использовано для ее создания на всех предыдущих стадиях жизненного цикла (ЖЦ), сопоставимый (1,1-1,2 года) [5, 6, 8].

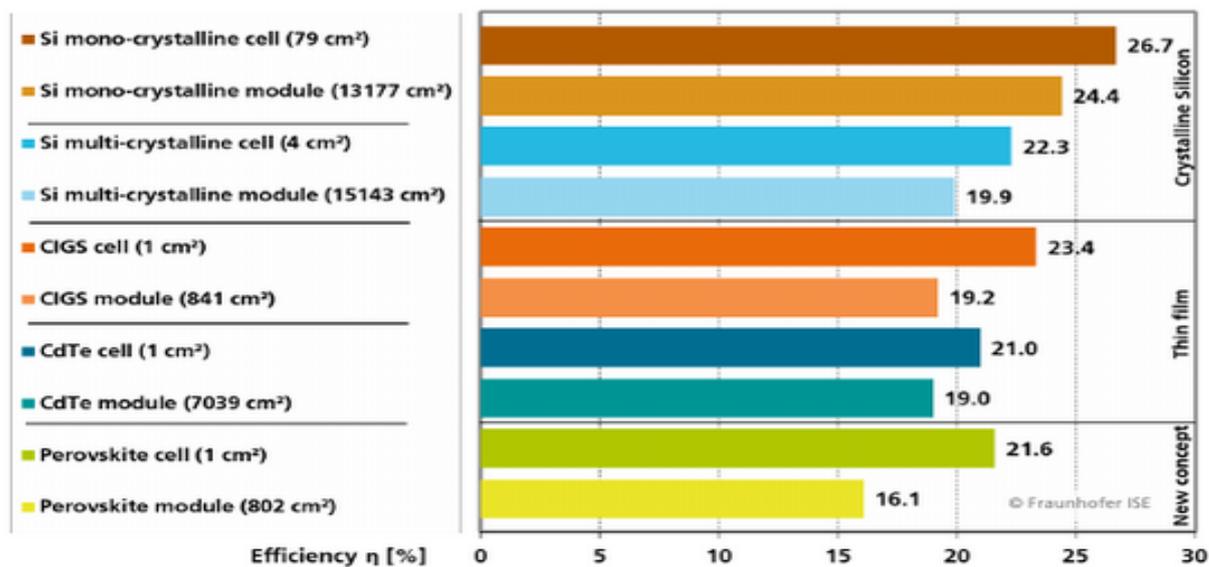


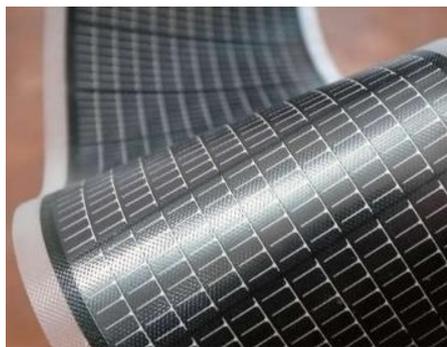
Рис. 1. КПД солнечных батарей с различным материалом активного слоя [5]

Fig. 1. Efficiency of solar cells with different active layer material [5]

По мнению многих экспертов, у тонкопленочной фотовольтаики имеется достаточно большой потенциал по интегрированию ее устройств не только в наземные энергетически эффективные строительные конструкции, системы мониторинга и транспортные средства, но и в различные летательные аппараты. Предполагается, что развитие солнечной электроэнергетики в ближайшие годы будет связано главным образом с совершенствованием технологий изготовления и эксплуатационных характеристик тонкопленочных солнечных фотоэлементов и энергоустановок на их основе. При этом большие надежды возлагаются на разработки ТФ на основе перовскитов (ABX<sub>3</sub>: А – одновалентный катион (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup> и др.), В – двухвалентный металл-ион (Pb<sup>2+</sup>, Sn<sup>2+</sup>, Ge<sup>2+</sup> и др.), X – одновалентный анион (Br<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, I<sup>-</sup> и др.)) и органических полупроводников, к которым относятся π-сопряженные органические и элементоорганические молекулы, олигомеры и полимеры, органические красители и комплексы металлов [5-7].

Органические соединения, используемые в тонкопленочных ФЭП, обеспечивают им выгодные

преимущества перед их традиционными неорганическими аналогами. К таким достоинствам относятся легкость (толщина активного слоя таких устройств около 100 нм, плотность органических материалов 1,1-1,3 г/см<sup>3</sup>), экологичность (если при их получении не используют токсичные растворители), широкая цветовая гамма, растяжимость, меньшая потенциальная стоимость [3, 4, 7, 10, 11]. Органические солнечные батареи (ОСБ) могут быть изготовлены с помощью простых, высокопроизводительных и недорогих технологий, к которым относятся рулонные методы печати на гибких подложках (рис. 2) [7, 12]. Кроме этого, ОСБ более эффективно преобразуют рассеянный свет от искусственных источников, создающих низкую освещенность [3, 4, 7], что значительно расширяет сферу применения рассматриваемых устройств. Например, такие источники энергии можно использовать внутри помещений и транспортных средств. Еще одним аргументом в пользу органических фотовольтаических модулей является их очень простая фиксация: такие модули монтируются двусторонней липкой лентой.



**Рис. 2.** Гибкие органические солнечные батареи [7]  
**Fig. 2.** Flexible organic solar panels [7]

Наиболее перспективными материалами активного слоя органических солнечных элементов являются низкомолекулярные и высокомолекулярные донорно-акцепторные соединения. Для получения высокомолекулярных донорно-акцепторных соединений (ВМДАС) используют растворные технологии, для синтеза низкомолекулярных донорно-акцепторных соединений (НМДАС) – растворные и вакуумные технологии [3, 4, 12-16].

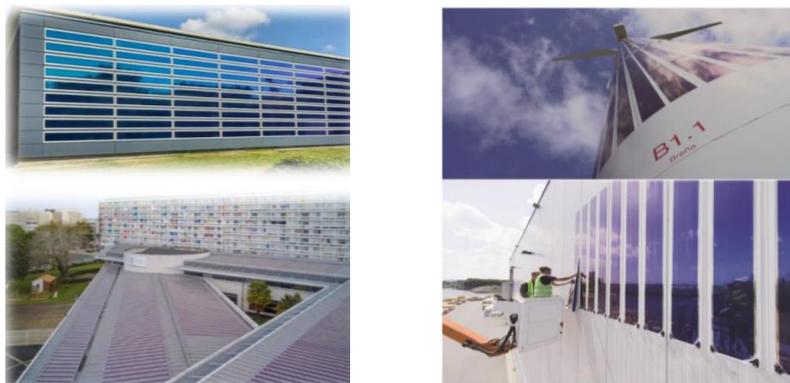
В настоящее время КПД ОСБ достигает значений, превосходящих 18 %, что в 1,3 раза превосходит эффективность коммерческих фотоэлементов на основе аморфного кремния и приближается к показателям, характерным для большинства солнечных батарей (рис. 1) [14]. Однако такие показатели продемонстрированы только в устройствах небольшой площади (2 – 5 мм<sup>2</sup>), изготовленных в лабораторных условиях с использованием галогенсодержащих растворителей, которые являются высокотоксичными [14]. Рулонные промышленные технологии ориентированы на изготовление СБ с площадями в десятки квадратных метров. Средний КПД органических солнечных батарей больших площадей (более 50 см<sup>2</sup>) составляет около 7 % [15-17]. Для достижения более высоких значений эффективности, а также для перехода к экологичному производству ОСБ, требуются новые технологии и материалы, являющиеся воспроизводимыми и масштабируемыми. Ученые Института проблем химической физики РАН разрабатывают новые сопряжённые полимеры с полупроводниковыми свойствами для создания эффективных и стабильных органических солнечных батарей и модулей увеличенной площади с применением методов, совместимых с промышленными рулонными технологиями и основанных на использовании экологически безопасных (не содержащих галогены) растворителей [18].

Для обеспечения стабильности КПД органических и перовскитных СБ [3, 4, 6, 13]:

- 1) в материал вводят различные примеси;
- 2) покрывают пленки специальными изолирующими покрытиями;
- 3) создают гибридные солнечные ячейки на основе кремния с нанесением на него тонкопленочного органического или перовскитного материала.

Основные факторы деградации органических фотоэлементов – проникновение в них молекулярного кислорода и воды. Поэтому ОСБ должны искать ниши, где кристаллический кремний и другие неорганические фотоэлектрические технологии не могут быть использованы, а ограниченный срок эксплуатации органических фотовольтаических устройств не является важным эксплуатационным фактором. В настоящее время такими солнечными батареями можно покрывать строительные конструкции и транспортные средства, не рассчитанные на перенос больших нагрузок, с проектным сроком эксплуатации менее 20 лет (складские помещения, остановки общественного транспорта, небольшие самолеты и т. д.). Другое перспективное применение ОСБ связано с их встраиванием в портативную электронную технику и изделия легкой промышленности, включая одежду. Средний минимальный срок службы лучших образцов гибких органических модулей составляет в настоящий момент около 5 лет, а жестких – 10 лет [17].

Главными причинами, сдерживающими широкое распространение ОСБ, являются их низкая эксплуатационная стабильность, низкие значения КПД устройств большой площади и использование токсичных растворителей в процессе их создания. Несмотря на это, компании Heliatek, Infiniti PV, Solarmer и другие активно разрабатывают проекты практического применения технологий органической фотовольтаики. Например, Heliatek реализовала установку органических солнечных батарей, изготовленных с применением вакуумных технологий, на ветроустановке, фасадах и крыше зданий (рис. 3) [13, 19].



**Рис. 3.** Проекты, реализованные Heliatek, по установке ОСБ на ветроустановке, фасадах и крыше зданий [13, 19]  
**Fig. 3.** Projects implemented by Heliatek for the installation of organic solar panels on wind turbines, facades and roofs of buildings [13, 19]

Для того, чтобы органические солнечные батареи могли быть внедрены в производство, необходимо выполнение целого ряда условий:

- они должны иметь достаточно высокие значения КПД и длительный срок эксплуатации;
- изготовление устройств рассматриваемого вида должно быть недорогим и отвечать международным экологическим стандартам;
- ОСБ должны быть такими, чтобы их можно было быстро интегрировать в различные инфраструктурные объекты, транспортные средства, в современную приборную базу и в другие приложения в качестве элементов питания.

В настоящий момент нет ни одного материала, использование которого позволило бы создать органические фотовольтаические устройства, удовлетворяющие всем указанным условиям. В зависимости от варианта назначения к энергоустановкам на основе солнечных батарей могут предъявляться особые требования, устанавливающие ограничения на их использование. В связи с этим актуальной задачей является выбор оптимальной технологии органической фотовольтаики из имеющихся альтернатив, которая обеспечила бы компромисс между техническими, экономическими и экологическими ограничениями с учетом региональных особенностей и предпочтений лиц, принимающих решения (ЛПР), в сфере обеспечения энергетической и техносферной безопасности.

В работе [17] с помощью индекса синтетической сложности (ИСС) проведена оценка некоторых органических соединений, используемых для создания активного слоя тонкопленочных СБ растворными методами. ИСС включает пять затратных составляющих (число стадий химического синтеза; выход химических реакций; количество операций; количество циклов очистки колоночной хроматографии; количество опасных химических веществ, используемых в процессе получения вещества) и определяет стоимость синтезируемого соединения. Полученные данные авторы сопоставили со значениями КПД соответствующих фотовольтаических устройств,

дополнив результаты исследования качественным сравнительным анализом их стабильности, токсичности, перерабатываемости, интегрируемости, способности менять цвет, гибкости и степени прозрачности. Для стандартизации комплексного учета ключевых характеристик органических фотоэлементов был предложен специальный параметр, прямо пропорциональный эффективности и сроку службы и обратно пропорциональный ИСС.

В работах [20, 21] представлены алгоритмы комплексного многокритериального эколого-ориентированного выбора различных технологических решений при помощи оптимизационных математических методов. В работе [6] выявлен оптимальный для эксплуатации тип тонкопленочных фотовольтаических систем второго поколения с помощью методики сравнительной оценки экологических и технико-экономических характеристик жизненных циклов фотоэлектрических энергоустановок. Оптимальное инженерное решение (ТФ с активным слоем из CdTe) было получено методами анализа иерархий и Монте-Карло с использованием средств MS Excel и VBA.

Результатирующие экологические эффекты ОСБ могут быть определены как на основе научно обоснованных региональных предпочтений, так и по общей методике анализа и оценки жизненного цикла, разработанной в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 14040, с использованием данных баз EcoInvent, представленной Swiss Centre for Life Cycle Inventories (<http://www.ecoinvent.org/>), и Europea Reference Life Cycle Data System ELCD, предоставленной JRC [22, 23].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее разработанными процессами создания активного слоя органических солнечных батарей являются растворные технологии синтеза высокомолекулярных донорно-акцепторных

органических материалов [14-18, 24-31]. Вакуумные технологии синтеза их низкомолекулярных аналогов менее исследованы несмотря на то, что имеют целый ряд преимуществ [13, 19, 32]. Вакуумное испарение не требует растворителей, что облегчает соблюдение экологических норм. ОСБ, полученные «сухими» методами, обычно демонстрируют гораздо лучшую стабильность по сравнению с фотовольтаическими устройствами на основе материалов, осажденных из раствора. Но средние значения КПД полимерных фотоэлементов в настоящий момент превышают эффективность лучших ОСБ, полученных с помощью вакуумной обработки малых молекул.

Для многофакторной сравнительной оценки тонкопленочных органических фотоэлементов между собой и с их неорганическими аналогами был использован алгоритм комплексного эколого-ориентированного выбора оптимальной фотоэлектрической энергоустановки, представленный в работе [6].

Многокритериальная оценка СБ осуществлялась методом анализа иерархий с уровнями цели, критериев и альтернативных решений по формулам [6, 20, 21]:

$$V(j) = \sum_{i=1}^N r(i) q(i, j), \quad (1)$$

$$j = 1, 2, \dots, P, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$r(i) = \frac{R(i)}{\sum_{i=1}^N R(i)}, \quad (2)$$

$$q(i, j) = \frac{Q^m(i, j)}{\sum_{j=1}^P Q^m(i, j)}, \quad (3)$$

где  $V(j)$  ( $j$  – номер энергоустановки) – итоговые весовые коэффициенты сравниваемых СБ;

$P$  – количество сравниваемых СБ;  
 $N$  – количество критериев оценки;  
 $r(i)$  – нормированный весовой коэффициент  $i$ -го критерия оценки;

$R(i)$  – ненормированный рейтинг значимости  $i$ -го критерия оценки ( $R(i) \geq 0$ );

$q(i, j)$  – нормированный показатель оценки СБ с номером  $j$  по  $i$ -у критерию;

$Q(i, j)$  – ненормированное значение показателя оценки  $j$ -ой СБ по  $i$ -у критерию ( $Q(i, j) \geq 0$  при  $m = 1$ ;  $Q(i, j) > 0$  при  $m = -1$ );

$m$  – параметр, определяющий, какое значение показателя оценки решения по критерию является самым ценным: наибольшее или наименьшее (например, для долговечности фотоэлемента  $m = 1$ , а для стоимости материала и фотоэлектрических установок на его основе  $m = -1$ ).

Оптимальной будет солнечная батарея с наибольшим значением итогового весового коэффициента  $V(j)$ .

Поиск решения был автоматизирован с помощью специальной компьютерной программы, написанной на языке программирования VBA (Visual Basic for Application) для приложения MS Excel 2010 [20].

Наилучшее решение должно способствовать снижению негативного воздействия на ОС и повышать технико-экономическую эффективность фотоэлектрической энергоустановки. При этом оно должно быть устойчивым и статистически надежным.

Оценка статистической надежности найденного инженерного решения проводилась в компьютерном эксперименте, осуществленном методом Монте-Карло [33].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Характеристики наиболее эффективных фотовольтаических органических ячеек и модулей приведены в работах [14-17, 24-32]. Результаты их анализа представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики наиболее эффективных фотовольтаических органических ячеек и модулей  
**Table 1.** Characteristics of the most efficient photovoltaic organic cells and modules

Органический материал активного слоя (донор/акцептор)	Вид устройства	Толщина активного слоя, нм	Площадь активного слоя, см <sup>2</sup>	Способ получения материала активного слоя	КПД, %
D18/Y6 (полимер, содержащий бензодитиофен, с узкозонным нефуллереновым акцептором), [14]	Однопереходная сертифицированная ячейка	103	0,03	Растворные технологии, растворитель – хлороформ, немасштабируемый метод вращающейся подложки	18,2
Pf1BT4T/ C70 PCBM, [24]	Однопереходная ячейка	400	0,06	Растворные технологии, растворитель – триметилбензол, немасштабируемый метод вращающейся подложки	11,7

Продолжение таблицы 1  
Continuation of table 1

Органический материал активного слоя (донор/акцептор)	Вид устройства	Толщина активного слоя, нм	Площадь активного слоя, см <sup>2</sup>	Способ получения материала активного слоя	КПД, %
BTID-2F/ C <sub>70</sub> PCBM, [26]	Однопереходная ячейка	130	0,04	Растворные технологии, растворитель – хлороформ, немасштабируемый метод вращающейся подложки	11,3
PTzBI-Si/ N2200, [25]	Однопереходная ячейка	130	0,04	Растворные технологии, растворитель – циклопентил-метилловый эфир, немасштабируемый метод вращающейся подложки	10,9
PBDB-T/ITIC/ C <sub>70</sub> PCBM, [15]	Однопереходный модуль на жесткой подложке	103	216	Растворные технологии, растворитель – хлорбензол, масштабируемый метод	7,7
PNTz4T/ C <sub>70</sub> PCBM, [27]	Однопереходный модуль на жесткой подложке	240	54,45	Растворные технологии, растворитель – o-ксилол, масштабируемый метод	6,6
PBDTT-EFT/ C <sub>70</sub> PCBM, [28]	Однопереходный модуль на жесткой подложке	~ 100	216	Растворные технологии, растворитель – толуол, масштабируемый метод	5,12
PTB7-Th/PPDIE, [31]	Однопереходный модуль на гибкой подложке	100	10	Растворные технологии, растворитель – хлорбензол, рулонный масштабируемый метод	7,7
SMD-2/ITIC, [29]	Однопереходный модуль на гибкой подложке	200	80	Растворные технологии, растворитель – хлорбензол, рулонный масштабируемый метод	5,25
PBTZT-stat- BDTT-8/ C <sub>60</sub> PCBM, [30]	Однопереходный модуль на гибкой подложке	100	68,7	Растворные технологии, растворитель – o-ксилол, рулонный масштабируемый метод	4,3
<b>Высокомолекулярное донорно-акцепторное соединение (ВМДАС 1), [16]</b>	Сертифицированный модуль на гибкой подложке	~ 100	802	Растворные технологии, рулонный масштабируемый метод	8,7
<b>Высокомолекулярное донорно-акцепторное соединение (ВМДАС 2), [16, 17]</b>	Сертифицированный однопереходный модуль на гибкой подложке	~ 100	26,13	Растворные технологии, рулонный масштабируемый метод	12,6
<b>Высокомолекулярное донорно-акцепторное соединение (ВМДАС 3), [16, 17]</b>	Сертифицированный однопереходный модуль на гибкой подложке	~ 100	203,98	Растворные технологии, рулонный масштабируемый метод	11,7
<b>Низкомолекулярное донорно-акцепторное соединение (НМДАС), [32]</b>	Многoperеходный модуль на гибкой подложке	~ 100	4629	Вакуумные рулонные технологии, масштабируемый метод	7,7

На рис. 4 представлены результаты расчета итогового эколого-технического рейтинга фотоэлектрических органических модулей, которые, по данным табл. 1, либо были изготовлены без использования токсичных растворителей, либо прошли сертификацию в специальных научных центрах (указанные модули в табл. 1 выделены). Исключение из дальнейшего анализа ячеек объясняется отсутствием перспектив их практического применения. Вычисления проводились по формулам (1) - (3) с помощью средств VBA и MS Excel. Информации о том, с помощью каких растворителей изготовили рассматриваемые сертифицированные модули, в

проанализированных публикациях нет. Поэтому в расчетах предполагалось, что они были получены с помощью растворных технологий, не являющихся экологически безопасными. Для сравнительного анализа были выбраны наиболее важные для стадий производства и эксплуатации критерии оценки, по каждому из которых хотя бы одна альтернатива имеет показатели, отличные от других.

Из представленных данных следует, что в настоящее время наиболее перспективными материалами активного слоя ОСБ являются низкомолекулярные органические донорно-акцепторные соединения (НМДАС), полученные с помощью вакуумных технологий: итоговый весовой

коэффициент для соответствующих им модулей, равный 0,217, оказался самым высоким среди всех рассмотренных вариантов органических ФЭП большой площади. Следует отметить, что указанный результат был получен в предположении достаточно низкого срока их службы (около 5 лет), характерного, по данным работы [17], для лучших образцов гибких ОСБ. Однако в работе [13] отмечается, что органические солнечные элементы,

полученные вакуумными способами, являются более стабильными по сравнению с их полимерными аналогами и могут в ближайшие годы достичь более чем 20-летнего срока службы при условии блокировки ультрафиолетового излучения с помощью подходящих фильтров. Большинство современных полимерных СБ теряют около 50% своей эффективности в течение первых месяцев эксплуатации [18, 34].

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">ПУСК</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">Резерв</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">Из резерва</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">очист. знач.</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px 5px;">очист. всё</div> </div>				Рейтинг:	0,108	0,125	0,141	0,138	0,135	0,136	0,217								
№	Критерии оценки	Параметр m (если лучший выбор - "минимум для абс. значения", то -1, иначе 1)	Вес критерия (от 0 до 10)	Норм. вес критерия	ОРГАНИЧЕСКИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ														
					PNTz4T/ C70 РСВМ		PBDTTT-EFT/ C70 РСВМ		PBTTT-stat-BDIT-8/ C60 РСВМ		ВМДАС 1		ВМДАС 2		ВМДАС 3		НМДАС		
					Абс. знач.	Вес. коэф.	Абс. знач.	Вес. коэф.	Абс. знач.	Вес. коэф.	Абс. знач.	Вес. коэф.	Абс. знач.	Вес. коэф.	Абс. знач.	Вес. коэф.	Абс. знач.	Вес. коэф.	
1	КПД модуля (%)	1	10	0,1389	6,6	0,1164	5,12	0,0903	4,3	0,0758	8,7	0,1534	12,6000	0,2221	11,7000	0,2063	7,7000	0,136	
2	Площадь активного слоя (см²)	1	7	0,0972	54,45	0,0091	216	0,0360	68,7	0,0114	802	0,1337	26,1300	0,0044	203,9800	0,0340	4629,0000	0,771	
3	Наличие сертификации	1	2	0,0278	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,3333	1,0000	0,3333	1,0000	0,3333	0,0000	0	
4	Толщина активного слоя (нм)	-1	7	0,0972	240	0,0649	100	0,1558	100	0,1558	100	0,1558	100,0000	0,1558	100,0000	0,1558	100,0000	0,156	
5	Отсутствие токсичных растворителей (отн. ед.)	1	10	0,1389	1	0,2500	1	0,2500	1	0,2500	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,25	
6	Гибкость подложки (отн. ед.)	1	7	0,0972	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2000	1	0,2000	1,0000	0,2000	1,0000	0,2000	1,0000	0,2	
7	Выпуск в рулонах (отн. ед.)	1	6	0,0833	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2000	1	0,2000	1,0000	0,2000	1,0000	0,2000	1,0000	0,2	
8	Простота и доступность технологии изготовления (отн. ед.)	1	6	0,0833	1	0,1538	1	0,1538	1	0,1538	1	0,1538	1,0000		0,1538	1,0000	0,1538	0,5000	0,077
9	Вес (г/м²) (плотность 1,2 г/куб. см)	-1	7	0,0972	0,288	0,0649	0,12	0,1558	0,12	0,1558	0,12	0,1558	0,1200	0,1558	0,1200	0,1558	0,1200	0,156	
10	Средний минимальный срок службы (годы)	1	10	0,1389	10	0,2222	10	0,2222	5	0,1111	5	0,1111	5,0000	0,1111	5,0000	0,1111	5,0000	0,111	

Рис. 4. Многокритериальная оценка фотоэлектрических органических модулей, проведенная методом анализа иерархий с использованием средств MS Excel и VBA

Fig. 4. Multi-criteria assessment of photovoltaic organic modules, carried out by the analytic hierarchy process using MS Excel and VBA

Многокритериальное сравнение выбранных модулей проводилось без учета их стоимости, т. к. сейчас массовое производство ОСБ только начинается, и поэтому трудно рассчитать, какова будет их рыночная цена. Однако некоторые оценочные данные уже получены: при эффективности органического модуля 15 %, сроке его службы около 20 лет он при массовом производстве может стоить 0,06 €/Вт, что примерно в 5 раз ниже стоимости современных фотовольтаических модулей первого и второго поколений [13].

По оценкам экспертов, основным фактором затрат, ответственным примерно за три четверти общей стоимости солнечных фотоэлементов, являются материалы [13]. При создании органических ТФ наиболее затратными являются процессы получения подложек, т. к. активные слои на порядки тоньше. Другими важными составляющими стоимости ОСБ являются их производительность и срок службы. Поэтому разница в стоимости между вакуумным оборудованием и оборудованием для обработки растворов, необходимым для промышленного производства, вероятнее всего, не будет ключевым фактором, определяющим различия в рыночных

ценах на органические модули, полученные «сухими» и «мокрыми» способами.

Компания Heliatek установила, что жизненный цикл ее фотоэлектрических модулей (полученных вакуумным способом) имеет одну из самых низких эмиссий CO<sub>2</sub> среди всех технологий производства электроэнергии [13]. Другая немецкая компания TÜV Rheinland провела оценку ЖЦ в соответствии с DIN EN ISO 14040:2009 и DIN EN ISO 14044:2018 и получила для солнечной инсоляции Германии углеродные выбросы менее 16 кг CO<sub>2</sub>-экв. на м<sup>2</sup> произведенного модуля ОСБ [13]. Это означает, что для Южной Европы углеродный след составляет всего 5-7 г CO<sub>2</sub>-экв. на 1 кВт-ч выработанной электроэнергии, а для центральной Европы - 7-9 г CO<sub>2</sub>-экв. на 1 кВт-ч, что значительно ниже всех коммерческих солнечных технологий, за исключением производства электроэнергии с помощью СБ на основе CdTe (2,5 – 6,5 кг CO<sub>2</sub>-экв. на м<sup>2</sup> произведенного модуля), и сопоставимо с ветровой и гидроэнергетикой [6, 13].

Результаты многофакторной сравнительной оценки наиболее перспективных фотовольтаических модулей второго и третьего поколений приведены на рис. 5 (это модули с активным слоем из теллурида кадмия и низкомолекулярного донорно-акцепторного

органического соединения, полученного методами вакуумного осаждения). Указанные устройства сравнивались по наиболее важным показателям, для которых имеются достоверные качественные или количественные сведения. Критерии, по которым

сравниваемые ТФ имеют близкие характеристики (например, удельные объемы выбросов углекислого газа, прозрачность и др.), для упрощения расчетов были исключены из рассмотрения.

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; background-color: #d9ead3;">ПУСК</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #d9ead3;">Резерв</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #d9ead3;">Из резерва</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; background-color: #d9ead3;">очист. знач.</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; background-color: #d9ead3;">очист. всё</div> </div>				Рейтинг: 0,580		0,420		
№	Критерии оценки	Параметр m (если лучший выбор - "минимум для абс. значения", то -1, иначе 1)	Вес критерия (от 0 до 10)	Норм. вес критерия	ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ			
					НМДАС (вакуумный способ)		CdTe	
					Абс. знач.	Вес. коэф.	Абс. знач.	Вес. коэф.
1	КПД модуля (%)	1	10	0,1695	7,7	0,2884	19	0,7116
2	Площадь активного слоя (см <sup>2</sup> )	1	7	0,1186	4629	0,3967	7039	0,6033
3	Срок службы (годы)	1	10	0,1695	5	0,0833	55	0,9167
4	Толщина активного слоя (нм)	-1	7	0,1186	100	0,9375	1500	0,0625
5	Экологическая безопасность (отн. ед.)	1	1	0,0169	10	0,9091	1	0,0909
6	Гибкость подложки (отн. ед.)	1	5	0,0847	1	0,6667	0,5	0,3333
7	Выпуск в рулонах (отн. ед.)	1	5	0,0847	1	0,6667	0,5	0,3333
8	Простота и доступность технологии изготовления (отн. ед.)	1	1	0,0169	2	0,6667	1	0,3333
9	Вес (г/м <sup>2</sup> )	-1	7	0,1186	0,12	0,9865	8,775	0,0135
10	Растяжимость	1	5	0,0847	1	1,0000	0	0,0000
11	Широта цветовой гаммы	1	1	0,0169	1	1	0	0

Рис. 5. Многокритериальная оценка ТФ на основе CdTe и НМДАС, проведенная методом анализа иерархий с использованием средств MS Excel и VBA

Fig. 5. Multi-criteria evaluation of thin-film photovoltaic modules based on CdTe and low-molecular-weight donor-acceptor organic compounds, carried out by the analytic hierarchy process using MS Excel and VBA

Приведенные расчеты демонстрируют незначительное превосходство органических тонкопленочных модулей над их аналогами на основе теллурида кадмия, несмотря на целенаправленное занижение в вычислениях весовых коэффициентов ряда критериев, по которым ОСБ имеют лучшие показатели.

Компьютерный эксперимент, осуществленный методом Монте-Карло, показал высокую надежность выводов о конкурентоспособности низкомолекулярных органических ТФ, полученных с помощью метода анализа иерархий (точность результатов составила около 10%).

Таким образом, уже сейчас можно считать ОСБ на основе рассмотренного НМДАС оптимальным видом тонкопленочных ФЭП при условии соблюдения технико-экономических и экологических требований, предъявляемых к энергоустановкам исследуемого типа.

## ВЫВОДЫ

Многокритериальный анализ материалов и технологий создания активного слоя ОСБ, проведенный в работе, показал, что наибольшие

перспективы в настоящий момент имеют ТФ на основе низкомолекулярных донорно-акцепторных органических соединений, полученных методом вакуумного осаждения. Несмотря на невысокие значения КПД и ограниченный срок службы такие устройства при комплексной оценке демонстрируют более высокий рейтинг по сравнению с фотовольтаическими модулями на основе теллурида кадмия, являющегося наиболее востребованным материалом активного слоя солнечных батарей второго поколения.

Вакуумные способы создания активного слоя органических солнечных батарей аналогичны хорошо разработанным технологиям вакуумного осаждения, используемым при массовом производстве OLED-дисплеев [13], что, безусловно, делает наиболее перспективные технологические процессы органической фотовольтаики более доступными.

Дальнейшее развитие исследований фотоэлементов третьего поколения предполагает проведение эколого-ориентированной многофакторной оценки перспектив использования перовскитов в тонкопленочных ФЭП и энергоустановках на их основе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цопа Н.В., Дикарев А.Е. Перспективы применения возобновляемых источников энергоснабжения для малоэтажных зданий в условиях Крыма // *Строительство и техногенная безопасность*. 2020. № 19(71). С. 85 – 92.
2. Гвоздкова И.А., Паращук Д.Ю. Солнечная энергетика: подрастающий игрок // *Химия и жизнь – XXI век*. 2007. № 3. С. 6 – 9.
3. Lizin S., Van Passel S., De Schepper E., Maes W., Lutsen L., Mancab J., Vanderzandeb D. Life cycle analyses of organic photovoltaics: a review // *Energy and Environmental Science*. 2013. V. 6. pp. 3136.
4. Xue R., Zhang J., Li Ya., Li Yo. Organic solar cell materials toward commercialization // *Small*. 2018. V. 14(41). pp. 24.
5. Photovoltaics Report. 16 September 2020. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de> (дата обращения 10.12.2020).
6. Гвоздкова Ю.Д., Гвоздкова И.А. Многокритериальная эколого-ориентированная оценка энергоустановок на основе фотоэлементов с различным материалом активного слоя // *Строительство и техногенная безопасность*. 2019. № 17(69). С. 89-101.
7. Дроздов Ф.В., Пономаренко С.А. Органические солнечные батареи – легкие, гибкие, полупрозрачные // *Природа*. 2016. № 4. С. 3-14.
8. Thin-film solar cell. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film\\_solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_solar_cell) (дата обращения 09.12.2020).
9. Tonkin B. Understand thin film solar panels before you regret it // *Sun Power Source*. 2018. URL: <https://www.sunpowersource.com/> (дата обращения 10.01.2020).
10. Liu S., Yuan J., Deng W., Luo M., Xie Y., Liang Q., Zou Y., He Z., Wu H., Cao Y. High-efficiency organic solar cells with low non-radiative recombination loss and low energetic disorder // *Nature Photonics*. 2020. V. 14. pp. 300–305.
11. Cheng P., Li G., Zhan X., Yang Y. Next-generation organic photovoltaics based on non-fullerene acceptors // *Nature Photonics*. 2018. V. 12. № 3. pp. 131-142.
12. Qu B., Forrest S.R. Continuous roll-to-roll fabrication of organic photovoltaic cells via interconnected high-vacuum and low-pressure organic vapor phase deposition systems // *Applied Physics Letters*. 2018. V. 113. 053302.
13. Riede M., Spoltore D., Leo K. Organic solar cells – the path to commercial success // *Advanced Energy Materials*. 2021. V. 11. 2002653.
14. Liu Q., Jiang Y., Jin K., Qin J., Xu J., Li W., Xiong J., Liu J., Xiao Z., Sun K., Yang S., Zhang X., Ding L. 18% Efficiency organic solar cells // *Science Bulletin*. 2020. V. 65. pp. 272–275.
15. Huang K. M., Lin C. M., Chen S. H., Li C. S., Hu C. H., Zhang Y., Meng H. F., Chang C. Y., Chao Y. C., Zan H. W., Huo L., Yu P. Nonfullerene polymer solar cell with large active area of 216 cm<sup>2</sup> and high power conversion efficiency of 7.7% // *Solar RRL*. 2019. V. 3. № 8. 1900071.
16. Green M.A., Dunlop E.D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. Solar cell efficiency tables (version 57) // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2020. pp. 1 – 13.
17. Brabec C.J., Distler A., Du X., Egelhaaf H.-J., Hauch J., Heumueller T., Li N. Material strategies to accelerate OPV technology toward a GW technology // *Advanced Energy Materials*. 2020. V. 10. 2001864.
18. Akkuratov A.V., Susarova D.K., Kozlov O.V., Chernyak A.V., Moskvina Yu.L., Frolova L.A., Pshenichnikov M.S., Troshin P.A. Design of (X-DADAD)<sub>n</sub> type copolymers for efficient bulk heterojunction organic solar cells // *Macromolecules*. 2015. V. 48(7). pp. 2013-2021.
19. Heliatek. The future is light. URL: <https://www.heliatek.com/product/> (дата обращения 08.12.2020).
20. Гвоздкова Ю.Д., Гвоздкова И.А., Курочкин А.В., Черняев А.В. Информационная система оценки экологической безопасности авиационных материалов и технологий методом анализа иерархий // *Информационные технологии*. 2019. Т. 25. №3. С. 185 – 192.
21. Гвоздкова И.А. Многокритериальная социо-эколого-экономическая оценка региональных преимуществ инновационных технологий // *Труд и социальные отношения*. 2019. № 5. С. 134-150.
22. Ратнер С.В., Закорецкая К.А. Оценка экологической эффективности конкурирующих технологий фотовольтаики // *Инновации*. 2017. № 9(227). С. 77 – 84.
23. Уланова О.В., Салхофер С.П., Вюнш К. Комплексное устойчивое управление отходами. Жилищно-коммунальное хозяйство: учебное пособие. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016.
24. Zhao J., Li Y., Yang G., Jiang K., Lin H., Ade H., Ma W., Yan Y. Efficient organic solar cells processed from hydrocarbon solvents // *Nature Energy*. 2016. V. 1. 15027.
25. Li Z., Ying L., Zhu P., Zhong W., Li N., Liu F., Huang F., Cao Y. A generic green solvent concept boosting the power conversion efficiency of all-polymer solar cells to 11% // *Energy and Environmental Science*. 2019. V. 12. № 1. pp. 157-163.
26. Deng D., Zhang Y., Zhang J., Wang Z., Zhu L., Fang J., Xia B., Wang Z., Lu K., Ma W., Wei Z. Fluorination-enabled optimal morphology leads to over 11% efficiency for inverted small-molecule organic solar cells // *Nature Communications*. 2016. V. 7. 13740.
27. Rasool S., Vu D.V., Song C.E., Lee H.K., Lee S.K., Lee J.C., Moon S.J., Shin W.S. Room temperature processed highly efficient large-area polymer solar cells achieved with molecular engineering of copolymers // *Advanced Energy Materials*. 2019. V. 9. № 21. 1900168.
28. Chen S.H., Liao C.H., Chang C.Y., Huang K.M., Chen J.Y., Chen C.H., Meng H.F., Zan H.W., Horng S.F., Lin Y.C., Yeh M.H. Large-area blade-coated

organic solar cells processed from halogen-free solvent // *Organic Electronics*. 2019. V. 75. № 105376.

29. Han Y.W., Jeon S.J., Lee H.S., Park H., Kim K.S., Lee H.W., Moon D.K. Evaporation-free nonfullerene flexible organic solar cell modules manufactured by an all-solution process // *Advanced Energy Materials*. 2019. V. 9. № 42. 1902065.

30. Lucera L., Machui F., Schmidt H.D., Ahmad T., Kubis P., Strohm S., Hepp J., Vetter A., Egelhaaf H.J., Brabec C.J. Printed semi-transparent large area organic photovoltaic modules with power conversion efficiencies of close to 5 % // *Organic Electronics*. 2017. V. 45. C. 209-214.

31. Gu X., Zhou Y., Gu K., Kurosawa T., Guo Y., Li Y., Lin H., Schroeder B.C., Yan H., Molina-Lopez F., Tassone C.J., Wang C., Mannsfeld S.C.B., Yan H., Zhao D., Toney M.F., Bao Z. Roll-to-roll printed large-area all-polymer solar cells with 5% efficiency based on a low crystallinity conjugated polymer blend // *Advanced Energy Materials*. 2017. V. 7. № 14. 1602742.

32. Uhrich C., Weiß A., Pfeiffer M. Roll-to-roll production of organic solar cells // *SPIE*. 2017. V. 10363.

33. Гвоздкова И.А., Курочкин А.В. Оценка надежности компьютерно-математических моделей оптимизации кадровых решений статистическими методами // *Труд и социальные отношения*. 2019. № 2. С. 93 – 109.

34. Sherafatipour G., Benduhn J., Patil B.R., Ahmadpour M., Spoltore D., Rubahn H.-G., Vandewal K., Madsen M. Degradation pathways in standard and inverted DBP-C70 based organic solar cells // *Scientific Reports*. 2019 V. 9. № 1. 4024.

## REFERENCES

1. Tsopa N.V., Dikarev A.E. Prospects for renewable energy for low-rise buildings in Crimea // *Construction and industrial safety*. 2020. N 19(71). pp. 85 – 92. (In Russian)

2. Gvozdkova I.A., Parashchuk D.Yu. Solnechnaya energetika: podrastayushchiy igrok [Solar energy: a growing player] // *Khimiya i zhizn – XXI vek*. 2007. N. 3. pp. 6 – 9. (In Russian)

3. Lizin S., Van Passel S., De Schepper E., Maes W., Lutsen L., Mancab J., Vanderzandeb D. Life cycle analyses of organic photovoltaics: a review // *Energy and Environmental Science*. 2013. V. 6. pp. 3136.

4. Xue R., Zhang J., Li Ya., Li Yo. Organic Solar Cell Materials toward Commercialization // *Small*. 2018. V. 14(41). pp. 24.

5. Photovoltaics Report. 16 September 2020. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de> (date of access 10.12.2020)

6. Gvozdkova I.A., Gvozdkova J.D. Multi-criteria environmental-oriented assessment of power plants based on solar cells with different active layer material // *Construction and industrial safety*. 2019. N 17(69). pp. 89 – 101. (In Russian)

7. Drozdov F.V., Ponomarenko S.A. Organic solar cells – lightweight, flexible, semitransparent // *Priroda*. 2016. N 4. pp. 3-14. (In Russian)

8. Thin-film solar cell. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film\\_solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_solar_cell) (date of access 09.12.2020)

9. Tonkin B. Understand thin film solar panels before you regret it // *Sun Power Source*. 2018. URL: <https://www.sunpowersource.com/> (date of access 10.01.2020).

10. Liu S., Yuan J., Deng W., Luo M., Xie Y., Liang Q., Zou Y., He Z., Wu H., Cao Y. High-efficiency organic solar cells with low non-radiative recombination loss and low energetic disorder // *Nature Photonics*. 2020. V. 14. pp. 300–305.

11. Cheng P., Li G., Zhan X., Yang Y. Next-generation organic photovoltaics based on non-fullerene acceptors // *Nature Photonics*. 2018. V. 12. N 3. pp. 131-142.

12. Qu B., Forrest S.R. Continuous roll-to-roll fabrication of organic photovoltaic cells via interconnected high-vacuum and low-pressure organic vapor phase deposition systems // *Applied Physics Letters*. 2018. V. 113. 053302.

13. Riede M., Spoltore D., Leo K. Organic solar cells – the path to commercial success // *Advanced Energy Materials*. 2021. V. 11. 2002653.

14. Liu Q., Jiang Y., Jin K., Qin J., Xu J., Li W., Xiong J., Liu J., Xiao Z., Sun K., Yang S., Zhang X., Ding L. 18% Efficiency organic solar cells // *Science Bulletin*. 2020. V. 65. pp. 272–275.

15. Huang K.M., Lin C.M., Chen S.H., Li C.S., Hu C.H., Zhang Y., Meng H.F., Chang C.Y., Chao Y.C., Zan H.W., Huo L., Yu P. Nonfullerene polymer solar cell with large active area of 216 cm<sup>2</sup> and high power conversion efficiency of 7.7% // *Solar RRL*. 2019. V. 3. N 8. 1900071.

16. Green M.A., Dunlop E.D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. Solar cell efficiency tables (version 57) // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2020. pp. 1 – 13.

17. Brabec C.J., Distler A., Du X., Egelhaaf H.-J., Hauch J., Heumueller T., Li N. Material strategies to accelerate OPV technology toward a GW technology // *Advanced Energy Materials*. 2020. V. 10. 2001864.

18. Akkuratov A.V., Susarova D.K., Kozlov O.V., Chernyak A.V., Moskvina Yu.L., Frolova L.A., Pshenichnikov M.S., Troshin P.A. Design of (X-DADAD)<sub>n</sub> type copolymers for efficient bulk heterojunction organic solar cells // *Macromolecules*. 2015. V. 48(7). pp. 2013-2021.

19. Heliatek. The future is light. URL: <https://www.heliatek.com/product/> (date of access 08.12.2020)

20. Gvozdkova J.D., Gvozdkova I.A., Kurochkin A.V., Chernyaev A.V. Information system of environmental safety assessment of aviation materials and technologies by the analytic hierarchy process // *Information Technologies*. 2019. V. 25. N 3. pp. 185-192. (In Russian)

21. Gvozdkova I.A. Multi-criteria social, environmental and economic assessment of regional advantages of innovative technologies // *Labour and social relations*. 2019. N 5. pp. 134 – 150. (In Russian)

22. Ratner S.V., Zakoretskaya K.A. Assessment of ecological effectiveness of competing photovoltaic technologies // *Innovations*. 2017. N 9(227). pp. 77 – 84. (In Russian)
23. Ulanova O.V., Salhofer S.P., Vyunsh K. Integrated sustainable waste management. Housing and communal services: textbook. - M.: Publishing House of the Academy of Natural Sciences, 2016. (In Russian)
24. Zhao J., Li Y., Yang G., Jiang K., Lin H., Ade H., Ma W., Yan Y. Efficient organic solar cells processed from hydrocarbon solvents // *Nature Energy*. 2016. V. 1. 15027.
25. Li Z., Ying L., Zhu P., Zhong W., Li N., Liu F., Huang F., Cao Y. A generic green solvent concept boosting the power conversion efficiency of all-polymer solar cells to 11% // *Energy & Environmental Science*. 2019. V. 12. N 1. pp. 157-163.
26. Deng D., Zhang Y., Zhang J., Wang Z., Zhu L., Fang J., Xia B., Wang Z., Lu K., Ma W., Wei Z. Fluorination-enabled optimal morphology leads to over 11% efficiency for inverted small-molecule organic solar cells // *Nature Communications*. 2016. V. 7. 13740.
27. Rasool S., Vu D.V., Song C.E., Lee H.K., Lee S.K., Lee J.C., Moon S.J., Shin W.S. Room temperature processed highly efficient large-area polymer solar cells achieved with molecular engineering of copolymers // *Advanced Energy Materials*. 2019. V. 9. N 21. 1900168.
28. Chen S.H., Liao C.H., Chang C.Y., Huang K.M., Chen J.Y., Chen C.H., Meng H.F., Zan H.W., Horng S.F., Lin Y.C., Yeh M.H. Large-area blade-coated organic solar cells processed from halogen-free solvent // *Organic Electronics*. 2019. V. 75. N 105376.
29. Han Y.W., Jeon S.J., Lee H.S., Park H., Kim K.S., Lee H.W., Moon D.K. Evaporation-free nonfullerene flexible organic solar cell modules manufactured by an all-solution process // *Advanced Energy Materials*. 2019. V. 9. N 42. 1902065.
30. Lucera L., Machui F., Schmidt H.D., Ahmad T., Kubis P., Strohm S., Hepp J., Vetter A., Egelhaaf H.J., Brabec C.J. Printed semi-transparent large area organic photovoltaic modules with power conversion efficiencies of close to 5 % // *Organic Electronics*. 2017. V.45. pp. 209-214.
31. Gu X., Zhou Y., Gu K., Kurosawa T., Guo Y., Li Y., Lin H., Schroeder B.C., Yan H., Molina-Lopez F., Tassone C.J., Wang C., Mannsfeld S.C.B., Yan H., Zhao D., Toney M.F., Bao Z. Roll-to-roll printed large-area all-polymer solar cells with 5% efficiency based on a low crystallinity conjugated polymer blend // *Advanced Energy Materials*. 2017. V. 7. N 14. 1602742.
32. Uhrich C., Weiß A., Pfeiffer M. Roll-to-roll production of organic solar cells // *SPIE*. 2017. V. 10363.
33. Gvozdkova I.A. Kurochkin A.V. The reliability evaluation of computer<sup>^</sup>mathematical models of optimization of personnel solutions by statistical methods // *Labour and social relations*. 2019. N 2. pp. 93 – 109. (In Russian)
34. Sherafatipour G., Benduhn J., Patil B.R., Ahmadpour M., Spoltore D., Rubahn H.-G., Vandewal K., Madsen M. Degradation pathways in standard and inverted DBP-C70 based organic solar cells // *Scientific Reports*. 2019 V. 9. N 1. 4024.

## ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR THE USE OF ORGANIC MATERIALS IN SOLAR POWER PLANTS

Gvozdkova J. D.<sup>1</sup>, Gvozdkova I. A.<sup>2,3</sup>, Gorbachev S. I.<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> MOSCOW AVIATION INSTITUTE (National Research University), Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4,  
<sup>1</sup> gina94@yandex.ru, <sup>3</sup> gor-sergey1@yandex.ru

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art)", Russia, 117997, Moscow, st. Sadovnicheskaya, 33, building 1, gvozdkova@yandex.ru

**Summary:** The article analyzes the problems, achievements, prospects and rates of development of thin-film photovoltaics based on the use of various organic compounds. The necessity of multi-criteria comparative analysis of these solar energy advanced technologies and materials is justified to ensure a compromise between the technical and economic efficiency of their design, implementation, use and the environment-oriented issues. The results of studies of the life cycles of photovoltaic devices with an active layer based on high-molecular and low-molecular donor-acceptor organic compounds obtained using solution and vacuum technologies are summarized. The technical, operational and environmental criteria for evaluating the advantages and disadvantages of thin-film organic solar cells and modules at various stages of their life cycle are systematized. Recommendations are given for optimizing the environmental-oriented selection of organic solar cells, taking into account the specifics of their purpose, operating conditions and regional preferences in the field of energy, environmental and technological security. The application of analytic hierarchy process and Monte Carlo method for the implementation of statistically reliable multivariate selection of organic photovoltaic devices and power plants based on them, taking into account environmental and other constraints, is considered. The ecological and technical ratings of the most promising photovoltaic systems of this type are calculated and their optimal type is identified, which can compete with photovoltaic cells on inorganic thin films. Computer experiments were carried out to compare the complex competitiveness of the best organic solar modules with their thin-film analogues based on cadmium telluride. The perspective directions of development of the used optimization approach in the field of photovoltaic segment of solar energy are formulated.

**Subject of research:** technical, economic and environmental characteristics of photovoltaic modules with an active layer of organic materials at various stages of the life cycle

**Materials and methods:** organic materials of the active layer of solar cells and modules based on them, analytic hierarchy process, Monte Carlo method, methods of mathematical statistics, computer modeling using MS Excel and VBA tools

**Results:** the optimal type of organic solar modules that meets the environmental and technical requirements and limitations and the corresponding technology for producing its active layer are identified; a statistically based comprehensive comparative assessment of the best organic solar panels and thin-film solar modules with an active layer based on cadmium telluride is carried out

**Conclusions:** the complex competitiveness of thin-film solar modules based on low-molecular-weight donor-acceptor organic compounds obtained using vacuum technologies is proved

**Key words:** photovoltaic power plants, thin-film solar cells, organic materials of the active layer, multi-criteria environmental-oriented assessment, analytic hierarchy process, Monte Carlo method.