

УДК 621.311.243 + 06

Исследование влияния температуры и освещенности поверхности солнечных фотоэлементов на их энергоэффективность

Т. Л. Риполь-Сарагоси¹, И. С. Дурнев², И. Ю. Новосельский³

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

²ООО «ЭЛСИКО», Российская Федерация, 344000, Ростов-на-Дону, Кировский пр., зд. 132/2, оф. 9

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Риполь-Сарагоси Т. Л., Дурнев И. С., Новосельский И. Ю. Исследование влияния температуры и освещенности поверхности солнечных фотоэлементов на их энергоэффективность // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 802–810. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-802-810

Аннотация

Цель: Представить результаты исследований, посвященных анализу влияния температуры и освещенности на эффективность солнечных фотоэлементов, изготовленных из различных видов материалов. Провести сравнение характеристик кремниевых и тонкопленочных фотоэлектрических материалов. Выявить наиболее устойчивые к внешним воздействиям материалы изготовления фотоэлектрических элементов для решения вопроса о целесообразности их применения в различных климатических условиях. **Методика:** Для определения энергоэффективности солнечных фотоэлементов, изготовленных из различных кремниевых и тонкопленочных материалов, опробована методика расчета вольтамперных характеристик (ВАХ) и степень влияния на них температуры поверхности солнечного элемента (СЭ) и величины ее освещенности, а также величин последовательного (R_s) и параллельного (R_{sh}) сопротивлений, связанных с потерями и утечками токов. **Методы:** Использованы методы сравнения и анализа полученных результатов, а также их графической визуализации, которые легли в основу формирования выводов и рекомендаций, а также обоснования выбора материалов изготовления солнечных фотоэлементов на основе показателя «энергоэффективность». **Практическая значимость:** Результаты представленных исследований позволяют обоснованно осуществлять выбор материалов фотоэлектрических элементов при использовании нетрадиционной солнечной энергии взамен традиционной при электрообеспечении обособленных объектов, в том числе и предприятий железнодорожной отрасли, что позволяет реализовать принцип энергоресурсосбережения на любом объекте внедрения полученных результатов.

Ключевые слова: Энергоэффективность, солнечные элементы, фотоэлектрические материалы, температурная стабильность, освещенность, коэффициент полезного действия.

Солнечная энергетика занимает ключевое место в структуре возобновляемых источников энергии, что обусловлено ее экологической безопасностью и неисчерпаемым потенциалом. В условиях глобального перехода к низкоуглеродной экономике повышение эффективности

фотоэлектрических преобразователей становится одной из приоритетных задач [1]. Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р, развитие возобновляемой энергетики

направлено на диверсификацию энергобаланса и снижение зависимости от традиционных источников. Следующим нормативным документом, обосновывающим актуальность выбранной темы исследования, является Стратегия развития ОАО «РЖД» до 2030 года. В документе определены ключевые задачи по сохранению лидирующих позиций компании в мире. К ним относятся:

- обеспечение энергоэффективности;
- обеспечение безопасности при использовании инновационных технологий и решений;
- внедрение технологий замещения традиционных источников энергии на альтернативные.

Энергоэффективность фотоэлектрических систем в значительной степени зависит от внешних факторов, таких как температура и освещенность. Эти параметры варьируются в зависимости от географического расположения, времени года и погодных условий, что требует детального изучения поведения различных типов солнечных элементов (СЭ) в широком диапазоне эксплуатационных режимов [2–4]. Целью данного исследования является анализ влияния температуры и освещенности на энергоэффективность солнечных элементов, изготовленных на основе различных материалов.

В качестве объектов исследования были выбраны четыре типа солнечных элементов: монокристаллический кремний (mono-Si), поликристаллический кремний (multi-Si), селенид меди-индия (CuInSe₂) и селенид меди-индия-галлия (CIGS). Основные параметры этих материалов, измеренные при стандартных условиях (освещенность 1000 Вт/м², температура 25 °С) [5–8], представлены в табл. 1. Данные соответствуют техническим характеристикам, заявленным производителями и представленным в журналах NREL, Solar Energy Materials & Solar Cells.

Для определения наименее и наиболее энергоэффективных видов солнечных элементов, представленных в табл. 1, проведем расчеты их

Таблица 1. Основные параметры солнечных элементов

№		mono-Si	multi-Si	CuInSe ₂	CIGS
1	$S, \text{см}^2$	243,4			
2	$U_{oc_ref}, \text{В}$	0,630	0,670	0,880	0,805
3	$I_{sc_ref}, \text{А}$	9,800	9,200	7,600	8,000
4	$I_{s_ref}, \text{А}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$
5	$\eta, \%$	21,20	21,00	22,80	21,90
6	ff	0,837	0,828	0,831	0,829
7	$\alpha_I, \%/^{\circ}\text{C}$	+0,05	+0,05	+0,07	+0,05
8	$\beta_V, \text{В}/^{\circ}\text{C}$	–0,003	–0,003	–0,003	–0,0028
9	$P_{\max}, \text{Вт}$	5,345	5,103	5,555	5,339
10	$E_g, \text{эВ}$	1,12	1,10	1,04	1,15
11	n	1,0	1,1	1,4	1,3

Обозначения: S — площадь солнечного элемента; U_{oc_ref} — напряжение холостого хода СЭ при стандартных условиях; I_{sc_ref} — ток короткого замыкания СЭ при стандартных условиях; I_{s_ref} — обратный ток насыщения СЭ при стандартных условиях; η — коэффициент полезного действия (КПД) солнечного элемента; ff — коэффициент заполнения вольтамперной характеристики (ВАХ); α_I — температурный коэффициент тока; β_V — температурный коэффициент напряжения; $P_{\max}$ — максимальная выходная мощность СЭ; E_g — ширина запрещенной зоны; n — диодный коэффициент.

основных электрических параметров при варьировании температуры и освещенности. Диапазон рабочей температуры солнечного элемента составил от 15 до 100 °С при фиксированной освещенности 1000 Вт/м², что соответствует паспортному диапазону изменения температуры окружающей среды от –80 до +45 °С, при этом он охватывает реальные условия эксплуатации в различных климатических зонах. Анализ влияния освещенности проводился в интервале от 200 до 1200 Вт/м² при стандартной температуре 25 °С, включая режим низкой инсоляции и экстремальной солнечной активности. Методика проведения экспериментов соответствует требованиям ГОСТ Р 56983—2016

Таблица 2. Параметры моно-Si СЭ при изменении освещенности и температуры

Значения внешних факторов	Параметры СЭ					
	U_{oc} , В	I_{ph} , А	I_s , А	P_{max} , Вт	ff	η , %
Изменение температуры при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$						
15 °С	0,670	9,751	$1,99 \cdot 10^{-11}$	5,513	0,440	22,70
25 °С	0,630	9,800	$1,00 \cdot 10^{-10}$	5,345	0,837	21,20
50 °С	0,605	9,923	$3,70 \cdot 10^{-9}$	4,916	0,819	20,20
75 °С	0,560	10,045	$8,29 \cdot 10^{-8}$	4,480	0,796	18,40
100 °С	0,510	10,168	$1,24 \cdot 10^{-6}$	4,034	0,778	16,60
Изменение освещенности при $T = 25 \text{ °С}$						
200 Вт/м ²	0,590	1,960	$1,00 \cdot 10^{-10}$	0,958	0,828	19,70
400 Вт/м ²	0,610	3,920		1,981	0,828	20,30
600 Вт/м ²	0,620	5,880		3,028	0,831	20,70
800 Вт/м ²	0,625	7,840		4,091	0,835	21,00
1000 Вт/м ²	0,630	9,800		5,345	0,837	21,20
1200 Вт/м ²	0,635	11,760		6,250	0,837	21,40

Таблица 3. Параметры multi-Si СЭ при изменении освещенности и температуры

Значения внешних факторов	Параметры СЭ					
	U_{oc} , В	I_{ph} , А	I_s , А	P_{max} , Вт	ff	η , %
Изменение температуры при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$						
15 °С	0,685	9,154	$1,17 \cdot 10^{-10}$	5,254	0,838	21,60
25 °С	0,670	9,200	$5,00 \cdot 10^{-10}$	5,103	0,828	21,00
50 °С	0,625	9,315	$1,29 \cdot 10^{-8}$	4,722	0,811	19,40
75 °С	0,580	9,430	$2,12 \cdot 10^{-7}$	4,333	0,792	17,80
100 °С	0,540	9,545	$2,43 \cdot 10^{-6}$	3,936	0,506	16,20
Изменение освещенности при $T = 25 \text{ °С}$						
200 Вт/м ²	0,625	1,840	$5,00 \cdot 10^{-10}$	0,941	0,818	19,30
400 Вт/м ²	0,645	3,680		1,950	0,822	20,00
600 Вт/м ²	0,655	5,520		2,986	0,826	20,40
800 Вт/м ²	0,665	7,360		4,038	0,825	20,70
1000 Вт/м ²	0,670	9,200		5,103	0,828	21,00
1200 Вт/м ²	0,675	11,040		6,178	0,829	25,40

и ГОСТ Р МЭК 60904-3—2013 [9, 10], регламентирующих способы испытания фотоэлектрических модулей.

Результаты исследований для каждого материала представлены в табл. 2–5.

Анализ результатов проведенных расчетов [8] был визуализирован в виде вольтамперных характеристик (ВАХ), представленных на рис. 1.

Проведенный сравнительный анализ четырех типов солнечных элементов выявил существен-

ную зависимость их энергоэффективности от температурных условий и уровня освещенности. Наибольшее влияние на рабочие параметры солнечных фотоэлементов оказывает повышение температуры, приводящее к значительной деградации характеристик всех исследуемых материалов.

Среди рассматриваемых фотоэлектрических преобразователей наименее устойчивым к температурным воздействиям оказался поликристал-

Таблица 4. Параметры CuInSe₂ СЭ при изменении освещенности и температуры

Значения внешних факторов	Параметры СЭ					
	U_{oc} , В	I_{ph} , А	I_s , А	P_{max} , Вт	ff	η , %
Изменение температуры при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$						
15°C	0,890	7,547	$6,63 \cdot 10^{-11}$	5,607	0,835	23,00
25°C	0,880	7,600	$2,00 \cdot 10^{-10}$	5,555	0,831	22,80
50°C	0,855	7,733	$2,38 \cdot 10^{-9}$	5,419	0,820	22,30
75°C	0,835	7,866	$2,02 \cdot 10^{-8}$	5,275	0,803	21,70
100°C	0,810	8,000	$1,30 \cdot 10^{-7}$	5,122	0,791	21,00
Изменение освещенности при $T = 25 \text{ °C}$						
200 Вт/м ²	0,820	1,520	$2,00 \cdot 10^{-12}$	1,027	0,824	21,10
400 Вт/м ²	0,845	3,040		2,126	0,828	21,80
600 Вт/м ²	0,860	4,560		3,253	0,829	22,30
800 Вт/м ²	0,870	6,080		4,397	0,831	22,60
1000 Вт/м ²	0,880	7,600		5,555	0,831	22,80
1200 Вт/м ²	0,885	9,120		6,723	0,833	27,60

Таблица 5. Параметры CIGS СЭ при изменении освещенности и температуры

Значения внешних факторов	Параметры СЭ					
	U_{oc} , В	I_{ph} , А	I_s , А	P_{max} , Вт	ff	η , %
Изменение температуры при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$						
15 °C	0,820	7,960	$8,21 \cdot 10^{-11}$	5,452	0,835	22,40
25 °C	0,805	8,000	$3,00 \cdot 10^{-10}$	5,339	0,829	21,90
50 °C	0,765	8,100	$5,47 \cdot 10^{-9}$	5,052	0,815	20,80
75 °C	0,730	8,200	$6,68 \cdot 10^{-8}$	4,757	0,795	19,50
100 °C	0,690	8,300	$5,92 \cdot 10^{-7}$	4,456	0,778	18,30
Изменение освещенности при $T = 25 \text{ °C}$						
200 Вт/м ²	0,750	1,600	$3,00 \cdot 10^{-10}$	0,986	0,821	20,20
400 Вт/м ²	0,775	3,200		2,042	0,824	21,00
600 Вт/м ²	0,785	4,800		3,125	0,829	21,40
800 Вт/м ²	0,795	6,400		4,226	0,830	21,70
1000 Вт/м ²	0,805	8,000		4,339	0,829	21,90
1200 Вт/м ²	0,810	9,600		6,463	0,831	26,60

лический кремний (multi-Si), демонстрирующий снижение максимальной мощности на 25,1 % при нагреве от 15 до 100 °C. Напротив, солнечные элементы на основе селенида меди-индия (CuInSe₂) показали наилучшие результаты, сохранив 91,4 % исходной мощности в тех же условиях. Разница в энергоэффективности между этими матери-

алами при экстремальном нагреве составила 23,5 %, что свидетельствует о существенном преимуществе тонкопленочной технологии в высокотемпературных режимах эксплуатации.

Анализ зависимости исследуемых параметров от уровня освещенности выявил иную картину. При изменении интенсивности солнечного излу-

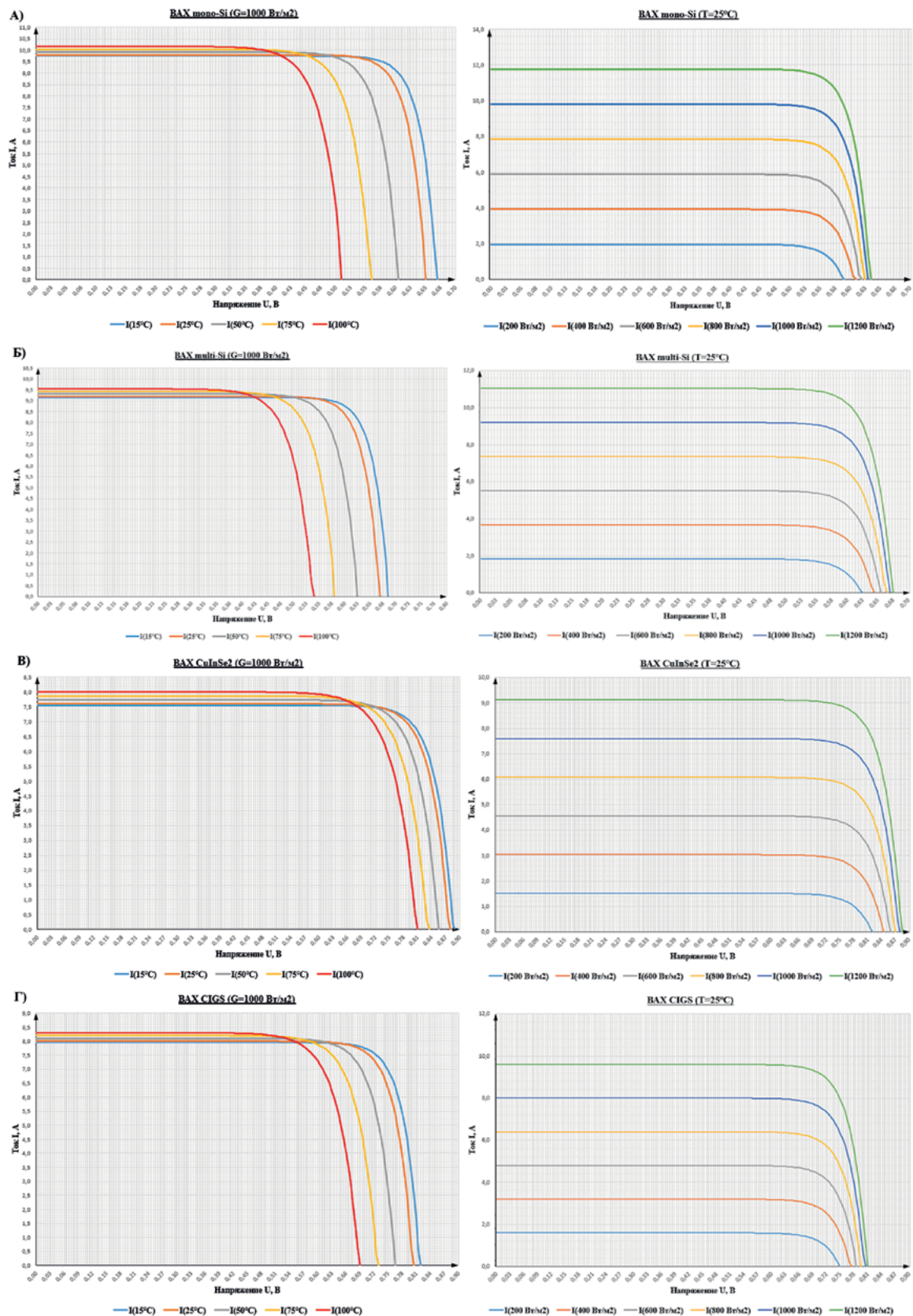


Рис. 1. BAX солнечных элементов на основе различных материалов при варьировании температуры и освещенности: a — mono-Si; b — multi-Si

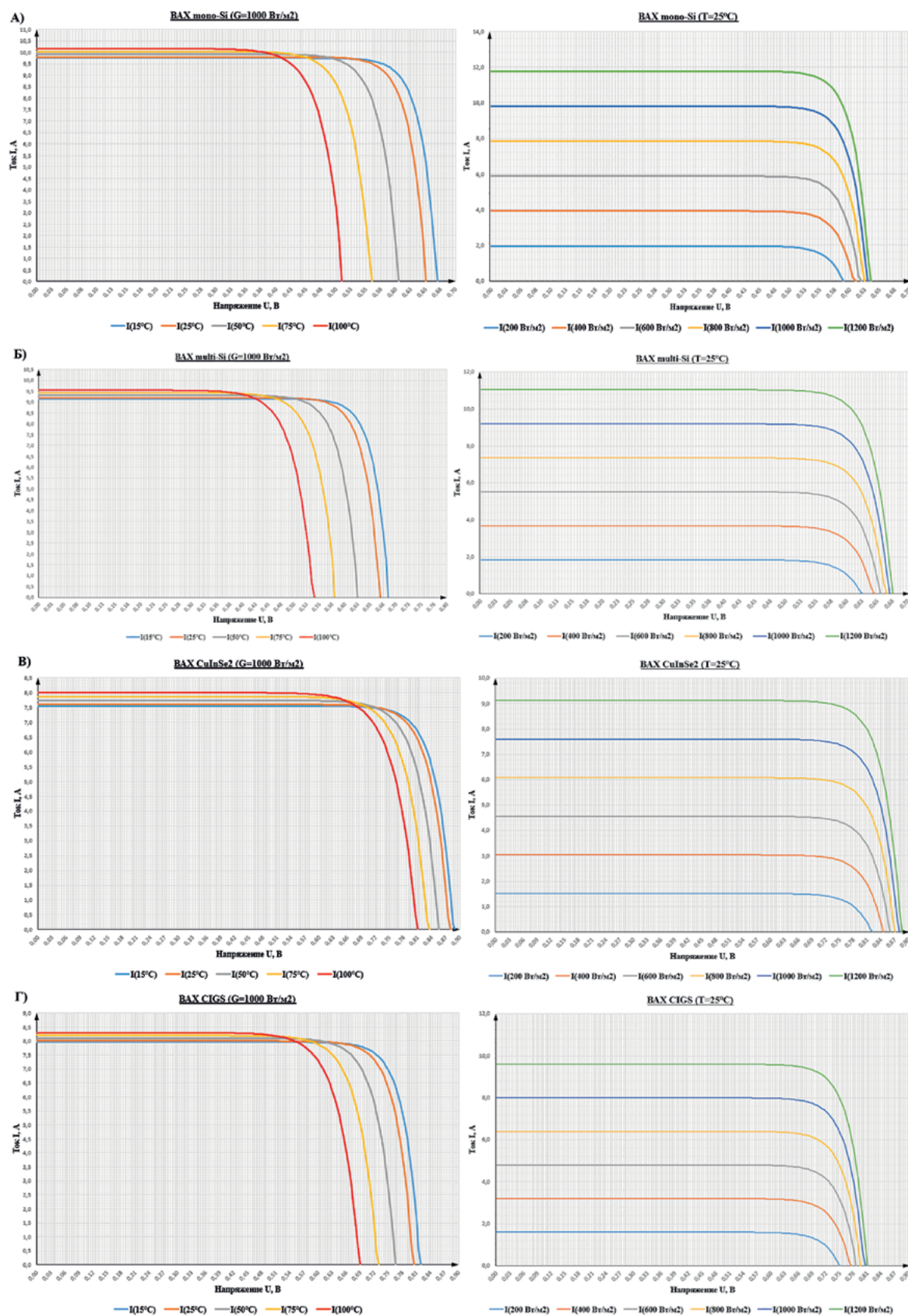


Рис. 2. ВАХ солнечных элементов на основе различных материалов при варьировании температуры и освещенности: ν — CuInSe_2 ; ε — CIGS

чения от 200 до 1200 Вт/м² разница в коэффициенте полезного действия между наименее и наиболее эффективными материалами сократилась до 6,3%. Однако даже в этих условиях CuInSe₂ сохранил лидерство, достигнув значения КПД 27,6% при максимальной освещенности, тогда как multi-Si показал результат 25,4%.

Также для оценки эффекта, связанного с энергоресурсосбережением, проведен расчет снижения расхода условного топлива при замене традиционных источников энергии на нетрадиционные — солнечные элементы. При стандартных условиях эксплуатации (освещенность 1000 Вт/м², температура 25 °С) наиболее эффективный материал — селенид меди-индия (CuInSe₂) с КПД 22,8% обеспечивает годовую выработку около 250 кВт · ч с 1 м² поверхности в средней полосе России. Такой показатель эквивалентен экономии 0,075 т у. т. на каждый квадратный метр фотоэлектрических модулей в год. Для менее эффективного поликристаллического кремния (multi-Si) с КПД 21,0% экономия составляет 0,069 т у. т./м² год. Разница в 0,006 т у. т. на квадратный метр между наиболее и наименее эффективными материалами приобретает значительные масштабы при промышленном внедрении технологий. Для солнечной электростанции мощностью 1 МВт (площадь около 6000 м²) ежегодная экономия при использовании CuInSe₂ вместо multi-Si достигает 36 т у. т.

Долгосрочный энергетический эффект становится еще более выраженным при расчете на 25-летний срок службы фотоэлектрических систем. Совокупная экономия топлива для станции мощностью 1 МВт при использовании CuInSe₂ вместо multi-Si может превысить 2000 т у. т. за весь период эксплуатации. Эти данные подтверждают целесообразность внедрения высокоэффективных тонкопленочных технологий, несмотря на их более высокую первоначальную стоимость.

Выводы

Проведенные исследования позволяют заключить, что ключевым фактором, определяющим энергоэффективность солнечных элементов, является температурная стабильность фотоэлектрических материалов. Наибольшая деградация характеристик наблюдается при повышении рабочей температуры свыше 50 °С, что особенно критично для кремниевых фотоэлементов. Среди рассмотренных материалов селенид меди-индия (CuInSe₂) продемонстрировал наилучшие эксплуатационные показатели.

Полученные результаты указывают на необходимость проведения дальнейших исследований в области повышения термостойкости фотоэлектрических преобразователей, особенно для регионов с жарким климатом. Перспективным направлением представляется изучение гибридных материалов, сочетающих преимущества тонкопленочных технологий с улучшенными температурными характеристиками. Особый интерес представляет анализ долговременной стабильности параметров солнечных элементов при циклических температурных нагрузках, характерных для реальных условий эксплуатации.

Список источников

1. Горбунова М. М. К вопросу перспектив применения возобновляемых источников энергии и технологий альтернативной энергетики / М. М. Горбунова, В. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2022. — № 4(61). — С. 35–40.
2. Ильичева Ю. А. Возобновляемые источники энергии в мире и в России: учебное пособие / Ю. А. Ильичева, С. З. Жизнин, М. В. Дакалов. — М.: МГИМО-Университет, 2019. — 209 с.
3. Гременок В. Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В. Ф. Гременок, М. С. Тиванов, В. Б. Залесский. — Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. — 222 с.

4. Алферов Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. — 2004. — Т. 38. — № 8. — С. 937–948.
 5. Torchynska T. V. III-V material solar cells for space application / T. V. Torchynska, G. P. Polupan // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2002. — Vol. 5. — Iss. 1. — Pp. 63–70.
 6. Воронков Э. Н. Токовая неустойчивость в солнечных элементах на основе a-Si:H, возникающая после их засветки / Э. Н. Воронков // Физика и техника полупроводников. — 2001. — Т. 25. — № 6. — С. 703–706.
 7. Косяченко Л. А. Проблемы эффективности фотоэлектрического преобразования в тонкопленочных солнечных элементах CdS/CdTe / Л. А. Косяченко // Физика и техника полупроводников. — 2006. — Т. 40. — № 6. — С. 730–746.
 8. Юрченко А. В. Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов / А. В. Юрченко, А. В. Волгин, А. В. Козлов // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 314. — № 4. — С. 142–148.
 9. ГОСТ Р 56983—2016 (МЭК 62108:2007). Устройства фотоэлектрические с концентраторами. Методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2016. — 45 с.
 10. ГОСТ Р МЭК 60904-3—2013. Приборы фотоэлектрические. Часть 3: Принципы измерения характеристик фотоэлектрических приборов с учетом стандартной спектральной плотности энергетической освещенности наземного солнечного излучения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 89 с.
- Дата поступления: 08.07.2025
Решение о публикации: 11.08.2025
- Контактная информация:**
РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — д-р техн. наук, проф.; ripol-saragosi@mail.ru
ДУРНЕВ Иван Сергеевич — инженер; durnev.iv@mail.ru
НОВОСЕЛЬСКИЙ Игорь Юрьевич — канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

The Impact of the Surface Temperature and Light Intensity on the Performance of Photovoltaic Cells

T. L. Ripol-Saragosi¹, I. S. Durnev², I. Yu. Novoselsky³

¹Rostov State Transport University, 2, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

²LLC "ELSICO", 132/2, of. 9, Kirovsky pr., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

³Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Ripol-Saragosi T. L., Durnev I. S., Novoselsky I. Yu. The Impact of the Surface Temperature and Light Intensity on the Performance of Photovoltaic Cells // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 802–810. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-802-810

Summary

Purpose: To present the research results describing the impact of temperature and sunlight intensity on the efficiency of solar photovoltaic cells of various types. To compare the characteristics of silicon and thin-film photovoltaic materials and to identify the most resistant materials for the photovoltaic cells. To analyse their feasibility in various climatic conditions. To assess the energy efficiency of solar photovoltaics made of silicon and thin-film materials of different types. A new method has been tested for the calculation of

voltage characteristics (WAC), the level of influence of solar element surface temperature (SE) and the sunlight intensity, as well as the values of serial (R_s) and parallel (R_{sh}) resistances associated with losses and leakage of currents. **Methods:** Methods of comparative analysis and graphical visualization were used. They helped to make conclusions and recommendations, as well as justify the choice of materials for manufacturing solar cells based on the “energy efficiency” indicator. **Practical significance:** The results of the presented studies make it possible to select photovoltaic cell materials when using unconventional solar energy instead of traditional when providing electrical power to certain facilities including railway facilities, which makes it possible to implement the principle of energy conservation at any facility for the implementation of the results obtained.

Keywords: Energy efficiency, solar cells, photovoltaic materials, temperature stability, sunlight, efficiency.

References

1. Gorbunova M. M., Finochenko V. A. K voprosu perspektiv primeneniya vozobnovlyаемых istochnikov energii i tekhnologii al'ternativnoy energetiki [On the issue of prospects for the use of renewable energy sources and alternative energy technologies]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University]. 2022, Iss. 4(61), pp. 35–40. (In Russian)
2. Il'icheva Yu. A., Zhiznin S. Z., Dakalov M. V. *Vozobnovlyаемые istochniki energii v mire i v Rossii: uchebnoe posobie* [Renewable energy sources in the world and in Russia: textbook]. Moscow: MGIMO-University Publ., 2019. 209 p. (In Russian)
3. Gremenok V. F., Tivanov M. S., Zaleskiy V. B. *Solnechnye elementy na osnove poluprovodnikovykh materialov* [Solar cells based on semiconductor materials]. Minsk: Publishing Center of BSU, 2007. 222 p. (In Russian)
4. Alferov Zh. I., Andreev V. M., Rumyantsev V. D. Tendentsii i perspektivy razvitiya solnechnoy fotogeneratsii [Trends and prospects for the development of solar photovoltaics]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors]. 2004, vol. 38, Iss. 8, pp. 937–948. (In Russian)
5. Torchynska T. V., Polupan G. P. III-V material solar cells for space application. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2002, vol. 5, Iss. 1, pp. 63–70.
6. Voronkov E. N. Tokovaya neustoychivost' v solnechnykh elementakh na osnove a-Si:H, vznikayushchaya posle ikh zasvetki [Current instability in a-Si:H solar cells arising after their illumination]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors]. 2001, vol. 25, Iss. 6, pp. 703–706. (In Russian)
7. Kosyachenko L. A. Problemy effektivnosti fotoelektricheskogo preobrazovaniya v tonkoplennoknykh solnechnykh elementakh CdS/CdTe [Problems of efficiency of photoelectric conversion in thin-film CdS/CdTe solar cells]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors]. 2006, vol. 40, Iss. 6, pp. 730–746. (In Russian)
8. Yurchenko A. V., Volgin A. V., Kozlov A. V. Statisticheskaya model' kremnievykh solnechnykh batarey, rabotayushchikh pod vozdeystviem prirodnykh i apparatnykh faktorov [Statistical model of silicon solar panels operating under the influence of natural and hardware factors]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University]. 2009, vol. 314, Iss. 4, pp. 142–148. (In Russian)
9. GOST R 56983—2016 (IEC 62108:2007). *Ustroystva fotoelektricheskies s kontsentratorami. Metody ispytaniy* [Photovoltaic devices with concentrators. Testing methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2016. 45 p. (In Russian)
10. GOST R MEK 60904-3—2013. *Pribory fotoelektricheskies. Chast' 3: Printsipy izmereniya kharakteristik fotoelektricheskikh priborov s uchetom standartnoy spektral'noy plotnosti energeticheskoy osveshchennosti nazemnogo solnechnogo izlucheniya* [GOST R IEC 60904-3—2013. Photovoltaic devices. Part 3: Principles of measurement of photovoltaic device characteristics taking into account the standard spectral density of irradiance of terrestrial solar radiation]. Moscow: Standartinform Publ., 2014, 89 p.

Received: July 08, 2025

Accepted: August 11, 2025

Author's information:

Tatiana L. RIPOL-SARAGOSI — PhD in Engineering,
Professor; ripol-saragosi@mail.ru

Ivan S. DURNEV — Engineer; durnev.iv@mail.ru;

Igor Yu. NOVOSELSKY — PhD in Engineering,
Associate Professor; nttk@pgups.ru