

## Математическое моделирование тепловых процессов в микроморфном фотоэлектрическом модуле и экспериментальная верификация модели в условиях Астраханской области

*В.Г. Ильичев, Е.Ю. Степанович*

*Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева*

**Аннотация:** Перегрев фотоэлектрических модулей (ФЭМ) является ключевой проблемой, приводящей к снижению их эффективности и срока службы, особенно в регионах с высоким уровнем солнечной радиации. Существующие модели недостаточно детализированы для точного прогнозирования тепловых режимов тонкопленочных микроморфных модулей в реальных условиях эксплуатации. В работе разработана трехмерная конечно-элементная модель микроморфного модуля Pramac 125 в программном комплексе Ansys, учитывающая геометрические, оптические и термодинамические характеристики всех слоев. Для верификации модели проведен натурный эксперимент в Астраханской области с регистрацией температуры модуля и метеорологических параметров. Валидация подтвердила высокую точность модели: коэффициент детерминации  $R^2$  между расчетными и экспериментальными данными составил 0,9991. Модель позволяет оценивать тепловые режимы и связанные с ними энергетические потери, что обосновывает необходимость применения систем охлаждения в южных регионах России.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический модуль, микроморфная технология, солнечная радиация, температурный режим, выходная мощность, математическое моделирование, метод конечных элементов, тепловые режимы, валидация модели, численный эксперимент.

### Введение

Фотоэлектрическая технология играет ключевую роль в глобальном переходе на возобновляемую энергетику, поскольку она непосредственно преобразует солнечное излучение в электрическую энергию. Однако серьезной проблемой, препятствующей достижению максимальной эффективности и операционного срока службы, является перегрев фотоэлектрических модулей (ФЭМ). При повышении температуры модуля выше стандартных тестовых условий ( $25^{\circ}\text{C}$ ) его электрическая эффективность значительно снижается, что приводит к существенным потерям в выработке энергии [1–4]. Эта проблема напрямую влияет на энергоэффективность и

---

экономическую целесообразность солнечных электростанций, делая тепловой менеджмент ключевой задачей для энергосбережения в солнечной энергетике.

Многочисленные исследования были посвящены моделированию теплового поведения ФЭМ для прогнозирования их производительности и разработки эффективных стратегий охлаждения [5]. В работе [6] исследовали энергетические и тепловые характеристики полупрозрачного фотоэлектрического модуля, отметив снижение мощности примерно на 0,48-0,52% на °C повышения температуры. Авторы [7] разработали динамическую тепловую модель на основе баланса энергии, а в работе [8] предложили модель производительности на основе технических характеристик производителя. Ким и др. [9] использовали программу теплового анализа для изучения влияния температуры окружающей среды, а также исследовали эффективность крепления ребер к тыльной стороне фотоэлектрического модуля для пассивного охлаждения.

Несмотря на существующий ряд исследований, ощущается недостаток детализированных, валидированных 3D тепловых моделей для конкретных типов модулей, в частности, микроморфных тонкопленочных, таких как Pramac 125, которые имеют сложную многослойную структуру и уникальные оптические свойства. Существующие модели часто опираются на упрощенные эмпирические корреляции или не учитывают сложные процессы теплопередачи внутри каждого слоя.

Научная новизна данной работы заключается в разработке и экспериментальной валидации высокодетализированной 3D модели методом конечных элементов микроморфного тонкопленочного фотоэлектрического модуля (Pramac 125) в программной среде Ansys. Новизна модели заключается в высокой детализации (сверхмелкая объемная сетка (вплоть до 0,000001 мм) точно отображает тонкопленочные слои); комплексном учете физических параметров (одновременный расчет оптических и тепловых процессов с

---

учетом специфических для каждого слоя оптических свойств (поглощение, отражение) и термодинамических параметров) и специфичностью валидации, выполненной для микроморфной технологии по данным натуральных экспериментов.

Такой подход позволяет провести точный анализ распределения температуры по слоям модуля в различных условиях окружающей среды, что крайне важно для разработки целевых решений по повышению энергоэффективности и продлению срока службы фотоэлектрических систем.

*Микроморфный фотоэлектрический модуль Pramac 125.*

На Рис. 1 представлена структура двухслойного микроморфного модуля Pramac 125.

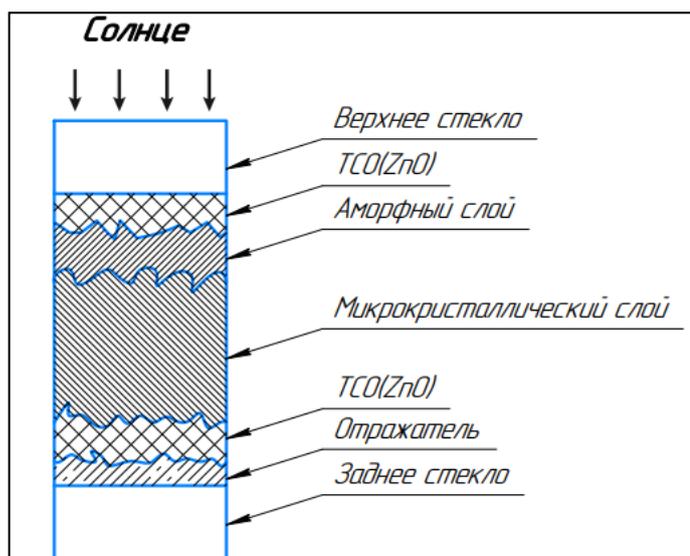


Рис. 1. – Структура микроморфного фотоэлектрического модуля Pramac 125.

Микроморфные фотоэлектрические модули Pramac производятся по гибридной тонкопленочной технологии, которая объединяет в себе два типа кремния: аморфный и микрокристаллический. Такая структура, известная как тандемная, формируется путем последовательного нанесения нескольких сверхтонких слоев на стеклянную подложку. Благодаря этому инновационному подходу модуль способен эффективно преобразовывать в электрическую энергию не только видимый спектр солнечного света, но и его

инфракрасную составляющую, что выгодно отличает микроморфные элементы от классических кристаллических аналогов.

В таблице 1 представлены электрические характеристики Pramac 125.

Таблица 1.

Электрические характеристики Pramac 125

Максимальная выходная мощность, $P_{mpp}$ , Вт	125,0
Напряжение при номинальной мощности, $U_{mpp}$ , В	56,6
Сила тока при номинальной мощности, $I_{mpp}$ , А	2,21
Напряжение открытого контура, $U_{oc}$ , В	74,1
Сила тока открытого контура, $I_{sc}$ , А	2,71
Фактор напоянения, $FF$ , %	62,2

### Методология построения модели

В настоящей работе была разработана тепловая модель, которая способна оценивать тепловые характеристики микроморфного тонкопленочного фотоэлектрического модуля Pramac 125 при заданных метеорологических условиях. Тепловое моделирование было разработано в программной среде Ansys, В тепловой модели исследуется зависимость температуры модуля, эффективности и тепловой эффективности от различных факторов окружающей среды. Результаты, полученные в результате предложенного теплового моделирования подтверждены экспериментально.

### Математическая постановка задачи

Тепловые процессы в многослойной структуре фотоэлектрического модуля описываются нестационарным уравнением теплопроводности с источником теплоты  $Q_v$ , обусловленным поглощенным в активных слоях солнечным излучением:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_v$$

где  $\rho$  — плотность материала слоя (кг/м<sup>3</sup>),

$c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении (Дж/(кг·К)),

$T$  — температура (К),

$t$  — время (с),

$k$  — коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)),

$Q_v$  — объемная плотность теплового потока от внутренних источников (Вт/м<sup>3</sup>).

На внешних поверхностях задаются граничные условия третьего рода, учитывающие конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_S - T_{amb}) + \alpha G - \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_{sky}^4)$$

где  $T_S$  — температура поверхности,

$T_{amb}$  — температура окружающей среды,

$h$  — коэффициент конвективной теплоотдачи, (Вт/(м<sup>2</sup>·К))

$\alpha$  — коэффициент поглощения поверхности,

$G$  — интенсивность падающей солнечной радиации (Вт/м<sup>2</sup>),

$\varepsilon$  — степень черноты поверхности,  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана–Больцмана,

$T_{sky}$  — эффективная температура неба.

На границах раздела слоев принимаются условия идеального теплового контакта (непрерывность температуры и теплового потока). Решение краевой задачи осуществлялось методом конечных элементов в Ansys с использованием решателей Fluent и CFX. Контроль сходимости выполнялся по снижению среднеквадратичных невязок до  $10^{-5}$  и стабилизации контролируемых параметров (изменение менее 0,1% на 50 итерациях).

Расчетная сетка является важным элементом тепловой модели фотоэлектрического модуля при проведении конечно-элементного

---

моделирования. Она представляет собой дискретизацию пространства, в котором происходят тепловые процессы. Размер и плотность сетки определяют точность и сложность модели, а также требования к вычислительным ресурсам.

Построение расчетной сетки было выполнено с учетом специфики многослойной структуры модуля. Поскольку ключевые тепловые процессы протекают в тонких функциональных слоях, для их адекватного разрешения был применен алгоритм динамического измельчения сетки. Минимальный размер ячеек в области фотопреобразующего слоя был задан на уровне 0.000001 мм, что позволило точно смоделировать тепловые потоки и градиенты температуры. Разбиение 3-D модели модуля Pramac 125 на ячейки представлено на Рис. 2.

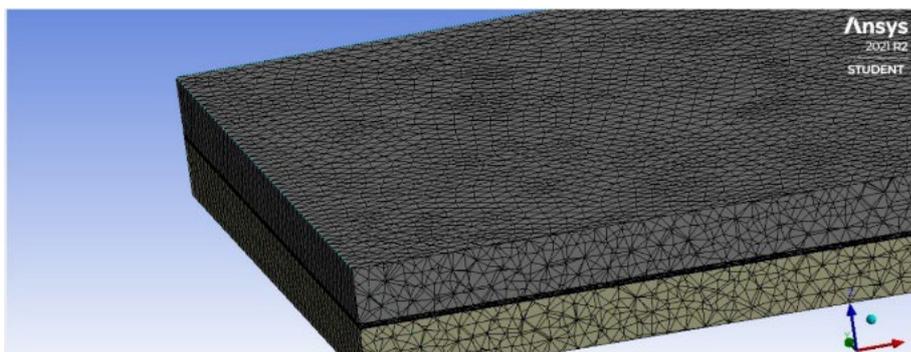


Рис. 2. – Разбиение 3-D модели модуля Pramac 125 на ячейки

Для построения расчетной сетки использовались объемные тетраэдральные элементы с локальным измельчением в области тонкопленочных слоев (минимальный размер элемента  $1 \times 10^{-6}$  мм), что обеспечивает корректное разрешение тепловых потоков в субмикронных структурах. Для массивных элементов конструкции (стекло, рама) применялась более грубая сетка с максимальным размером элемента до 2 мм. Качество сетки оценивалось по стандартным критериям: среднее ортогональное качество составило 0,82, средний скос — 0,24, что удовлетворяет требованиям к сходимости решения. Для подтверждения

достоверности результатов проведен анализ сходимости по сетке на трех уровнях измельчения (от 1,2 до 5,1 млн элементов); изменение максимальной температуры активного слоя между базовой и мелкой сеткой не превысило 0,3 %, что свидетельствует о достижении квазинезависимого от сетки решения.

Для определения температурного профиля фотоэлектрического модуля были использованы регулярные условия солнечной радиации ( $1000 \text{ Вт/м}^2$ ) и температуры окружающей среды  $t = 25^\circ\text{C}$ .

### Натурный эксперимент для валидации модели

Валидация тепловой модели проводилась в условиях реальной эксплуатации. Натурный эксперимент был проведен на базе Астраханского государственного университета в характерных для Астраханской области климатических условиях 12 июля 2025 года с 9:00 до 13:00 с применением информационно-измерительной системы долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей, представленной на Рис.3 [10,11].



Рис. 3. – Общий вид информационно-измерительной системы долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей

Температура поверхности модуля (переднее стекло и тыльная сторона Tedlar) измерялась отдельными датчиками температуры, закрепленными в центре соответствующих поверхностей. Данные записывались с интервалом в 1 минуту; усредненные почасовые значения представлены в таблице 2 для

сопоставления с результатами стационарного моделирования, проведенного для соответствующих условий окружающей среды.

Таблица 2.

Данные натуральных испытаний и результаты моделирования

Время	Температура окружающей среды, °С	Солнечная радиация, Вт/м <sup>2</sup>	Температура передней стороны ФЭМ (Экспериментальное значение / модель), °С	Температура тыльной стороны ФЭМ (Экспериментальное значение / модель), °С
9:00	32,0	895	54,2/54,5	56,8/57,1
10:00	35,5	992	59,8/60,2	62,7/63,0
11:00	39,0	1020	65,3/65,8	68,5/68,9
12:00	42,5	1010	69,7/70,1	73,2/73,6
13:00	45,0	1000	72,5/72,8	76,3/76,7

Для визуальной оценки адекватности модели на рис. 4 приведены временные зависимости солнечной радиации (зеленая линия), температуры окружающей среды (фиолетовая линия), экспериментальной (синяя линия) и расчетной (красная линия) температуры тыльной стороны ФЭМ.

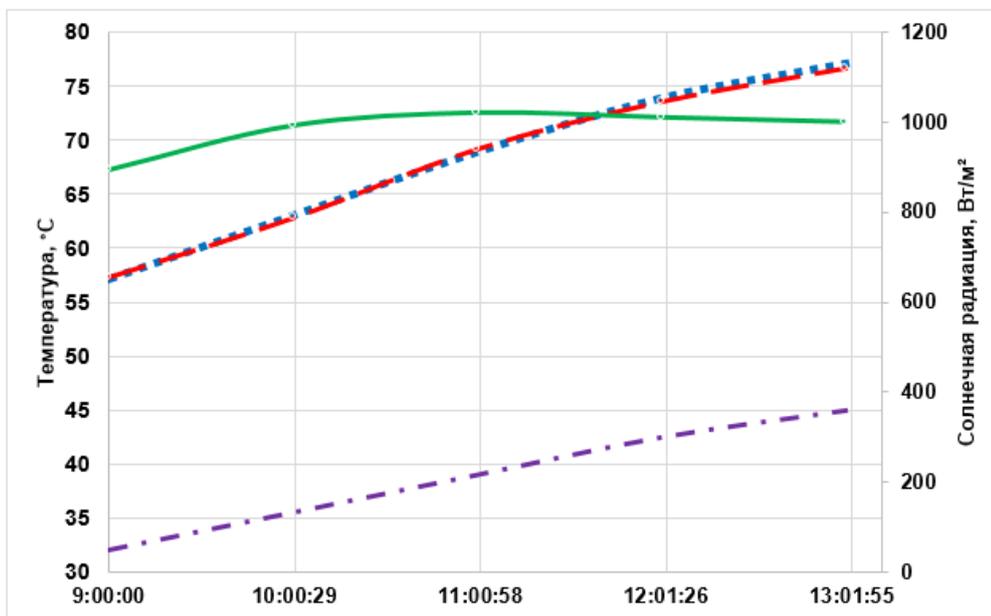


Рис. 4. – Временные зависимости параметров эксперимента и результатов моделирования

Количественная оценка точности модели представлена на рис. 5, где показано сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры

тыльной стороны ФЭМ. На график нанесены экспериментальные данные (синие точки) и линия линейной регрессии (красная линия), использованная для статистического анализа точности модели.

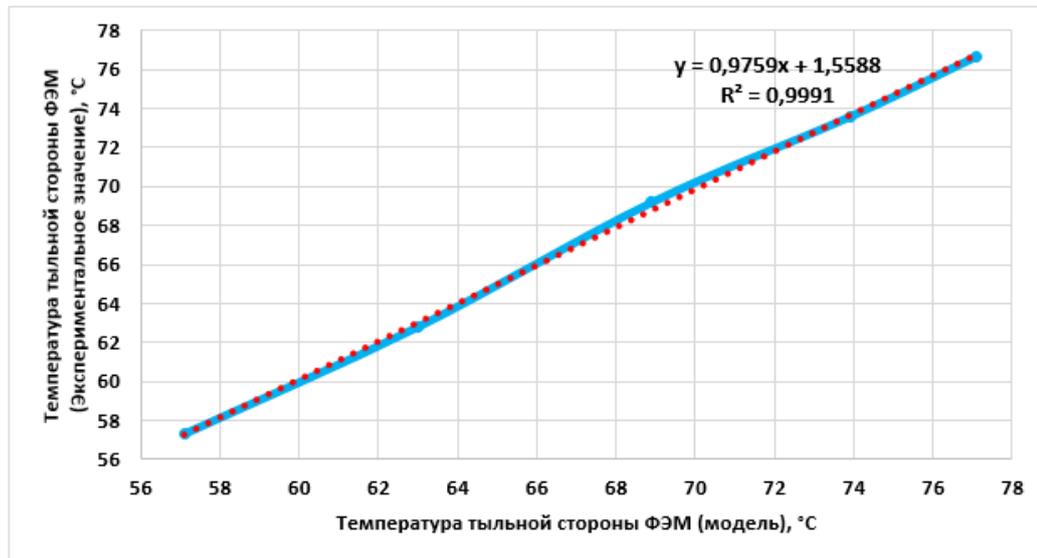


Рис. 5. – Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры тыльной стороны ФЭМ

### Выводы

В результате исследования разработана и верифицирована трехмерная конечно-элементная модель тепловых режимов микроморфного фотоэлектрического модуля Pramac 125 в среде Ansys. Натурный эксперимент в условиях Астраханской области подтвердил высокую точность модели: коэффициент детерминации между расчетными и экспериментальными значениями температуры составил  $R^2 = 0,9991$ , уравнение регрессии  $y = 0,9759x + 1,5588$  свидетельствует о минимальном систематическом смещении. Модель достоверно воспроизводит динамику тепловых процессов с учетом тепловой инерции многослойной структуры. Анализ температурных полей выявил существенную неоднородность нагрева: максимальная температура в проводящем слое достигает  $77,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при этом тыльная поверхность (Tedlar) нагревается сильнее лицевого стекла из-за низкой теплопроводности материала. Разность температур между слоями не превышает  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  благодаря

их малой толщине. С использованием температурного коэффициента мощности ( $-0,25 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ ) установлено, что при максимальном нагреве потери мощности относительно номинала составляют 13%, что подтверждает критическое влияние перегрева на энергоэффективность в регионах с высокой солнечной радиацией. Разработанная модель является эффективным инструментом для прогнозирования тепловых режимов и может использоваться при проектировании фотоэлектрических систем и разработке методов охлаждения.

### Литература

1. Теруков Е.И., Андроников Д.А., Малевский Д.А., Зайнутдинов Р.А., Ключарев А.Ю., Братышев С.Н., Ильичев В.Г. Экспериментальное исследование влияния метеорологических факторов на выработку электроэнергии солнечными модулями в климатических условиях Астраханской области // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2019. № 2(46). С. 180-193.

2. Ле Винь Т. Разработка системы слежения за солнцем и охлаждения фотоэлектрического модуля на основе нечеткой логики // Инженерный вестник Дона, 2023, № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8722](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8722)

3. Джумаев А.Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. 46-й междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Сибак. 2015. № 5 (42). С. 33-40.

4. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 34. С. 56–74.

5. Ле В. Т., Щагин А. В., Нго С. К., Ле В. Х. Активные методы водяного охлаждения для солнечного фотоэлектрического модуля // Инженерный вестник Дона, 2020, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6322

6. Park K. E., Kang G. H., Kim H. I., Yu G. J., Kim J. T. Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module // Energy. 2010. 35(8). pp. 2681-2687.

7. Lobera D.T., Valkealahti S. Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions // Solar Energy. 2013. Vol. 93. pp. 183–194.

8. Lo Brano V., Ciulla G. An efficient analytical approach for obtaining a five parameters model of photovoltaic modules using only reference data // Applied Energy. 2013. Vol. 111. pp. 894-903.

9. Kim J.P., Lim H., Song J.H., Chang Y.J., Jeon C.H. Numerical analysis on the thermal characteristics of photovoltaic module with ambient temperature variation // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. 95(1). pp. 404-407.

10. Братышев С.Н., Зайнутдинова Л.Х., Ильичев В.Г., Титов А.С. Информационно-измерительная система долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей // Материалы II Международной научно-технической конференции. Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации, Уфа. 2019. С. 281-286.

11. Зайнутдинова Л.Х., Ильичев В.Г., Джамбеков Р.Г. Оценка эффективности водяного охлаждения фотоэлектрического модуля в климатических условиях Астраханской области // Окружающая среда и энергосбережение. 2022. № 3(15). С. 11-24.

### References

1. Terukov E.I., Andronikov D.A., Malevskij D.A., Zajnutdinov R.A., Klyucharev A.Yu., Bratyshev S.N., Ilichev V.G. Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii. 2019. № 2(46). pp. 180-193.



2. Le Vin' T. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8722](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8722)
3. Dzhumaev A.Ya. Tekhnicheskie nauki ot teorii k praktike: sb. st. po mater. 46 mezhdunar. nauch. prakt. konf. 2015. № 5 (42). pp. 33–40.
4. Kirpichnikova I.M., Mahsumov I.B. Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2020. № 34. pp. 56–74.
5. Le V. T., Shchagin A. V., Ngo S. K., Le V. H. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6322](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6322)
6. Park K. E., Kang G. H., Kim H. I., Yu G. J., Kim J. T. Energy. 2010. 35(8). pp. 2681-2687.
7. Lobera D.T., Valkealahti S. Solar Energy. 2013. Vol. 93. pp. 183-194.
8. Lo Brano V., Ciulla G. Applied Energy. 2013. Vol. 111. pp. 894-903.
9. Kim J.P., Lim H., Song J.H., Chang Y.J., Jeon C.H. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. 95(1). pp. 404-407.
10. Bratyshev S.N., Zajnutdinova L.H., Ilichev V.G., Titov A.S. Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Problemy polucheniya, obrabotki i peredachi izmeritel'noj informacii, Ufa. 2019. pp. 281-286.
11. Zajnutdinova L.H., Ilichev V.G., Dzhambekov R.G. Okruzhayushchaya sreda i energovedenie. 2022. № 3(15). pp. 11-24.

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 16.01.2026**

**Дата публикации: 3.03.2026**