

УДК 621.311.243:621.383

Э.А.Бекиров, докт.техн.наук, Д.В.Каркач (Национальная академия природоохранного и курортного строительства, Симферополь)

Расчет и анализ теплового баланса фотоэлемента

Рассмотрен теплообмен фотоэлемента с окружающей средой с целью определения его равновесной температуры. Решено уравнение теплового баланса и определена зависимость температуры фотоэлемента от температуры окружающей среды и плотности потока концентрированного солнечного излучения. Для принятой предельной температуры фотоэлемента 85°C определен максимальный коэффициент концентрации. Обнаружено, что при температуре окружающей среды 25°C максимальный коэффициент концентрации не превышает $K=3$ при свободной установке фотоэлементов и $K=2,5$ при установке на крыше. Увеличение коэффициента концентрации на единицу в летнее время приводит к увеличению равновесной температуры фотоэлементов на 18-22°C, в зависимости от способа установки.

Розглянуто теплообмін фотоелемента з навколишнім середовищем з метою визначення його рівноважної температури. Розв'язано рівняння теплового балансу і визначена залежність температури фотоелемента від температури довкілля і щільності потоку концентрованого сонячного випромінювання. Для прийнятої граничної температури фотоелемента 85°C визначено максимальний коефіцієнт концентрації. Виявлено, що при температурі довкілля 25°C максимальний коефіцієнт концентрації не перевищує $K=3$ при вільній установці фотоелементів і $K=2,5$ при установці на даху. Збільшення коефіцієнта концентрації на одиницю в літній час приводить до збільшення рівноважної температури фотоелементів на 18-22°C, залежно від способу установки.

Истощение ресурсов ископаемого топлива, а также существенные экологические проблемы традиционной энергетики приводят к необходимости поиска новых способов получения энергии. Одним из наиболее перспективных методов является фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии. Однако плотность энергии солнечного излучения существенно ниже плотности энергии традиционных видов топлива, что, с учетом более низкого общего коэффициента полезного действия, приводит к значительным срокам окупаемости, по сравнению с аналогичными по мощности проектами, основанными на традиционной энергетике.

Значительную часть стоимости современных гелиоэлектростанций составляют собственно полупроводниковые фотоэлементы. Снижение площади дорогостоящих фотоэлементов без уменьшения общей выходной мощности возможно при пропорциональном увеличении плотности потока падающего излучения. Это достигается применением концентрирующих систем различной конструкции. Однако значительный коэффициент концентрации приводит к увеличению температуры фотоэлемента, что негативно влияет на коэффи-

циент полезного действия, максимальную мощность и срок службы солнечных батарей.

Коэффициент полезного действия преобразования солнечной энергии для элементов на основе кремния достигает максимального значения при температурах $(-150^{\circ}\text{C}) \div (-100^{\circ}\text{C})$ и составляет около 17%. При повышении температуры он уменьшается, и при температуре 50°C падает до 9% [1]. Скорость падения КПД при температуре 25°C составляет 0,05%/°C. Это падение КПД становится особенно существенным при использовании концентраторов солнечного излучения (вследствие более высокой температуры) и накладывает предел на коэффициент концентрации при наземной эксплуатации. Определение разумного предела концентрации оказывается крайне важным при выборе конструкции концентратора, так как с увеличением степени концентрации предъявляются более жесткие требования к точности отражающих поверхностей, качеству юстировки всей оптической схемы, точности слежения за Солнцем, что отрицательно сказывается на стоимости проектирования, изготовления, эксплуатации и обслуживания фотобатарей. Существенное снижение стоимости гелиоэлектростанций воз-

можно при коэффициентах концентрации $K = 2-6$. При этом зачастую снимается необходимость слежения за Солнцем и проведения сложной юстировки.

В данной работе ставится задача определения равновесной температуры полупроводникового фотоэлемента и максимальной степени концентрации солнечного излучения при его работе без активного охлаждения.

Температура фотоэлемента определяется на основании уравнения баланса энергии. Поглощенный фотоэлементом поток солнечного излучения частично преобразуется в полезную работу, определяемую коэффициентом полезного действия η . Остаток поглощенной энергии вызывает нагрев фотоэлемента. Известно [2], что кремний практически прозрачен для инфракрасного излучения с длиной волны $\lambda > 1,1$ мкм, однако это излучение поглощается в элементах конструкции солнечных батарей и оказывает влияние на равновесную температуру фотоэлементов. Тепло передается в окружающую среду посредством трех механизмов: излучением, конвекцией и теплопередачей. В стационарном режиме количество поглощенной за единицу времени энергии равно полезной работе и суммарным потерям тепла.

Пусть фотобатарея поглощает интегральный поток энергии P_0 . Тогда уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$P_0 = \eta P_0 + P_e + P_t + P_c, \quad (1)$$

где P_e – поток, переданный окружающей среде через излучение; P_t – через теплопроводность; P_c – через конвекцию.

Потери на излучение определяются на основании закона Стефана-Больцмана:

$$R = \varepsilon \sigma T^4, \quad (2)$$

где ε – коэффициент черноты излучающего тела.

Так как кроме излучения происходит еще и поглощение фотоэлементом рассеянной световой энергии, исходящей от небосвода, то (2) примет вид:

$$R = \varepsilon \sigma (T^4 - T_n^4), \quad (3)$$

где T_n – эффективная температура небосвода.

Согласно [3], ее можно представить в виде:

$$T_n = 0,0552 \cdot T_0^{1,5}, \quad (4)$$

где T_0 – температура окружающей среды.

Таким образом, мощность потерь на излучение с поверхности фотоэлемента, обращенной вверх, P_{e1} определяется выражением:

$$P_{e1} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_n^4) S, \quad (5)$$

где S – площадь фотобатареи.

При монтаже над поверхностью земли обратная сторона фотоэлемента обычно повернута к земле, эффективная температура которой близка к температуре окружающего воздуха. Таким образом, потери с нижней стороны фотоэлемента P_{e2} составляют:

$$P_{e2} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) S, \quad (6)$$

а общие потери через излучение P_e равны:

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = \varepsilon \sigma S [(T^4 - T_n^4) + (T^4 - T_0^4)]. \quad (7)$$

Потери через теплопроводность P_t определяются коэффициентом теплопроводности воздуха λ :

$$P_t = \lambda S (T - T_0). \quad (8)$$

Эти потери одинаковы с двух сторон фотобатареи. Вследствие малой площади боковой поверхности модуля, по сравнению с площадью рабочей поверхности, потерями тепла с боковой поверхности можно пренебречь. В связи с низкой теплопроводностью воздуха следует ожидать, что потери через теплопроводность будут значительно меньше потерь через излучение и конвекцию.

Мощность конвекции рассчитывается на основании теории подобия. При отсутствии активного охлаждения имеет место случай свободной конвекции, вызываемой архимедовой силой, действующей на нагретый объем воздуха. При этом конвекция происходит в неограниченном объеме.

В общем случае мощность конвективного переноса тепла P_c определяется выражением:

$$P_c = \alpha S (T - T_0), \quad (9)$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Критериями подобия для расчета этого коэффициента являются числа Нуссельта Nu , Прандтля Pr и Грасгофа Gr .

Число Нуссельта, представляющее собой безразмерный коэффициент теплоотдачи, определяется выражением:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \quad (10)$$

где L – характерный размер задачи, равный в данном случае наименьшему размеру фотобатареи в плане.

Число Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (11)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха; a – коэффициент температуропроводности воздуха.

Число Грасгофа:

$$Gr = \frac{g\beta(T-T_0)L^3}{\nu^2}, \quad (12)$$

где g – ускорение свободного падения;

$\beta = \frac{1}{T} = \frac{2}{T+T_0}$ – коэффициент теплового расширения воздуха.

В случае свободной конвекции число Нуссельта Nu является функцией чисел Прандтля Pr и Грасгофа Gr :

$$Nu = C(Pr \cdot Gr)^n. \quad (13)$$

При конвекции в неограниченном пространстве для горизонтального расположения фотобатареи коэффициенты C и n в формуле (13) равны: $C=0,135$; $n=1/3$ [4]. Тогда (13) с учетом (10)–(12) примет следующий вид:

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} C \left(\frac{g\beta(T-T_0)L^3}{\nu a} \right)^n. \quad (14)$$

Обращает на себя внимание тот факт, что при принятом значении $n=1/3$ удельная мощность конвекции α не зависит от L . Так как удельные потери через излучение и теплопроводность также не зависят от L , то можно сделать вывод о том, что равновесная температура фотоэлемента не зависит от его размеров. Это подтверждается результатами численных экспериментов, приведенных ниже. Однако зависимость от L может иметь место при расположении фотоэлемента под углом к горизонту, когда показатель степени n в формуле (14) будет отличен от $1/3$.

Таким образом, мощность конвективных потерь можно представить выражением:

$$P_c = \alpha \cdot S \cdot (T - T_0). \quad (15)$$

Следует учесть, что конвекция с верхней поверхности нагретого тела происходит более интенсивно, чем с нижней. Согласно [3], для расчета

конвекции с поверхности, обращенной вверх, коэффициент C в (13) следует увеличить на 30%, а для поверхности, обращенной вниз – уменьшить на 30%. Таким образом, для общего конвективно-го потока получим:

$$P_c \cdot 1,3 + P_c \cdot 0,7 = 2 \cdot P_c.$$

С учетом (6), (8) и (15) уравнение (1) будет иметь вид:

$$KP_0(1-\eta) = \varepsilon\sigma[(T^4 - T_n^4) + (T^4 - T_0^4)] + 2\lambda(T - T_0) \left[0,135 \left(\frac{2g}{\nu a} \frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3} + 1 \right], \quad (16)$$

где K – коэффициент концентрации солнечного излучения.

Решение уравнения (16) при известных значениях $g, \nu, \lambda, \alpha, \varepsilon, \eta, K$ и P_0 дает возможность определить равновесную температуру фотобатареи.

Численный эксперимент проводился в среде *Mathcad 15.0*. Значения исходных параметров модели приведены в таблица 1.

Таблица 1. Исходные параметры модели [3]

Параметр	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения	g	9,8 м/с ²
Кинематическая вязкость воздуха	ν	14,95·10 ⁻⁶ м ² /с
Коэффициент теплопроводности воздуха	λ	0,026 Вт/(м·К)
Коэффициент температуропроводности воздуха	a	21,2·10 ⁻⁶ м ² /с
Коэффициент излучения кремния	ε	0,85
Коэффициент полезного действия фотоэлемента	η	0,17
Плотность потока солнечного излучения, поглощенного фотоэлементом	P_0	700 Вт/м ²

Результаты расчетов при коэффициентах концентрации от $K=1$ до $K=4$ представлены на рис. 1. Граница перегрева фотоэлемента указана при температуре 85°C. Из рис. 1 видно, что при температуре окружающей среды, превышающей 20°C, коэффициент концентрации выше $K=3$ приводит к перегреву фотоэлемента, что требует принятия дополнительных мер по отводу тепла (принудительному, либо пассивному – с помощью радиатора).

Расчеты показывают, что при любом рассмотренном коэффициенте концентрации уве-

личение температуры фотоэлемента с ростом внешней температуры одинаково и составляет 0,5°C на каждый градус роста температуры окружающей среды.

Приращение температуры при каждом увеличении K на единицу составляет от 16,5°C до 21,5°C в зависимости от температуры окружающей среды.

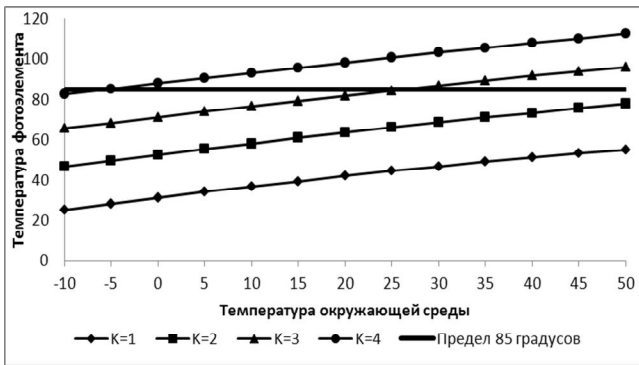


Рис. 1. Зависимость температуры фотоэлемента от температуры окружающей среды при различных коэффициентах концентрации.

При размещении фотобатареи на крыше термическое сопротивление с нижней стороны становится практически бесконечным, потери тепла будут происходить только с верхней стороны фотоэлемента. Тогда уравнение (16) принимает вид:

$$KP_0(1-\eta) = \varepsilon\sigma \left[(T^4 - T_n^4) + (T^4 - T_0^4) \right] + \lambda(T - T_0) \left[0,176 \left(\frac{2g}{va} \frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3} + 1 \right]. \quad (17)$$

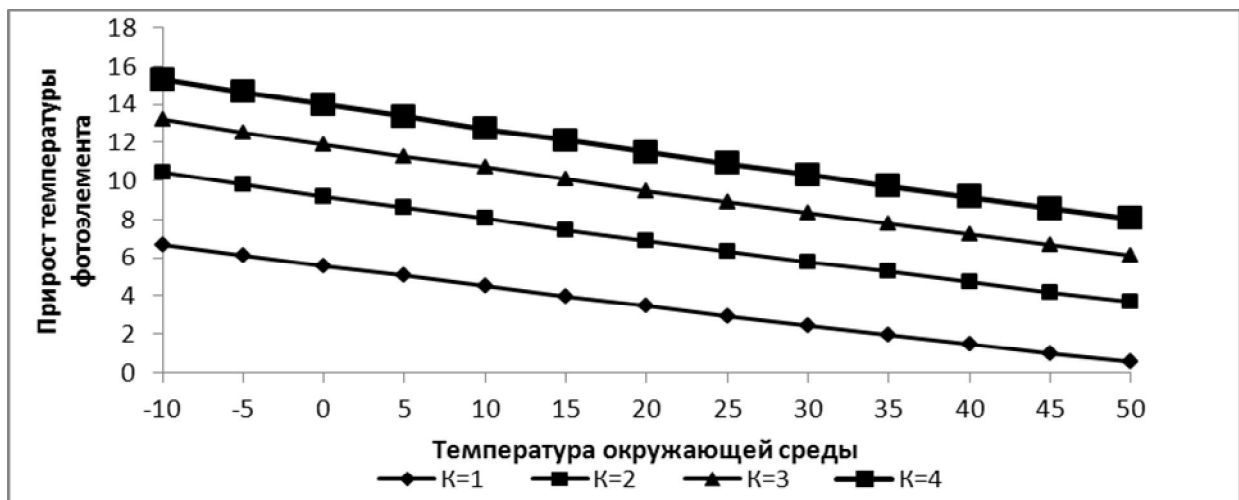


Рис. 3. Зависимость дополнительного нагрева фотоэлементов при установке на крыше от температуры окружающей среды.

Очевидно, что ситуация с отводом тепла в этом случае ухудшается, что приводит к большему нагреву фотоэлементов. Результаты расчетов представлены на рис. 2. Теперь коэффициент концентрации $K=3$ приводит к перегреву, уже начиная с температуры окружающей среды около 5°C.

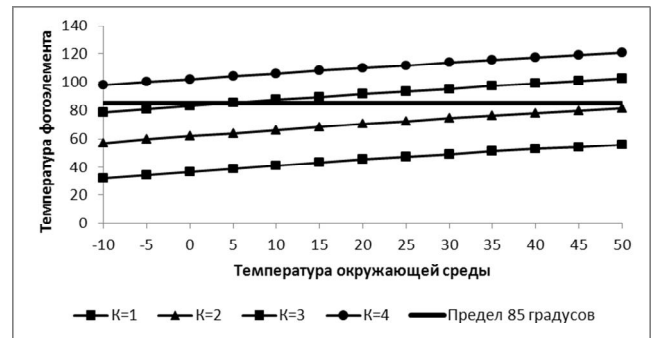


Рис. 2. Зависимость температуры фотоэлемента от температуры окружающей среды при установке на крыше.

Благодаря большей мощности конвекции, скорость роста температуры фотоэлемента с увеличением температуры окружающей среды уменьшается на 20% и составляет 0,38-0,4°C на каждый градус внешней температуры. При этом зависимость от коэффициента концентрации увеличивается на 12-17% и составляет 18,5-25°C на каждую единицу увеличения коэффициента концентрации.

Зависимость дополнительного нагрева фотоэлементов при установке на крыше показана на рис. 3. При типичных летних температурах 25-30°C установка на крыше дает прирост температуры на 7-13°C, что уменьшает максимальный коэффициент концентрации на единицу.

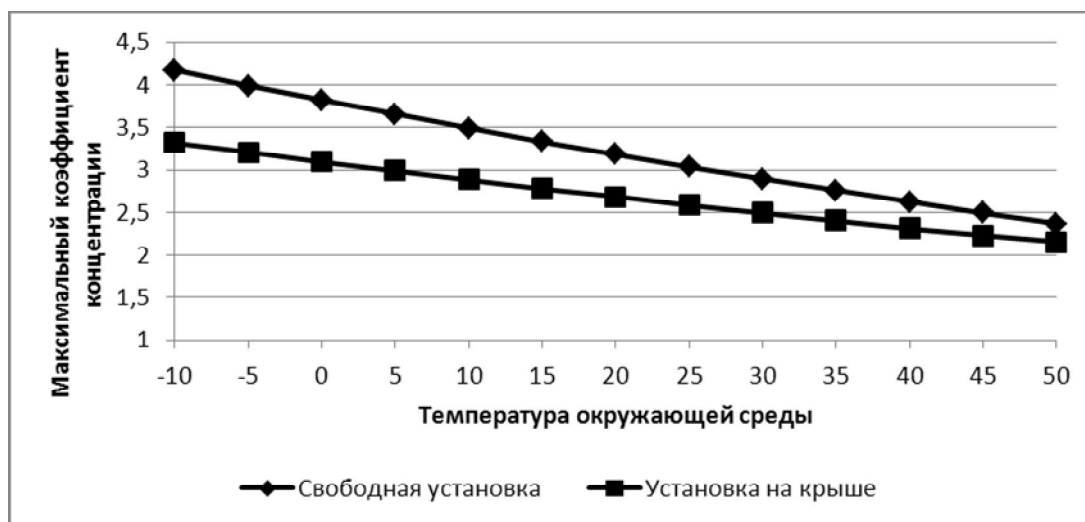


Рис. 4. Зависимость максимального коэффициента концентрации от температуры окружающей среды.

Задавая предельную температуру фотоэлемента T , можно решить уравнения (16) и (17) относительно коэффициента концентрации K и таким образом определить зависимость максимально допустимого коэффициента концентрации от температуры окружающей среды. Эта зависимость приведена на рис. 4.

Выводы. 1. Равновесная температура фотоэлемента не зависит от его геометрических размеров при горизонтальном положении.

2. Без использования специальных мер по охлаждению фотоэлементов максимальный коэффициент концентрации ограничен значениями $K=2,5-3$. Большой коэффициент K позволяет системе эффективнее работать в утренние и вечерние часы, но приводит к перегреву около местного полудня.

3. В летнее время при температуре окружающей среды 25°C увеличение коэффициента концентрации на единицу приводит к увеличению температуры фотоэлемента примерно на 18°C для свободной установки и на 22°C для случая установки на крыше.

4. Приведенные выводы справедливы для $P_0=700\text{ Вт/м}^2$, что соответствует максимальному потоку энергии солнечного излучения в летнее время для широты 45° . В более высоких широтах при уменьшении P_0 максимальный коэффициент концентрации будет увеличиваться и может быть получен при решении относительно K уравнений (16) или (17).

Расчеты показывают, что при отсутствии концентрации перегрев в реальных условиях не наблюдается. Однако даже небольшая степень концентрации солнечного излучения ($K>2$) приводит к необходимости организации охлаждения модулей фотоэлементов.

1. Фаренбух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент. Пер. с англ. Под ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
2. Твайдел Д., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
3. Даффи Д.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М.: Мир, 1977. – 410 с.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.