

Введение

Стартовым моментом солнечной энергетики как научной дисциплины является открытие в 1887 г. явления, получившего позже название внешнего фотоэффекта. Автором открытия был Генрих Герц (1857–1894) — известный физик, первым экспериментально подтвердивший теорию Дж. Максвелла о распространении электромагнитных волн в свободном пространстве.

Г. Герц, экспериментируя с электрическим пробоем между двумя электродами, вызывавшим генерирование электромагнитных волн, обратил внимание на следующий факт: при облучении одного из электродов ультрафиолетовым светом электрический пробой усиливался. Подтверждением тому являлись увеличивающийся ток пробоя и возрастающий уровень электромагнитного излучения. Об открытии нового физического явления Генрих Герц опубликовал две статьи [1].



Г. Герц



А.Г. Столетов



А. Эйнштейн

В дальнейшем несколько физиков подключились к исследованиям, связанным с внешним фотоэффектом. Среди них был и русский физик Александр Григорьевич Столетов (1839–1896). В 1889 г. он опубликовал фундаментальный труд «Активно-элек-

трические исследования», в котором дал описание закономерностей внешнего фотоэффекта [2].

К 1905 г. на основе экспериментальных исследований были сформулированы четыре закона внешнего эффекта. Однако объяснить их с помощью волновой теории света было невозможно. С этой проблемой справился молодой физик Альберт Эйнштейн (1879–1955), опубликовавший в 1905 г. в одной из своих статей уравнение внешнего фотоэффекта, опираясь на молодую в те годы квантовую физику. Составленное им уравнение на основе представления света как потока квантов энергии — фотонов — разрешило все противоречия и позволило объяснить все четыре закономерности внешнего фотоэффекта [3].

Постепенно из научного направления «внешний фотоэффект» родилась крупная отрасль промышленности сначала по изготовлению солнечных батарей, а затем и солнечных электростанций повышенной мощности (более 100 МВт), число которых непрерывно возрастает.

Чтобы лучше понять роль солнечной энергетики в современном мире, приведем краткие данные о состоянии мировой электроэнергетики, оцениваемой по двум основным параметрам: установочной мощности электростанций и количеству вырабатываемой ими в год электроэнергии. Сведения по данным параметрам касательно трех стран и мира в целом приведены в табл. В.1.

Сведения по структуре источников электроэнергии отражает диаграмма на рис. В.1.

Поскольку запасы нефти, газа и угля в толще Земли не безграничны, то структура электроэнергетики с годами неизбежно будет изменяться. Причем на смену тепловым электростанциям должны прийти экологически чистые, нерадиоактивные и безвредные для окружающей среды и человека источники электроэнергии. Солнечные электростанции (СЭС) относятся к их числу.

Таблица В.1

| Страна | Мощность электростанций, ГВт | Вырабатываемая электроэнергия, % | Мощность на одного человека, кВт |
|----------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Китай | 1500 | 26,3 | 1,05 |
| США | 1005 | 17,5 | 3,10 |
| Россия | 249 | 7,2 | 1,70 |
| Весь мир | 5700 | 100 | 0,75 |

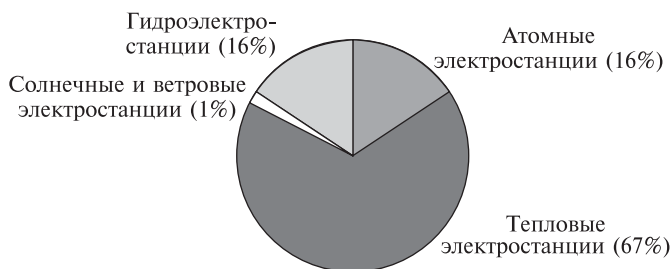


Рис. В.1 Структура источников электроэнергии

Солнечная энергетика в мире развивается быстрыми темпами, уже в 2020 г. число СЭС с установленной мощностью более 100 МВт превысило 20.

Прирост солнечных мощностей электростанций в год составил 13 %. При сохранении таких темпов суммарная мощность СЭС в мире к 2025 г. возрастет до 250 ГВт, а к 2030 г. — до 500 ГВт и солнечная электроэнергетика станет, образно выражаясь, полноправным членом в «в мировом клубе производителей электроэнергии».

После сказанного обратимся к более детальному рассмотрению научно-технических вопросов, имеющих прямое отношение к солнечной энергетике.

1 Солнечное излучение

Чтобы лучше понять, что такое солнечная энергетика, необходимо кратко ознакомиться с параметрами излучения со стороны Солнца в сторону Земли (рис. 1.1).

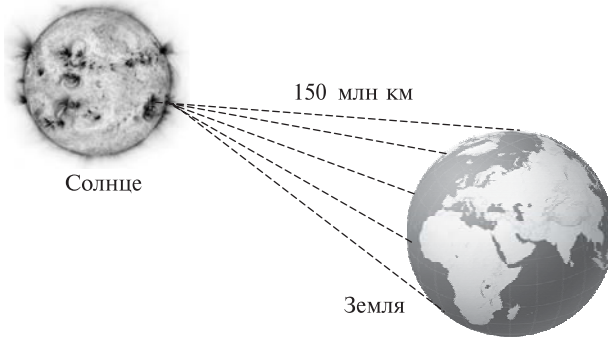


Рис. 1.1. Облучение Солнцем Земли

Внутри Солнца протекает термоядерная реакция по слиянию ядер водорода и образованию гелия — процесс, сопровождающийся высвобождением огромной энергии с температурой около 15,7 миллионов градусов. В результате этой реакции синтеза Солнце производит огромное количество энергии, которую будем измерять в тераваттах*.

Солнце излучает электромагнитные волны во все стороны окружающего его космического пространства, что позволяет вычислять плотность энергии в любой точке сферы по формуле, относящейся к шару:

$$P = \frac{P_{\text{изл}}}{4\pi R^2} \text{ Вт/м}^2, \quad (1.1)$$

* Напомним, что один тераватт, $1 \text{ ТВт} = 10^9 \text{ кВт} = 10^6 \text{ МВт} = 10^3 \text{ ГВт}$.

где $P_{\text{изл}}$ — излучаемая мощность из центра шара; R — расстояние между источником излучения и сферой.

При температуре, близкой к $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$, на поверхности Солнца большая часть энергии излучается им в мировое пространство. Приведем основные сведения, касающиеся этого излучения Солнца [4], и результаты расчета по формуле (1.1) плотности энергии в двух сферах: на поверхности Солнца и вблизи Земли. Исходные данные и результаты расчета приведены ниже.

| | |
|--|--|
| Диаметр Солнца | $1,37 \cdot 10^9\text{ м}$ |
| Поверхность Солнца | $6,08 \cdot 10^{18}\text{ м}^2$ |
| Расстояние Солнце — Земля | $1,496 \cdot 10^6\text{ км}$ |
| Мощность энергии, излучаемой Солнцем | $3,84 \cdot 10^{14}\text{ ТВт}$ |
| Мощность энергии Солнца, направленной в сторону Земли | $1,74 \cdot 10^{11}\text{ ТВт}$ ($\approx 0,001$ от всей мощности) |
| Удельная мощность энергии, излучаемой Солнцем с его поверхности | 63 МВт/м^2 |
| Удельная мощность энергии, излучаемой Солнцем, вблизи Земли | $1,3...1,4\text{ кВт/м}^2$ |
| Удельная мощность энергии, излучаемой Солнцем, на поверхности Земли | $0,9...1\text{ кВт/м}^2$ |

Примечание: снижение удельной мощности на поверхности Земли связано с затуханием света при прохождении атмосферы и отражением от нее.

Спектр светового излучения занимает полосу от инфракрасного до ультрафиолетового цвета, т. е. в диапазоне частот от 300 до 1000 ТГц [5].

Связь между частотой излучения и длиной волны связаны соотношением

$$F [\text{ТГц}] = \frac{3 \cdot 10^5}{\lambda [\text{нм}]} = \frac{300}{\lambda [\text{мкм}]} \quad (1.2)$$

График, отображающий связь между частотой и длиной волны света, приведен на рис. 1.2.

Спектр солнечного излучения занимает полосу от 0,3 до 1 мкм. График спектральной мощности этого спектра приведен на рис. 1.3 [5]. На данном графике по оси ординат отложена спектральная мощность солнечного излучения с размерностью $\text{кВт/м}^2/\text{мкм}$.

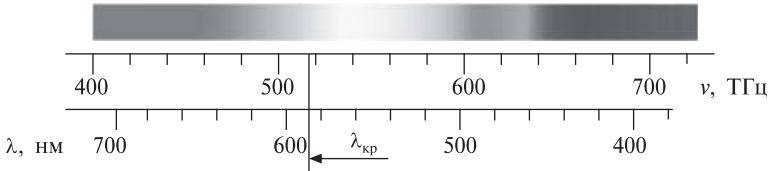


Рис. 1.2. Связь между длиной волны и частотой светового излучения

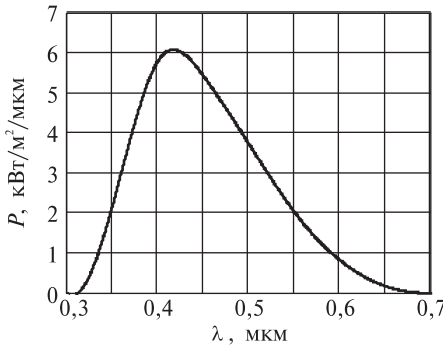


Рис. 1.3. График спектра солнечного излучения

Следующий интеграл позволяет вычислить удельную мощность солнечного излучения в части или во всем световом диапазоне частот — от инфракрасного до ультрафиолетового:

$$P_{\text{уд}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) d\lambda, \quad (1.3)$$

где λ_1 и λ_2 — границы спектра излучения, мкм; $P(\lambda)$ — мощность излучения на длине волн λ , кВт/м²/мкм.

Например, согласно (1.3) при $\lambda_1 = 0,3$ мкм и $\lambda_2 = 0,7$ мкм (см. рис. 1.3) удельная мощность солнечного излучения равна $P_{\text{уд}} = 0,98$ кВт/м².

Коротковолновой границей спектрального диапазона, занимаемого солнечным светом, принят участок с длинами волн в вакууме 380...400 нм (750...790 ТГц), а в качестве длинноволновой границы — участок 760...780 нм (385...395 ТГц) [5].

Возможна двойственная трактовка описания свойств света: либо в качестве электромагнитной волны, распространяющейся в вакууме со скоростью света, либо как поток фотонов — квантов, обладающих определенной энергией. Остановимся на волновой трактовке света.

При распространении плоской электромагнитной волны в линейной среде с потерями напряженности электрического и магнитного полей описываются выражениями:

$$\begin{aligned} E(t, x) &= E_0 e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x); \\ H(t, x) &= H_0 e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x), \end{aligned} \quad (1.4)$$

где $\beta = 2\pi/\lambda = \omega/c$ — волновое число; λ — длина волны; α — коэффициент затухания; c — скорость света.

Графики функций (1.4) приведены на рис. 1.4.

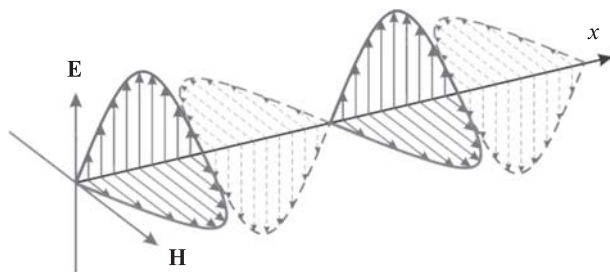


Рис. 1.4. Плоская электромагнитная волна

Плотность энергии электромагнитного поля (размерность Дж/м³), запасаемой в объеме V , равна сумме плотностей энергий электрического $W_{\text{э}}$ и магнитного $W_{\text{м}}$ полей в том же объеме:

$$\begin{aligned} W &= W_{\text{э}} + W_{\text{м}} = \frac{1}{2} \int_V DE dV + \frac{1}{2} \int_V BH dV = \\ &= \varepsilon \varepsilon_0 E^2 + \mu \mu_0 H^2 = \frac{\sqrt{\varepsilon \mu}}{c} EH = \text{const}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где D — электрическая индукция; ε — диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^7$ Ф/м — диэлектрическая постоянная; B — магнитная индукция; μ — магнитная проницаемость; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$ Гн/м — магнитная постоянная.

Перенос потока энергии электромагнитной волны в единицу времени через единицу площади из объема V , ограниченного поверхностью S , определяется вектором Пойтинга:

$$\mathbf{П} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}, \quad (1.6)$$

размерность которого — В/м \times А/м = Вт/м² = Дж/м²с.

Согласно (1.6) вектор Пойтинга определяет плотность потока энергии электромагнитного поля в линейной изотропной среде с учетом связи между векторами \mathbf{E} и \mathbf{H} . Интеграл

$$\int_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dS = \frac{dW}{dt}$$

определяет мощность электромагнитной волны, Дж/м²с, выходящей за пределы объема, ограниченного поверхностью S .

С помощью вектора Пойтинга можно определить импульс энергии электромагнитного поля, Дж/м²:

$$W_m = \frac{1}{c^2} \int_S \Pi dS.$$

Вторая трактовка природы света как потока фотонов кратко рассматривается в главе 2.

2 Внешний фотоэффект

В основе работы солнечных батарей, преобразующих солнечное излучение в электрический ток, лежит явление, называемое внешним фотоэффектом и которое имеет следующее определение: эмиссия электронов веществом под действием внешнего электромагнитного излучения.

Рассмотрим сначала более известный случай генерирования постоянного электрического тока на основе термоэлектронной эмиссии в вакуумной трубке с двумя электродами — анодом и катодом — и нитью накала (рис. 2.1).

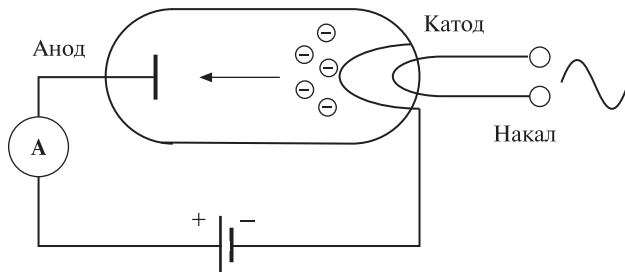


Рис. 2.1. Вакуумная трубка с двумя электродами

Под действием разогретой тугоплавкой нити накала температура вольфрамового катода достигает $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к образованию вокруг него «облачка» электронов благодаря явлению термоэлектронной эмиссии, т. е. вылету электронов из разогретого материала.

Под действием приложенного к электродам напряжения U поток электронов с высокой скоростью устремляется к аноду. Рассмотрим этот процесс.

Кинетическая энергия потока электронов

$$W = 0,5mV^2N, \quad (2.1)$$

где $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса одного электрона; V — скорость движения электрона, м/с; N — количество электронов в потоке.

Работа, совершаемая потоком электронов под действием силы поля при напряжении U ,

$$A = eUN, \quad (2.2)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; U — напряжение между анодом и катодом.

Поскольку $W = A$, то согласно (2.1) и (2.2) скорость движения потока электрона, м/с,

$$V = \sqrt{2/m/e/U} \approx 0,6 \cdot 10^6 \sqrt{U}. \quad (2.3)$$

Ток электрического потока в вакуумной трубке

$$I = eN/t,$$

где t — время движения потока электронов.

Приведем пример расчета при следующих исходных данных: $U = 300$ В, $N = 10^{19}$, $t = 1$ с. Подставив данные значения в (2.1)–(2.3), получим:

- энергия движущегося потока электронов $W = A = 48$ Дж;
- скорость его движения $V = 10^7$ м/с;
- ток $I = 1,6$ А;
- мощность источника, присоединенного к трубке, $P = 48$ В.

Теперь отсоединим нить накала, а эмиссию электронов будем вызывать, направив на катод световое излучение с разной длиной волны (рис. 2.2). Примерное по такому плану действовали физики, начавшие изучать воздействие света на различные материалы.

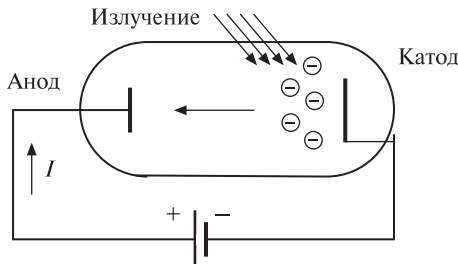


Рис. 2.2. Вакуумная трубка при эксперименте с внешним фотоэффектом