

*Концентраторы
солнечной энергии*

УДК 662.997.517

Ш.И. КЛЫЧЕВ

**ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ
ИЗЛУЧЕНИЯ (СОЛНЕЧНОЕ, СВЕТОВОЕ) В ОПТИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Рассмотрены особенности концентрации для случая, когда система концентратор и источник находятся в среде с показателем преломления n больше 1. Показано, что для случая концентрации в фокусе поле концентрации может характеризовать источник с угловым радиусом, равным угловой апертуре концентратора U . Получено, что, концентрация в среде существенно отличается от концентрации на воздухе и это зависит также от формы источника излучения (плоская, объемная). Разработана фотометрическая модель и программа на ПК, учитывающая особенности концентрации в среде с $n > 1$. На основе численных исследований показано: для шарового источника излучения концентрация на воздухе и в среде будет всегда одинаковы (следует из условия сохранения энергии); для плоского источника концентрация в среде до некоторых апертур U постоянна, а далее, она становится больше концентрации на воздухе в n^2 раз.

В работе [1] было показано, что применение оптических сред, как вторичных концентраторов позволяет увеличивать плотности потоков излучения в фокусе первичного концентратора пропорционально квадрату показателя преломления среды. При этом представляет практический интерес случай, когда концентратор и приемник находятся в среде с показателем преломления $n > 1$. Эксперименты показали, что для этого случая общепринятая фотометрическая модель концентрации не согласуется с экспериментом. Так, для точки фокуса поле излучения концентратора может имитироваться источником с угловой апертурой U , равной угловой апертуре концентратора. При этом облученность в "фокусе" системы плоский источник – приемник (см. рис. 1а) на воздухе будет равна

$$E = B * \pi * \sin^2 U, \quad (1)$$

где B – яркость излучения источника

В случае, когда плоский источник находится на воздухе, а приемник в среде с показателем преломления n_1 , то в пределе, без учета френелевских потерь, когда источник находится на границе среды, облученность будет равна

$$E_1 = n_1^2 * B * \pi * \sin^2 U. \quad (2)$$

А когда источник и приемник находятся в одной среде с $n > 1$, облученность, согласно фотометрических положений должна определяться по (2). Однако эксперименты [2] показали, что для плоского источника конечных размеров при малых расстояниях L между приемником и источником (или при $U \rightarrow 90$) отношение $E_1/E = 1$, а с уменьшением U (увеличение L) отношение E_1/E начинает расти и уже на некотором конечном расстоянии L (см. рис. 1а) оно практически становится $E_1/E = n^2$. Также было показано, что в среде с $n > 1$ поток излучения сжимается, что возможно связано с изменением индикатрисы излучения источника в среде.

Рассмотрение особенностей концентрации, когда источник излучения (плоский, шаровой) и приемник находятся в среде с $n > 1$ – цель настоящей работы.

Рассмотрим сначала случай $U \rightarrow 90$. Как, известно, что в среде с $n > 1$ яркость излучения по сравнению с яркостью на воздухе возрастает в n^2 раз, при этом действительно, равенство E_1 и E возможно только, когда видимый размер источника в среде уменьшается. Это может происходить, если в среде индикатриса излучения источника уменьшается (с точки зрения фотометрии физических изменений в системе не происходит). Отметим, что практически все источники излучения

(кроме плазменных) представляют собственно источник излучения (светящееся тело), который помещается в прозрачную колбу (см. рис. 1б).

При этом, как следует из хода лучей (см. рис. 1б) уменьшение телесного угла излучения на выходе из колбы действительно может иметь место. Так, не нарушая общности рассмотрения, можем считать, что стенка колбы плоская, или что нормали наружной и внутренней стенки совпадают. В этом случае из закона преломления следует, что угол выхода луча из колбы i_c определяется из выражения

$$\sin i_c = (n_a/n_c) \cdot \sin i_a \tag{3}$$

Обычно, среда, в которой находится светящееся тело, имеет показатель преломления близкий к 1. В этом случае максимальное значение i_a равно 90° , и выражение (3) для максимального угла выхода лучей из колбы приобретает вид

$$\sin i_c = 1/n_c \tag{4}$$

Так из (4) при $n_c = 1$ (источник на воздухе) $i_c = 90^\circ$, а например, при $n_c = 1.33$ (источник в воде) $i_c = 48.75^\circ$, т.е. угол выхода уменьшается практически в два раза.

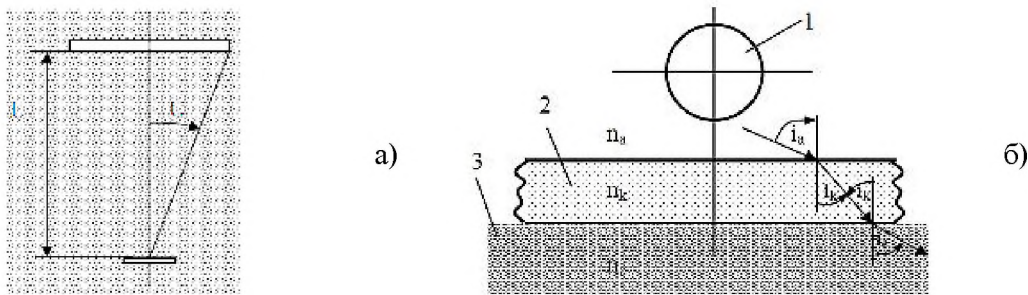


Рис. 1. Схема концентрации в среде (а) и (б) схема выхода лучей из источника (1 – светящееся тело; 2 – стенка колбы; 3 – среда) в среду и n_a , n_k , n_c – показатели преломления, соответственно, – среды окружающей светящееся тело, материала колбы и среды, в которой находятся колба и приемник.

Таким образом, в среде индикатриса излучения сужается, и это объясняет результаты эксперимента в [2]. Также следует, что характер изменения облученности от расстояния L на воздухе и в среде с $n > 1$ будут отличаться. Так, в среде с $n > 1$ до угловых апертур источника $i_c < U$ облученность в среде должна быть постоянна и равна $E_1 = n^2 \cdot V \cdot \sin^2 i_c$ (для ясности рассмотрения френелевские потери на границе колбы и среды не учитываются). Отсюда следует, что в численных фотометрических моделях концентрации излучения, для случая, когда источник излучения находится в среде с $n > 1$ необходимо учитывать углы выхода лучей из колбы в среду. Результаты расчета облученности на основе фотометрической модели, в которую введен блок учета углов выхода лучей из оболочки плоского источника в среде с $n > 1$ приведены на рис. 2.

Как видно, действительно для плоского источника характер изменения облученности от L в среде с $n > 1$ и на воздухе существенно различаются. Для угловых апертур источника U , при $U > i_c$ она постоянна. Далее при $U \leq i_c$ угловые апертуры источника на воздухе и в среде становятся одинаковыми ("видны" одинакового размера) и облученность в среде может определяться по (2), и как видно в этой области U она будет больше облученности на воздухе на n_c^2 . Практическое значение этой особенности в том, что оно должна учитываться при определении коэффициента поглощения среды фотометрическими способами.

Рассмотрим теперь облученности, создаваемые сферическим (объемным) источником излучения в среде. Предварительный анализ показывает, что в среде с $n > 1$ между облученностью, создаваемой плоским и объемным источником излучения, могут быть принципиальные различия. Это, в частности следует из схемы на рис. 3а, где приведен шаровой источник, окруженный сферическим приемником. Так, из закона сохранения энергии следует,

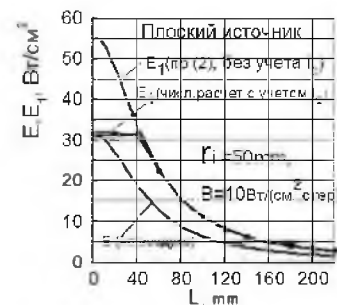


Рис. 2. Облученности на оси источника излучения при различных L , на воздухе (E , по (1)) и в среде E_1 : расчет по численной модели, без учета френелевских потерь; по (2) – кривая " без учета i_c ".

что независимо от показателя преломления прозрачной среды n между источником и приемником средняя плотность энергии по поверхности приемника должна быть одинакова, т. е. не зависит от n . Этот вывод, как и в случае с плоским источником в среде возможен, только если будет изменяться индикатриса излучения (уменьшаться с увеличением n). Но, если для плоского источника, с некоторых расстояний L увеличение облученности в среде будет иметь место, то для сферического источника облученность на воздухе и в среде будут всегда одинаковые, независимо от расстояния L .

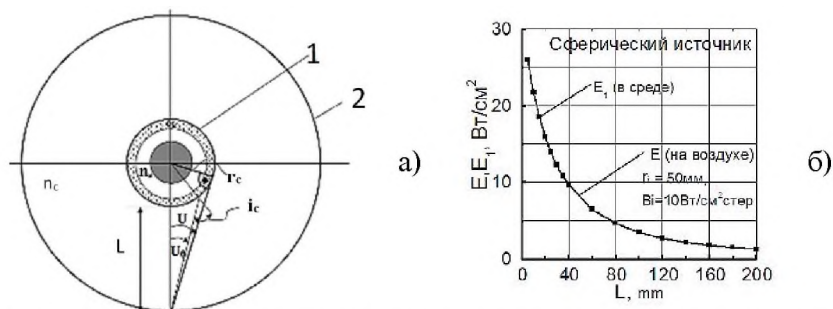


Рис. 3. Схема к определению средней плотности потока от шарового источника 1 на поверхности сферического приемника 2.

Результаты численного исследования этого вопроса на основе разработанной выше фотометрической модели, дополненной блоком учета углов выхода лучей, приведены на рис. 4. Как видно, облученности на воздухе и в среде для сферического приемника совпадают, что, в частности, показывает и правильность разработанной фотометрической модели. При этом из равенства облученности в среде и на воздухе для сферического источника следует (см. рис. 3а), что

$$\sin^2 U = n_c^2 \sin^2 U_c. \quad (5)$$

Из (5) следует связь между угловой апертурой источника на воздухе U и его угловой апертурой в среде U_c , или

$$\sin U_c = \sin U / n_c. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что для случая сферического (объемного источника) "видимый" угловой размер источника всегда меньше углового размера источника на воздухе. Отметим, что для плоского источника до $U > i_c$ "видимый" угловой размер источника в среде величина постоянная и равная $\arcsin(1/n_c)$, далее, при $U \leq i_c$ угловые апертуры источника на воздухе и в среде становятся одинаковыми, или $U_c = U$.

В заключение можно отметить следующее:

1. Определены особенности концентрации для случая, когда источник и приемник находятся в среде с показателем преломления $n > 1$, получена зависимость характера изменения облученности от формы источника излучения.

2. Разработана и реализована фотометрическая модель расчета облученности, учитывающая особенности концентрации в средах с $n > 1$.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Klychev Sh. I. Solar-Radiation Concentration in the Fresnel Lens: an Optical Medium System, Applied Solar Energy. 2013. V. 49. N 2. pp. 83–85. [2] Клычев Ш.И., Бахрамов С.А. Эффекты повышения яркости излучения системы источник-приемник в оптической среде. Рес. конф. «Фунд. и прикл. вопросы физики», посвященная 100-летию академика Азимова С.А. Ташкент. 6-7 ноября. 2014. С 193-194.