

К вопросу определения пространственного распределения силы эритемного излучения при проектировании облучательных установок

М.В. Абрамов, Л.В. Синицына, Д.Н. Безруков, А.В. Якубов,

И.И. Гордин, И.А. Котлов

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

Аннотация: Для разработки автоматизированных систем проектирования ультрафиолетовых облучателей, предназначенных для компенсации недостатка естественного ультрафиолета, критически важно знать пространственное распределение эритемной силы излучения. Однако, на российском рынке отсутствуют подходящие датчики для прямого измерения этой величины. В связи с этим, рассматривается альтернативный способ определения эритемной силы излучения, не требующий использования специализированных, эритемно-чувствительных приемников. Способ основан на получении пространственного распределения эритемной силы излучения за счет учета кривой относительной спектральной эритемной эффективности излучения и предварительных измерений на гониорадиометрической установке распределения энергетической освещённости в областях УФ-А (320 – 400 нм), УФ-В (280 – 320 нм) и относительного спектрального распределения излучения облучателя или источника излучения для одного произвольно выбранного направления в диапазоне длин волн 280 – 400 нм.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение; эритемное излучение; облучательные установки; метод измерения, сила излучения; пространственное распределение эритемной силы излучения, способ.

Ультрафиолетовое излучение в современности находит широкое практическое применение. Оно используется для получения информации о ходе синтеза материалов при помощи УФ-Вид спектроскопии [1], более короткое излучение в диапазоне УФ-С оказывает бактерицидное действие и применяется в рециркуляторах для обеззараживания воздуха, установках для обеззараживания воды [2]. Также положительное влияние ультрафиолетовое излучение оказывает и на растения: совсем недавно был открыт рецептор УФ-излучения (UVR8), поглощающий оптическое излучение в УФ-В диапазоне, и влияющий на усиление иммунитета у растений и биосинтез хлорофиллов, каротиноидов и антоцианов. Помимо этого, уменьшенные дозы УФ-А излучения не вызывают стресс у растений и могут оказывать благоприятное действие на рост и развитие [3]. В настоящее время отмечается рост интереса к применению профилактического

ультрафиолетового облучения (УФО) в диапазоне длин волн 320-400 нм для повышения резистентности организма к различным заболеваниям [4]. Дефицит УФ-излучения, характерный для зимнего периода и северных широт, приводит к снижению иммунного статуса и увеличению заболеваемости населения. Гигиенические нормативы являются основой для безопасного и эффективного применения УФО в профилактических целях.

Так, согласно СП 2.2.1.1312–03 «Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий» для компенсации ультрафиолетовой недостаточности в помещениях без естественного освещения (а также в климатогеографической зоне выше 57,5 град. северной широты) необходимо предусматривать использование ультрафиолетовых облучательных установок длительного действия (совмещенных с осветительными установками) или облучательных установок кратковременного действия (фотарии).

Опыт проектирования и применения искусственных источников ультрафиолетового излучения в облучательных установках показывает, что необходимы не только определенная коррекция в отношении доз и способов использования, но и, что важно, разработка методов измерения характеристик светильников-облучателей, имеющих в спектре эритемное излучение. Последнее является весьма актуальным для автоматизированного проектирования ультрафиолетовых облучательных установок и осуществления других профилактических мероприятий, имеющих целью восполнить недостаточность природного ультрафиолетового излучения.

Цель исследований – разработать способ, позволяющий получать пространственное распределение эритемной силы излучения за счет учета кривой относительной спектральной эритемной эффективности излучения и предварительного измерения спектрального распределения излучения облучателя или источника излучения.

Определить эритемную силу излучения можно, основываясь на способе определения пространственного распределения силы излучения и силы света. Распределение силы света определяется путем последовательного измерения освещенности под разными углами [5]. Гониофотометр обеспечивает точное позиционирование и поворот источника света на заданный угол (шаг), а фотоприемное устройство, с фотометрической головкой, скорректированной под спектральную чувствительность человеческого глаза, измеряет освещенность. Полученные значения освещенности умножаются на квадрат расстояния фотометрирования для вычисления силы света в каждом направлении (ГОСТ Р 55702 – 2020 «Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров»).

Если рассматривать способы определения пространственного распределения силы излучения, то в этом случае в составе гониорадиометрического комплекса [6] для измерения энергетической освещенности используется приемная радиометрическая головка, у которой коррекция под функцию относительной спектральной световой эффективности излучения отсутствует. Минимальное расстояние фотометрирования зависит не только от соотношения расстояния фотометрирования и размера источника излучения (в общем случае оно должно составлять не менее пяти габаритных размеров источника излучения), но и от пространственно-угловых характеристик приемной радиометрической головки.

Гониометрический метод характеризует пространственное распределение силы излучения путем измерения распределения энергетической освещенности, создаваемой источником, на сферической поверхности радиуса D . Полученные данные, представленные в системе координат C, γ , позволяют определить угловую зависимость силы излучения.

Диапазон измерения в меридиональных полуплоскостях находится в пределах от 0° до 180° ; диапазон измерения в экваториальной плоскости – в пределах от 0° до 360° (ГОСТ Р 70380-2022. «Лампы ультрафиолетовые бактерицидные низкого давления. Методы измерений энергетических характеристик ультрафиолетового излучения и электрических параметров»).

Для получения пространственного распределения эритемной силы излучения необходимо измерить на гониорадиометрической установке распределение энергетической освещённости по сфере, окружающей источник (облучатель) в областях УФ-А (320 – 400 нм): $E_A(\theta, \varphi)$; УФ-В (280 – 320 нм): $E_B(\theta, \varphi)$. Также с помощью спектрорадиометра [7, 8] необходимо получить относительное спектральное распределение излучения $E_{\text{отн}}(\lambda)$ для одного произвольно выбранного направления в диапазоне длин волн 280 – 400 нм. Для автоматизации выполнения расчетов можно использовать язык программирования Python [9].

Далее определяется коэффициент преобразования энергетических величин в эритемные. Относительное спектральное распределение излучения анализируется путем разделения на области УФ-А и УФ-В. После этого, на основе полученного распределения, вычисляется доля излучения источника в диапазоне УФ-А (в относительных единицах).

$$S_{\text{отн}} = \int_{320}^{400} E_{\text{отн}}(\lambda) d\lambda,$$

где $E_{\text{отн}}(\lambda)$ – относительное спектральное распределение интенсивности излучения;

λ – длина волны.

Вычисляется относительная величина эритемной эффективности излучения источника в области спектрального перекрытия с кривой

эритемного действия в диапазоне УФ-А (ГОСТ Р МЭК 61228-2014. «Лампы люминесцентные ультрафиолетовые для загара. Метод измерения и определения характеристик»).

$$S_{\text{эр}} = \int_{320}^{400} E_{\text{отн}}(\lambda) \cdot V_{\text{эрА}}(\lambda) d\lambda,$$

где $V_{\text{эрА}}(\lambda)$ – спектр действия эритемы в области УФ-А (рис. 1.).

Преобразование энергетической освещенности в составляющую эритемной облученности в области УФ-А производится следующим образом:

$$E_{\text{А эр}}(\theta, \varphi) = E_{\text{А}}(\theta, \varphi) \cdot \frac{S_{\text{эр}}}{S_{\text{отн}}},$$

где $E_{\text{А}}(\theta, \varphi)$ – сигнал радиометрической головки в данном направлении.

Аналогичная последовательность расчетов выполняется для диапазона излучения УФ-В (спектр действия эритемы в области В представлен на рис.2.).

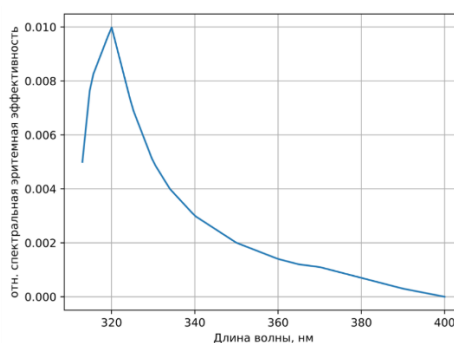


Рис. 1. – Зависимость относительной спектральной эритемной эффективности излучения от длины волны в диапазоне УФ-А

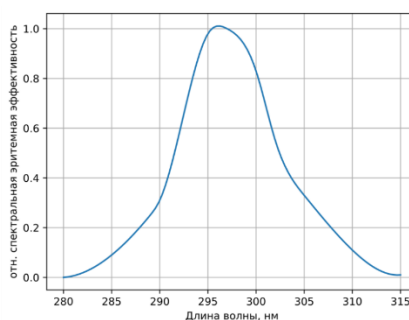


Рис. 2. – Зависимость относительной спектральной эритемной эффективности излучения от длины волны в диапазоне УФ-В

Итоговая эритемная облученность определяется суммированием двух полученных значений в областях УФ-А и УФ-В:

$$E_{\text{эр}}(\theta, \varphi) = E_{A \text{ эр}}(\theta, \varphi) + E_{B \text{ эр}}(\theta, \varphi)$$

Определение эритемной силы излучения производится по формуле закона квадрата расстояния:

$$I_{\text{эр}}(\theta, \varphi) = E_{\text{эр}}(\theta, \varphi) \cdot D^2$$

где D – расстояние фотометрирования.

Особенность способа заключается в том, что в составе гониорадиометрического комплекса для измерения энергетической освещенности используются две радиометрические головки, которые предназначены для измерения в двух диапазонах ультрафиолетовой области спектра – УФ-А и УФ-В, причем радиометрические головки не скорректированы под функцию относительной спектральной эритемной эффективности излучения.

Для получения относительного спектрального распределения излучения в диапазонах УФ-А и УФ-В проводятся измерения с помощью спектрорадиометра. На основе полученных данных осуществляется преобразование пространственного распределения силы излучения в диапазонах УФ-А, УФ-В в пространственное распределение силы эритемного излучения.

Практическая значимость предлагаемого способа заключается в том, что он позволяет получать пространственное распределение эритемной силы излучения за счет учета кривой относительной спектральной эритемной эффективности излучения и предварительного измерения спектрального распределения излучения облучателя или источника излучения. Данный способ позволит обеспечить возможность определения эритемной силы излучения в условиях отсутствия приемников излучения, скорректированных под кривую относительной спектральной эритемной эффективности излучения. Полученные данные могут быть использованы специалистами для автоматизированного проектирования облучателей и облучательных установок как длительного действия (совмещенных с осветительными установками), так и кратковременного (фотарии) с заранее заданными параметрами эритемного излучения [10].

Литература

1. Киричков М.В., Русалев Ю.В., Чарыков К.М. Создание и эксплуатация нагревательной ячейки для двухлучевого спектрофотометра SHIMADZU UV-2600. // Инженерный вестник Дона. 2017. №2. URL: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4223.
2. Вассерман А.Л. Измерение бактерицидного потока ультрафиолетовых трубчатых ртутных ламп низкого давления. // Светотехника. 2019. №1. С. 69-71.

3. Прикупец Л.Б., Боос Г.В. Облучательные установки в сельском хозяйстве. М.: Редакция журнала «Светотехника». 2023. 136 с.
 4. Вассерман, А.Л., Скопин А. Ю. Двухфункциональные бактерицидные рециркуляторы для обеззараживания воздуха и эритемного облучения или освещения помещения. // Светотехника. 2021. №1. С. 69-73.
 5. Abramov M.V., Prytkov S.V., Poldina J.S., Pankratov A.A. Colorimetric characteristics of led luminaire evaluation in dependence on scanning parameters of spectrogonioradiometer. // Light & Engineering. 2025. Т. 33. №1. pp. 32-38.
 6. Абрамов М.В., Тертычный М.С., Прытков С.В. Разработка УФ – гониорадиометра для измерения оптических и электрических характеристик эритемных ламп // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. 2024. №9. С. 690-692.
 7. Столяревская Р.И. Обзор особенностей использования мини-спектрорадиометров с ПЗС-матрицами в прикладной фотометрии. // Светотехника. 2020. №6. С. 12-18.
 8. Stolyarevskaya R.I. Review of the features of using mini-spectroradiometers with ccd-arrays in applied photometry. // Light & Engineering. 2021. Т. 29. №1. pp. 21-29.
 9. Johansson R. Numerical python. A practical techniques approach for industry. New York: Apress. 2015. 503 p.
 10. Прытков С.В., Абрамов М.В., Гордин И.И., Котлов И.А. Разработка методики расчета и проектирования облучательных установок, применяемых для борьбы с ультрафиолетовой недостаточностью. // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. №11. С. 128-131.
-



References

1. Kirichkov M.V., Rusalev Yu.V., Charykov K.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4223.
2. Wasserman, A.L. Svetotekhnika. 2019. №1. Pp. 69-71.
3. Prikupets L.B., Boos G.V. Obluchatel'nye ustanovki v sel'skom hozyajstve [Irradiation installations in agriculture]. M.: Redakciya zhurnala "Svetotekhnika". 2023. 136 p.
4. Wasserman, A.L., Skopin A. Yu. Svetotekhnika. 2021. №1. Pp. 69-73.
5. Abramov M.V., Prytkov S.V., Poldina J.S., Pankratov A.A. Light & Engineering. 2025. T. 33. №1. Pp. 32-38.
6. Abramov M.V., Tertychny M.S., Prytkov S.V. Priborostroenie i avtomatizirovannyj elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve. 2024. №9. Pp. 690-692.
7. Stolyarevskaya R.I. Svetotekhnika. 2020. №6. Pp. 12-18.
8. Stolyarevskaya R.I. Light & Engineering. 2021. T. 29. №1. Pp. 21-29.
9. Johansson R. Numerical python. A practical techniques approach for industry. New York: Apress. 2015. 503 p.
10. Prytkov S.V., Abramov M.V., Gordin I.I., Kotlov I.A. Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya. 2024. №11. Pp. 128-131.

Дата поступления: 6.05.2025

Дата публикации: 22.06.2025