

Управление качеством продукции. Стандартизация
Product quality management. Standardization

УДК 681.2.083:535.2:543.063
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-123-132>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Контроль качества средств измерений характеристик бактерицидного УФ-излучения

О.А. Минаева ^{1, @}, А.В. Рагуткин ¹, С.И. Аневский ¹, Р.В. Минаев ²,
Т.Ч. Минь ¹, И.А. Романова ¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Электростекло, Москва, 119571 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

Резюме

Цели. Контроль качества средств измерений бактерицидной освещенности ультрафиолетового (УФ) излучения основан на исследовании основных метрологических характеристик, включающих угловую и спектральную чувствительность, диапазон линейности, абсолютную калибровку в единицах энергетической освещенности. Наибольшее влияние на предел допускаемой погрешности оказывают отклонения угловой чувствительности средств измерений от идеальной косинусной характеристики, приводящие к искажению результатов измерений и существенной разнице в показаниях приборов. Целью работы является повышение точности средств измерений при решении метрологических задач определения энергетической освещенности бактерицидного излучения.

Методы. Эффективным методом решения проблемы является введение коэффициентов коррекции угловой чувствительности радиометров, спектрометрических и дозиметров, значения которых рассчитываются по результатам измерений чувствительности на гониометре при испытаниях средств измерений. Большую роль играет использование компьютерных моделей и цифровых двойников средств измерений на основе результатов исследований метрологических характеристик радиометров с использованием программного обеспечения, включающего моделирование измерительной задачи.

Результаты. Исследование угловой зависимости чувствительности бактерицидных УФ-радиометров на гониометре и анализ результатов измерений, полученных другими авторами, позволяют по отклонению угловой чувствительности средств измерений энергетической освещенности бактерицидного излучения от стандартной косинусной зависимости определить значение коэффициентов коррекции угловой чувствительности.

Выводы. Отклонения угловой зависимости чувствительности УФ-радиометров бактерицидного излучения от косинусной характеристики приводят к существенному занижению результатов измерений энергетической освещенности от протяженных излучателей. Эффективным решением проблемы является использование коэффициентов цифровой угловой коррекции чувствительности средств измерений энергетической освещенности бактерицидного излучения, определяемых при испытаниях. При оценке качества радиометров, спектрометрических и дозиметров бактерицидного излучения неполный контроль основных метрологических характеристик средств измерений создает риски серьезных ошибок в результатах измерений энергетической бактерицидной освещенности.

Ключевые слова: коррекция угловой чувствительности, радиометры, спектрометрические, спектральная чувствительность, бактерицидные установки

• Поступила: 01.11.2023 • Доработана: 03.11.2023 • Принята к опубликованию: 11.12.2023

Для цитирования: Минаева О.А., Рагуткин А.В., Аневский С.И., Минаев Р.В., Минь Т.Ч., Романова И.А. Контроль качества средств измерений характеристик бактерицидного УФ-излучения. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):123–132. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-123-132>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Quality control of instruments for measuring the characteristics of bactericidal UV radiation

Olga A. Minaeva ^{1, @}, Alexander V. Ragutkin ¹, Sergei I. Anevsky ¹,
Roman V. Minaev ², Thanh T. Minh ¹, Inna A. Romanova ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Elektrosteklo, Moscow, 119571 Russia

@ Corresponding author, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

Abstract

Objectives. Quality control of instruments for measuring bactericidal irradiance of ultraviolet (UV) radiation is based on studying the main metrological characteristics. These characteristics include: angular and spectral sensitivity; linearity range; and absolute calibration in irradiance units. Deviations of the angular sensitivity of measuring instruments from the ideal cosine characteristic can significantly impact error estimation. They can also lead to the distortion of measurement results and a significant difference in instrument readings. The aim of this work is to enhance accuracy in resolving metrological problems of determining irradiance of bactericidal radiation.

Methods. An effective method of resolving this problem is to introduce correction coefficients for the angular sensitivity of radiometers, spectroradiometers and dosimeters. The values are calculated based on the results of measurements on the goniometer when testing measuring instruments. An important role is played by computer models and digital twins of measuring instruments based on the results of studies of the metrological characteristics of radiometers by means of software. This includes modeling the measuring task.

Results. The study of angular dependence of bactericidal UV radiometer sensitivity complemented by an analysis of measurement results obtained by other authors allows determining the value of the angular sensitivity correction coefficients by the deviation of the angular sensitivity of the irradiance measuring instruments of bactericidal radiation from the standard cosine dependence.

Conclusions. Deviations of the angular dependence of bactericidal radiation UV radiometer sensitivity from the cosine characteristic lead to a significant underestimation of the irradiance measurements results from extended emitters. An effective solution is the use of digital angular sensitivity correction coefficients to measure the irradiance of bactericidal radiation determined during tests. When assessing the quality of radiometers, spectroradiometers and dosimeters for bactericidal radiation, incomplete control of the main metrological characteristics of the measuring instruments creates risks of serious errors in the measurement results of bactericidal irradiance.

Keywords: angular sensitivity correction, radiometers, spectroradiometers, spectral sensitivity, bactericidal installation

• Submitted: 01.11.2023 • Revised: 03.11.2023 • Accepted: 11.12.2023

For citation: Minaeva O.A., Ragutkin A.V., Anevsky S.I., Minaev R.V., Minh Th.T., Romanova I.A. Quality control of instruments for measuring the characteristics of bactericidal UV radiation. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):123–132. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-123-132>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Использование бактерицидных облучательных установок в медицине, фотобиологии, фотохимии, фармакологии, особенно во время пандемии COVID-19, показало необходимость повышения требований к контролю качества ультрафиолетовых излучателей, а также средств измерений энергетической и эффективной бактерицидной освещенности¹.

В бактерицидных комплексах в качестве источников ультрафиолетового (УФ) излучения применяются трубчатые ртутные лампы низкого давления, более 60% потока излучения которых приходится на резонансную линию с длиной волны 253.7 нм, лежащую в диапазоне максимального бактерицидного действия УФ-излучения от 230 до 300 нм [1]. Преимущества использования ртутных ламп низкого давления связаны с положением максимума бактерицидного действия УФ-излучения при деструктивно-модифицированных повреждениях ДНК и РНК, соответствующих длине волны 265 нм. В настоящее время наряду с ртутными лампами низкого давления все большее применение находят бактерицидные УФ-облучатели на основе ксеноновых импульсных излучателей, светодиодов, ртутных ламп высокого давления [2].

ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ БАКТЕРИЦИДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для обеспечения качества бактерицидных облучательных установок необходимо проводить контроль основных радиометрических характеристик, включающих спектральную плотность потока излучения бактерицидного излучения, энергетическую освещенность, экспозиционную дозу, фотобиологическую опасность, а также скорость снижения потока бактерицидного излучения. Для контроля одной из основных характеристик УФ-излучателей – энергетической эффективной бактерицидной освещенности – в качестве средств измерений используются радиометры, спектрометрические и дозиметры² [3–5]. Проблемам формирования метрологических характеристик средств измерений бактерицидной эффективной освещенности посвящены разработанные на основании исследований национальных метрологических институтов нормативно-технические документы, в которых содержатся требования к обеспечению качества измерений^{3, 4, 5, 6}.

Комплексный подход к управлению качеством средств измерений характеристик бактерицидного УФ-излучения включает:

- оптимизацию методов контроля качества УФ-радиометров на протяжении периода

¹ Clark M., Zuber R., Ribnitzky M. *Far UV-C Germicidal Sources: Measurement Challenges and Solutions*. *UV Solutions*. 2022. <https://uvsolutionsmag.com/articles/2022/far-uv-c-germicidal-sources-measurement-challenges-and-solutions/>. Дата обращения 01.11.2023. / Accessed November 01, 2023.

² Miller C.C. *UVC Measurement Methods & UVC Documentary Standard Development*. National Institute of Standards and Technology. Washington, DC: U.S. Department of Energy; 2022. https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/ssl-rd22_miller_guv.pdf. Дата обращения 01.11.2023. / Accessed November 01, 2023.

³ ГОСТ Р 8.760-2011 ГСИ. *Измерение энергетических и эффективных характеристик ультрафиолетового излучения бактерицидных облучателей. Методика измерений*. М.: Стандартинформ; 2019. <https://docs.cntd.ru/document/1200095426>. Дата обращения 01.11.2023. [GOST R 8.760-2011. *State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurement of energy and the effective characteristics ultraviolet radiation germicidal irradiators. Procedure of measurements*. Moscow: Standartinform; 2019 (in Russ.). <https://docs.cntd.ru/document/1200095426>. Accessed November 01, 2023.]

⁴ РМГ 70-2003. ГСОЕИ. *Характеристики ультрафиолетового излучения бактерицидных облучателей. Методика выполнения измерений*. М.: ИПК Издательство стандартов; 2004. <https://docs.cntd.ru/document/1200037656>. Дата обращения 01.11.2023. [RMG 70-2003. GSOEI. *Characteristics of ultraviolet radiation of bactericidal irradiators. Methodology for performing measurements*. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov; 2004 (in Russ.). <https://docs.cntd.ru/document/1200037656>. Accessed November 01, 2023.]

⁵ Р 50.2.018-2001. ГСОЕИ. *Средства измерений характеристик ультрафиолетового излучения бактерицидных облучателей. Методика поверки*. М.: Госстандарт; 2001. <https://docs.cntd.ru/document/1200029414>. Дата обращения 01.11.2023. [R 50.2.018-2001. GSOEI. *Measuring instruments of ultraviolet radiation characteristics of bactericidal irradiators. Methods of verification*. Moscow: Gosstandart; 2001 (in Russ.). <https://docs.cntd.ru/document/1200029414>. Accessed November 01, 2023.]

⁶ *Ultraviolet air disinfection*. Techn. Report CIE Central Bureau. Vienna. Austria: 2003.

эксплуатации средств измерений с использованием цифровых технологий при поверке и калибровке;

- управление рисками и возможностями при измерении бактерицидной освещенности за счет определения характеристик средств измерений в соответствии с практической измерительной задачей;
- разработку методов статистического контроля качества и потребительской оценки средств измерений бактерицидной освещенности;
- применение компьютерных моделей для оценки качества средств измерений при подтверждении соответствия существующим техническим регламентам и стандартам.

Несоблюдение требований стандартов и рекомендаций при практических измерениях приводит к различиям в показаниях приборов разных типов, потере точности и достоверности результатов измерений. Разработка стандартов и рекомендаций, распространяющихся на методы контроля качества средств измерений характеристик бактерицидного излучения, проводится техническими комитетами по стандартизации Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии⁷. К основным метрологическим характеристикам, определяющим качество средств измерений бактерицидного излучения, относятся: угловая зависимость чувствительности радиометра, спектральная зависимость чувствительности, диапазон линейности, а также абсолютная калибровка в единицах энергетической освещенности, которые сличают с государственными первичными эталонами в соответствии с утвержденными государственными поверочными схемами.

При оценке качества радиометров, спектрорадиометров и дозиметров бактерицидного излучения неполный контроль основных метрологических характеристик средств измерений создает риски серьезных ошибок в результатах измерений энергетической бактерицидной освещенности. На точность средств измерений характеристик бактерицидного излучения существенное влияние оказывает отклонение относительной спектральной чувствительности радиометра от относительной бактерицидной эффективности УФ-излучения. В работах по оценке качества средств измерений характеристик бактерицидного излучения, выполняемых в национальных метрологических институтах, особое внимание уделяется одной из наиболее важных характеристик — угловой зависимости чувствительности, отклонение которой от идеальной косинусной характеристики вносит основной вклад в результирующую погрешность результатов измерений [6–8].

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДИОМЕТРОВ БАКТЕРИЦИДНОГО УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Решение задачи коррекции угловой зависимости чувствительности средств измерений имеет особенно важное значение при контроле энергетической освещенности от нескольких источников излучения, а также при оценке бактерицидной эффективности протяженных УФ-излучателей и габаритных панелей. При отклонении падающего на приемную поверхность радиометра УФ-излучения от нормали сигнал радиометра уменьшается, т.к. площадь проекции фотоприемника в направлении падающего потока уменьшается в соответствии с косинусной зависимостью. Проблемы обеспечения точности и достоверности результатов практических измерений энергетической освещенности бактерицидного излучения связаны с тем, что коммерчески доступные радиометры имеют угловую зависимость чувствительности, которая существенно отличается от идеальной косинусной зависимости чувствительности. Для контроля угловой чувствительности радиометров, спектрорадиометров и дозиметров УФ-излучения используются гониометры различных типов [9].

Обеспечение требуемой угловой коррекции чувствительности приемников коротковолнового УФ-излучения в составе радиометров, спектро-радиометров и дозиметров является технически сложной задачей и требует разработки специальных устройств. На рис. 1 представлена угловая зависимость чувствительности различных типов бактерицидных УФ произвольно взятых радиометров № 1, № 2 и № 3, а также идеальная косинусная зависимость чувствительности $\cos \varphi$ [7, 10].

В соответствии с графиками снижение чувствительности радиометра № 2 достигает 50%, если угол падения излучения на приемную поверхность радиометра $\varphi = 30^\circ$, а при угле падения 45° снижение чувствительности достигает 75%. Чувствительность радиометра № 1 полностью отсутствует при углах падения, превышающих 75° , что ограничивает применение в системах очистки воды на малых расстояниях от излучателя. В области больших углов падения излучения, при резком снижении уровней сигналов радиометра, пропорциональных чувствительности, существенно возрастает влияние рассеянного излучения на результаты измерений относительной угловой чувствительности радиометра.

Общий вид гониометра для измерений зависимости чувствительности радиометров от угла падения УФ-излучения представлен на рис. 2.

⁷ <https://www.rst.gov.ru/portal/gost> (in Russ.). Дата обращения 01.11.2023. / Accessed November 01, 2023.

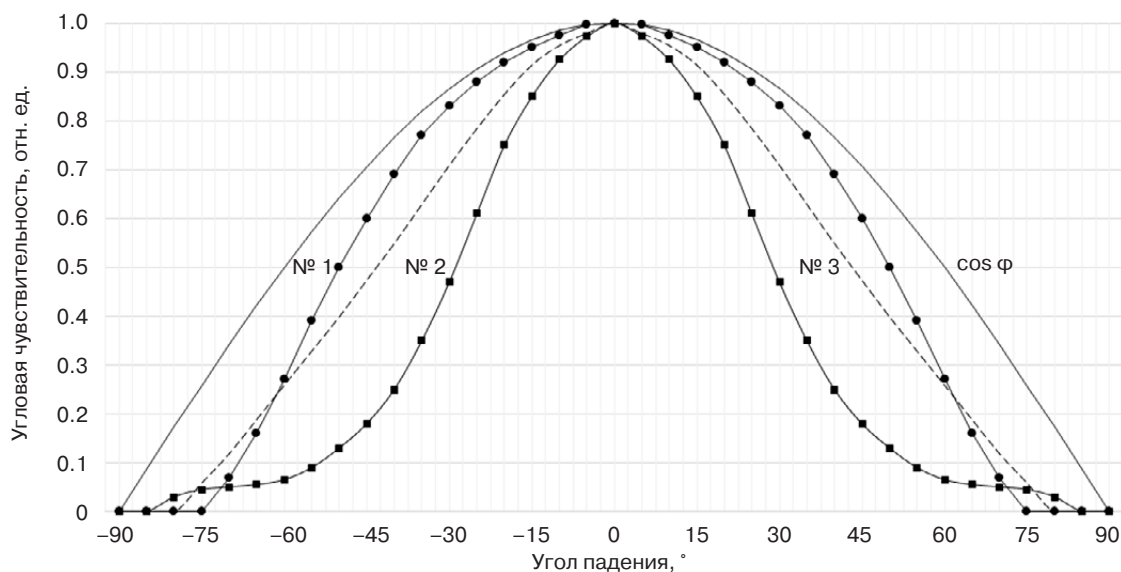


Рис. 1. Угловая зависимость чувствительности различных типов бактерицидных УФ-радиометров и идеальная косинусная зависимость чувствительности

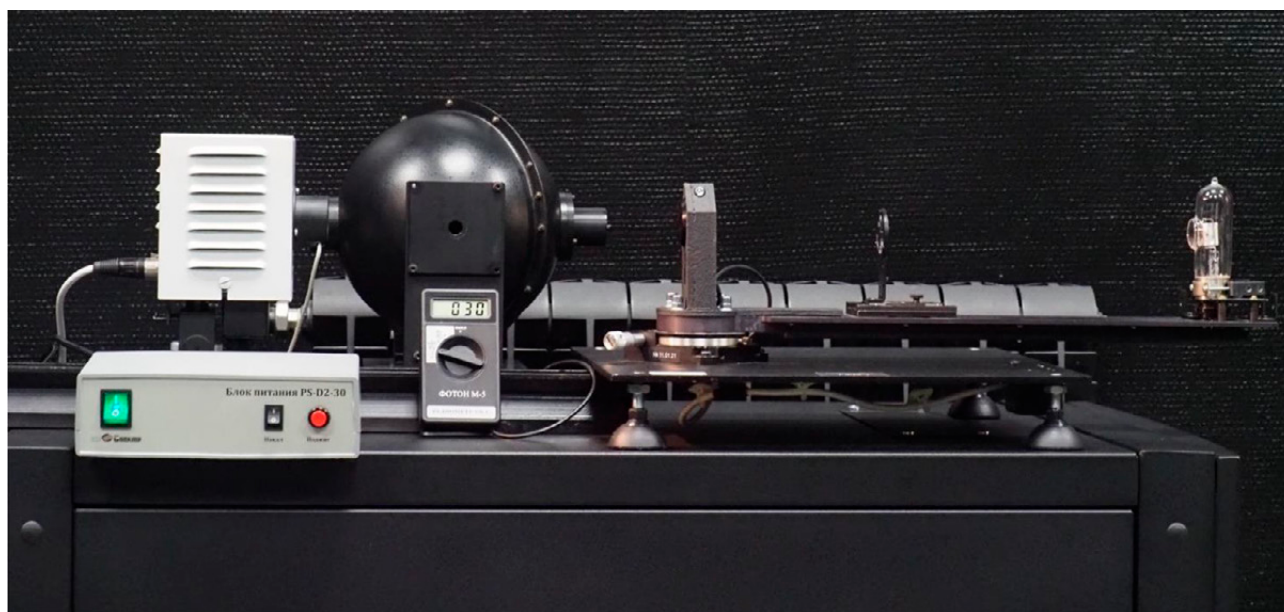


Рис. 2. Общий вид гониометра, предназначенного для измерений угловой чувствительности радиометров бактерицидного УФ-излучения

Отклонение $f(\varphi)$ угловой чувствительности УФ-радиометра $S(\varphi)$ от стандартной функции $\cos \varphi$, выраженное в процентах, определяется выражением:

$$f(\varphi) = 100\% [\cos \varphi - S(\varphi)] / \cos \varphi. \quad (1)$$

На рис. 3 показаны результаты измерений отклонений $f(\varphi)$ угловой чувствительности радиометров бактерицидного излучения № 1, № 2, № 3 от стандартной косинусной характеристики. Представленные на рис. 3 отклонения угловой

зависимости чувствительности от косинусной характеристики свидетельствуют о существенном занижении результатов измерений энергетической освещенности от протяженных излучателей при использовании коммерчески доступных УФ-радиометров бактерицидного излучения. Для исключения систематической погрешности необходимо использовать коэффициенты угловой коррекции чувствительности, позволяющие в значительной мере компенсировать искажение результатов измерений энергетической бактерицидной освещенности.

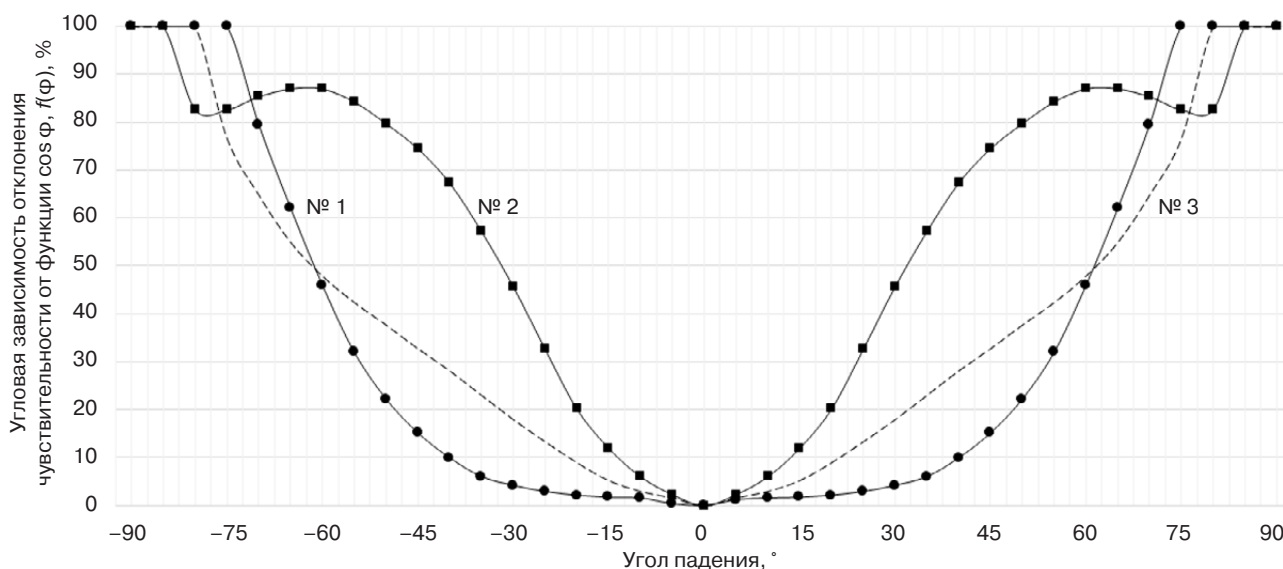


Рис. 3. Отклонение $f(\varphi)$ угловой чувствительности радиометров бактерицидного излучения от стандартной косинусной характеристики

ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ УГЛОВОЙ КОРРЕКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УФ-РАДИОМЕТРОВ

Сигнал радиометра определяется интегрированием спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) по площади излучателя в пределах рабочего телесного угла с учетом спектральной и угловой зависимости чувствительности радиометра. Уравнение, описывающее сигнал радиометра (спектрорадиометра, дозиметра) бактерицидного УФ-излучения, может быть представлено в виде:

$$i = N \int_{\Omega_0} \int_{\varphi} \int_{\lambda} L(\lambda, \delta, \Omega) S(\lambda, \varphi) d\delta d\lambda d\varphi d\Omega, \quad (2)$$

где λ – длина волны; δ – площадь излучающей области источника УФ-излучения; Ω – телесный угол; $L(\lambda, \delta, \Omega)$ – СПЭЯ излучения источника бактерицидного излучения; $S(\lambda, \varphi)$ – спектральная и угловая зависимость чувствительности радиометра (спектрорадиометра, дозиметра); N – размерный коэффициент; δ_0 – общая площадь излучающей области источника бактерицидного УФ-излучения; Ω_0 – полный телесный угол, определяемый угловыми размерами источника бактерицидного УФ-излучения.

Коэффициент угловой коррекции чувствительности $K(\varphi)$ радиометров, представленных на рис. 1, определяется по результатам измерений угловой зависимости чувствительности и предназначен для максимального исправления результатов измерений энергетической освещенности бактерицидного УФ-излучения, возникающих за счет технически несовершенной конструкции диффузных рассеивателей в составе средств измерений.

Коэффициент угловой коррекции чувствительности радиометра равен отношению сигнала идеального радиометра $i_{id}(\varphi)$, имеющего стандартную косинусную зависимость чувствительности, к сигналу реального радиометра $i_r(\varphi)$:

$$K(\varphi) = i_{id}(\varphi)/i_r(\varphi). \quad (3)$$

В большинстве случаев относительная СПЭЯ источников излучения и относительная спектральная чувствительность радиометров не зависят, соответственно, от направления излучения источника и угла падения излучения на фотоприемник. В этом случае коэффициент угловой коррекции чувствительности определяется угловой зависимостью чувствительности радиометра $S(\varphi)$ и угловой зависимостью СПЭЯ источника излучения $L(\delta, \Omega)$ в соответствии с выражением:

$$K(\varphi) = \frac{\int_{\varphi} \int_{\Omega_0} \int_{\delta_0} L(\delta, \Omega) \cos \varphi d\delta d\Omega d\varphi}{\int_{\varphi} \int_{\Omega_0} \int_{\delta_0} L(\delta, \Omega) S(\varphi) d\delta d\Omega d\varphi}. \quad (4)$$

При использовании радиометра для измерений энергетической освещенности, создаваемой трубчатым бактерицидным излучателем малого диаметра, коэффициент угловой коррекции чувствительности $K(\varphi)$ определяется в соответствии с выражением:

$$K(\varphi) = \frac{\int_{\varphi} \int_{\delta_0} L(\delta, \varphi) \cos \varphi d\delta d\varphi}{\int_{\varphi} \int_{\delta_0} L(\delta, \varphi) S(\varphi) d\delta d\varphi}. \quad (5)$$

Использование коэффициента угловой коррекции чувствительности с учетом геометрических условий измерений позволяет кардинально снизить систематическую погрешность коррекции угловой чувствительности радиометра (спектрорадиометра, дозиметра), тем самым скомпенсировать технические недостатки средств измерений, и исключить существенные отличия результатов измерений энергетической освещенности бактерицидного УФ-излучения различными средствами измерений.

В таблице представлены результаты расчета полученных в соответствии с выражением (5) для ртутных ламп низкого давления значений коэффициентов угловой коррекции чувствительности УФ-радиометров № 1, № 2 и № 3, в зависимости от максимального угла отклонения потока падающего излучения от нормали от 10° до 70° к приемной поверхности радиометра.

Таблица. Значения коэффициентов угловой коррекции чувствительности УФ-радиометров

УФ-радиометры	Максимальный угол отклонения, °						
	10	20	30	40	50	60	70
Радиометр № 1	1.01	1.03	1.04	1.05	1.08	1.16	1.26
Радиометр № 2	1.07	1.13	1.31	1.50	1.70	1.08	2.00
Радиометр № 3	1.03	1.06	1.13	1.18	1.23	1.31	1.39

Данные, представленные в таблице, показывают, что результаты измерений энергетической освещенности бактерицидного излучения ртутных трубчатых ламп радиометрами разных типов будут существенно отличаться между собой.

В соответствии с этими результатами для обеспечения требований нормативных документов⁸ к погрешности угловой коррекции чувствительности 4% необходимо использовать коэффициенты $K(\varphi)$ для радиометра № 1 при углах падения, превышающих 40° , для радиометра № 2 – при углах падения, превышающих 0° , для радиометра № 3 – при углах падения, превышающих 10° . Наименьшей погрешностью угловой коррекцией чувствительности из представленных в таблице характеризуется радиометр № 1. Для радиометра № 2 необходимо использовать коэффициенты угловой коррекции чувствительности при любых углах отклонения падающего излучения от нормали.

Трудно обеспечить точность измерений, когда излучатели расположены в центре помещения, а энергетическую освещенность бактерицидного

излучения необходимо измерить в углах помещения, или в случае, когда излучатели расположены по углам помещения, а энергетическая освещенность измеряется в центре [8]. Влияние качества угловой характеристики радиометра на результаты измерений меньше в том случае, если радиометр направлен на центр протяженного излучателя. В этом случае основной вклад в результаты измерений вносит УФ-излучение, падающее под углами, близкими к нормали относительно приемной поверхности радиометра. Излучение, падающее на приемную поверхность радиометра под большими углами к нормали, одновременно является боковым для периферийной излучающей области излучателя и его вклад относительно невелик.

Применение межлабораторных сличений средств измерений характеристик бактерицидного излучения, создаваемого трубчатыми ртутными лампами, позволяет выявить расхождения результатов измерений и существенно снизить расхождения за счет использования коэффициентов угловой коррекции чувствительности⁹.

При создании цифровых двойников средств измерений энергетической освещенности бактерицидного УФ-излучения использование коэффициентов угловой коррекции чувствительности в перечне основных метрологических характеристик радиометра позволяет обеспечить точность и достоверность результатов измерений без разработки сложных кварцевых диффузоров.

Оценка случайных и систематических погрешностей результатов измерений после введения коэффициентов угловой коррекции чувствительности радиометров проводится в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011¹⁰. В соответствии с требованиями национальных и международных стандартов установлен предел допускаемой погрешности радиометров бактерицидного излучения, который оценивается по результатам исследований составляющих погрешностей основных метрологических характеристик УФ-радиометров (спектрорадиометров,

⁹ Krames M. *The rise of UV-C LEDs*. LEDs & SSL Magazine. July 24, 2020. <https://www.ledsmagazine.com/leds-ssl-design/article/14178371/technology-roadmap-shows-uv-c-leds-are-on-the-rise>. Дата обращения 01.11.2023. / Accessed November 01, 2023.

¹⁰ ГОСТ Р 8.736-2011. *Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения*. М.: Стандартинформ; 2013. <https://docs.cntd.ru/document/1200089016>. Дата обращения 01.11.2023. [GOST R 8.736-2011. *State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple Direct measurements. Methods of measurement results processing. Main positions*. Moscow: Standartinform; 2013 (in Russ.). <https://docs.cntd.ru/document/1200089016>. Accessed November 01, 2023.

⁸ Miller C.C. *UVC Measurement Methods & UVC Documentary Standard Development*. National Institute of Standards and Technology. Washington, DC: U.S. Department of Energy; 2022. https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/ssl-rd22_miller_guv.pdf. Дата обращения 01.11.2023. / Accessed November 01, 2023.

дозиметров), включая угловую и спектральную зависимость чувствительности, отклонение от линейности чувствительности в рабочем динамическом диапазоне, абсолютную калибровку в единицах энергетической освещенности. Предел допускаемой погрешности средств измерений энергетической бактерицидной освещенности составляет 10% с учетом систематической погрешности угловой коррекции чувствительности, составляющей не более 4%.

Для оценки случайной погрешности угловой чувствительности радиометра измерения на гониометре повторяются при повороте радиометра относительно оптической оси. Неисключенная систематическая погрешность угловой коррекции радиометра оценивается с учетом углового разрешения гониометра, нелинейности чувствительности, порога чувствительности приемника излучения, нестабильности энергетической яркости излучателя, а также уровня рассеянного излучения.

Для спектро радиометров проблема обеспечения угловой коррекции чувствительности связана с малым углом зрения из-за использования дифракционных решеток, что затрудняет применение спектро радиометров при контроле характеристик бактерицидных облучательных установок без интегрирующей сферы [11, 12].

Наиболее эффективным шагом для обеспечения качества за счет снижения систематической погрешности средств измерений характеристик бактерицидного УФ-излучения является введение коэффициентов угловой и спектральной коррекции чувствительности с учетом сложностей прикладных измерительных задач при использовании в перспективе цифровых моделей и цифровых двойников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ проблемы контроля качества бактерицидных излучателей указывает на необходимость обеспечения угловой коррекции чувствительности радиометров, спектро радиометров и дозиметров, что связано с существенной доработкой методов и средств измерений энергетической освещенности УФ-излучения для обеспечения требований существующих нормативных документов.

Эффективным решением этой проблемы является использование коэффициентов коррекции угловой чувствительности радиометров, определяемых при испытаниях средств измерений в целях утверждения типа.

Наиболее прогрессивным методом повышения точности при решении метрологических задач определения энергетической освещенности бактерицидного излучения в перспективе является применение компьютерных моделей и цифровых двойников средств измерений на основе результатов исследований основных метрологических характеристик радиометров, спектро радиометров и дозиметров с использованием программного обеспечения для моделирования условий измерений.

Опыт национальных метрологических институтов в России и за рубежом свидетельствует о необходимости увеличения точности и исключения грубых ошибок при измерении энергетической освещенности, создаваемой бактерицидными установками, на основе использования коэффициентов коррекции угловой и спектральной чувствительности УФ-радиометров.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костюченко С.В., Ткачев А.А., Фроликова Т.Н. УФ-технологии для обеззараживания воды, воздуха и поверхностей: принципы и возможности. *Эпидемиология и Вакцинопрофилактика*. 2020;19(5):112–119. <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2020-19-5-112-119>
2. Костюченко С.В., Волков С.В., Ткачев А.А., Стрелков А.К., Смирнов А.Д., Баранов В.Л. Современные тенденции и особенности применения УФ-обеззараживания в водоподготовке. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2022;7:4–11. <https://doi.org/10.35776/VST.2022.07.01>
3. Blatchley E.R. III, Brenner D.J., Claus H., Cowan T.E., Linden K.G., Liu Y., Mao T., et al. Far UV-C radiation: An emerging tool for pandemic control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2023;53(6):733–753. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2084315>
4. Endo T., Gemma A., Mitsuyoshi R., et al. Discussion on effect of material on UV reflection and its disinfection with focus on Japanese Stucco for interior wall. *Sci. Rep.* 2021;11(1):21840. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01315-1>
5. Neu D.T., Mead K.R., McClelland T.L., Lindsley W.G., Martin S.B., Heil G., See M., Feng H.A. Surface Dosimetry of Ultraviolet Germicidal Irradiation Using a Colorimetric Technique. *Ann. Work Expo. Health*. 2021;65(5):605–611. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa147>
6. Zong Y., Brown S.W., Johnson B.C., Lykke K.R., Ohno Y. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers. *Appl. Opt.* 2006;45(6):1111–1119. <https://doi.org/10.1364/AO.45.001111>
7. Larason T.C., Cromer C.L. Sources of Error in UV Radiation Measurements. *J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol.* 2001;106(4):649–656. <https://doi.org/10.6028/jres.106.030>

8. Vijeta Kapri R.K., Saha S., Jaiswal V.K., Sharma P. Theoretical Simulation for Evaluating Error in Irradiance Measurement Using Optical Detectors Having Different Cosine Responses. *MAPAN – Journal of Metrology Society of India*. 2021;36(3): 473–480. <https://doi.org/10.1007/s12647-021-00486-6>
9. Marquez J.M.A., Bohórquez M.A.M., Garcia J.M., Nieto F.J.A. A New Automatic System for Angular Measurement and Calibration in Radiometric Instruments. *Sensors*. 2010;10(4):3703–3717. <https://doi.org/10.3390/s100403703>
10. Аневский С.И., Золотаревский Ю.М., Иванов В.С., Крутиков В.Н., Минаева О.А., Минаев Р.В. Спектрорадиометрия ультрафиолетового излучения. *Измерительная техника*. 2015;11:26–30.
11. Mekaoui S., Zibordi G. Cosine error for a class of hyperspectral irradiance sensors. *Metrologia*. 2013;50(187):187–199. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/50/3/187>
12. Nevas S., Wübbeler G., Sperling A., Elster C., Teuber A. Simultaneous correction of bandpass and stray-light effects in array spectroradiometer data. *Metrologia*. 2012;49(2):S43–S47. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/49/2/S43>

REFERENCES

1. Kostyuchenko S.V., Tkachev A.A., Frolikova T.N. UV technologies for disinfection of water, air and surfaces: principles and possibilities. *Epidemiologiya i Vaktsinoprofilaktika = Epidemiology and Vaccination Prevention*. 2020;19(5):112–119 (in Russ.). <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2020-19-5-112-119>
2. Kostyuchenko S.V., Volkov S.V., Tkachev A.A., Strelkov A.K., Smirnov A.D., Baranov V.L. Modern trends and peculiarities of UV disinfection usage in water treatment. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Equipment*. 2022;7:4–11 (in Russ.). <https://doi.org/10.35776/VST.2022.07.01>
3. Blatchley E.R. III, Brenner D.J., Claus H., Cowan T.E., Linden K.G., Liu Y., Mao T., et al. Far UV-C radiation: An emerging tool for pandemic control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2023;53(6):733–753. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2084315>
4. Endo T., Gemma A., Mitsuyoshi R., et al. Discussion on effect of material on UV reflection and its disinfection with focus on Japanese Stucco for interior wall. *Sci. Rep.* 2021;11(1):21840. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01315-1>
5. Neu D.T., Mead K.R., McClelland T.L., Lindsley W.G., Martin S.B., Heil G., See M., Feng H.A. Surface Dosimetry of Ultraviolet Germicidal Irradiation Using a Colorimetric Technique. *Ann. Work Expo. Health*. 2021;65(5):605–611. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa147>
6. Zong Y., Brown S.W., Johnson B.C., Lykke K.R., Ohno Y. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers. *Appl. Opt.* 2006;45(6):1111–1119. <https://doi.org/10.1364/AO.45.001111>
7. Larason T.C., Cromer C.L. Sources of Error in UV Radiation Measurements. *J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol.* 2001;106(4): 649–656. <https://doi.org/10.6028/jres.106.030>
8. Vijeta Kapri R.K., Saha S., Jaiswal V.K., Sharma P. Theoretical Simulation for Evaluating Error in Irradiance Measurement Using Optical Detectors Having Different Cosine Responses. *MAPAN – Journal of Metrology Society of India*. 2021;36(3): 473–480. <https://doi.org/10.1007/s12647-021-00486-6>
9. Marquez J.M.A., Bohórquez M.A.M., Garcia J.M., Nieto F.J.A. A New Automatic System for Angular Measurement and Calibration in Radiometric Instruments. *Sensors*. 2010;10(4):3703–3717. <https://doi.org/10.3390/s100403703>
10. Anevskii S.I., Zolotarevskii Yu.M., Ivanov V.S., Krutikov V.N., Minaeva O.A., Minaev R.V. Spectroradiometry of ultraviolet radiation. *Meas. Tech.* 2016;28(11):1216–1222. <http://doi.org/10.1007/s11018-016-0873-9> [Original Russian Text: Anevskii S.I., Zolotarevskii Yu.M., Ivanov V.S., Krutikov V.N., Minaeva O.A., Minaev R.V. Spectroradiometry of ultraviolet radiation. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2015;11:26–30 (in Russ.).]
11. Mekaoui S., Zibordi G. Cosine error for a class of hyperspectral irradiance sensors. *Metrologia*. 2013;50(187):187–199. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/50/3/187>
12. Nevas S., Wübbeler G., Sperling A., Elster C., Teuber A. Simultaneous correction of bandpass and stray-light effects in array spectroradiometer data. *Metrologia*. 2012;49(2):S43–S47. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/49/2/S43>

Об авторах

Минаева Ольга Александровна, д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, SPIN-код РИНЦ 5081-1976, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Рагуткин Александр Викторович, к.т.н., советник ректора, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ragutkin@mirea.ru. Scopus Author ID 56871217700, ResearcherID AAE-4437-2022, SPIN-код РИНЦ 7531-7376, <https://orcid.org/0000-0001-8256-1941>

Аневский Сергей Иосифович, д.т.н., профессор, кафедра метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Минаев Роман Владимирович, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела ООО «Электростекло» (119571, Россия, Москва, ул. 26-ти Бакинских Комиссаров, д. 5). E-mail: minaev@elektrosteklo.ru. Scopus Author ID 22235214600, <https://orcid.org/0009-0009-6335-5531>

Минь Тхань Чунг, аспирант, кафедра метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: trunghnt321@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0005-4976-6271>

Романова Инна Алексеевна, старший преподаватель, кафедра метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: romanova_i@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 7864-7200, <https://orcid.org/0000-0002-1642-2801>

About the authors

Olga A. Minaeva, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, RSCI SPIN-code 5081-1976, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Alexander V. Ragutkin, Cand. Sci. (Eng.), Rector's Advisor, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ragutkin@mirea.ru. Scopus Author ID 56871217700, ResearcherID AAE-4437-2022, RSCI SPIN-code 7531-7376, <https://orcid.org/0000-0001-8256-1941>

Sergei I. Anevsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Roman V. Minaev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Department, Elektrosteklo (5, 26 Bakinskikh Komissarov ul., Moscow, 119571 Russia). E-mail: minaev@elektrosteklo.ru. Scopus Author ID 22235214600, <https://orcid.org/0009-0009-6335-5531>

Thanh T. Minh, Postgraduate Student, Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: trunghnt321@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0005-4976-6271>

Inna A. Romanova, Senior Lecturer, Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: romanova_i@mirea.ru. RSCI SPIN-code 7864-7200, <https://orcid.org/0000-0002-1642-2801>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 31.01.2024 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 16.5.

Тираж 100 экз. Заказ № 660.

Подписку на печатную версию

Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.

Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.

Signed to print January 31, 2024.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 16.5.

100 copies. Order No. 660.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.