

И. В. ДОКТОРОВИЧ, В. К. БУТЕНКО, д. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК,
д. ф.-м. н. И. М. ФОДЧУК, В. Г. ЮРЬЕВ

Украина, г. Черновцы, ЦКБ «Ритм»,
Черновицкий нац. ун-т им. Юрия Федьковича
E-mail: rhythm@chv.ukrpack.net

Дата поступления в редакцию
19.07 2007 г.

Оппонент В. П. СОБОЛЬ
(ЦКБ «Арсенал», г. Киев)

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ УФ-РАДИОМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

С учетом наиболее весомых факторов влияния на метрологические характеристики радиометров разработана методика калибровки — передачи размера единицы энергетической освещенности УФ-радиометрам.

При разработке и изготовлении средств измерительной техники (СИТ) производится их калибровка, метрологическая аттестация и последующие поверки с целью установления пригодности СИТ к применению. Термины *метрологическая аттестация, поверка и калибровка СИТ* в метрологии употребляются как самостоятельные термины. Однако в техническом приложении понятия эти достаточно близки — это определение метрологических характеристик СИТ и установление пригодности этих средств к применению. Поэтому для упрощения в данной работе термин *калибровка* употребляется как процесс передачи размеров единицы измерений средствам измерительной техники.

Достаточно распространенным в производстве методом передачи измеряемой величины является метод сравнения исследуемого средства измерений с рабочим (или исходным) эталоном. При этом аттестация рабочего эталонного средства измерений производится при определенных условиях и режимах, которые должны быть возобновлены при использовании такого эталона на рабочем месте.

Порядок передачи размера единицы энергетической освещенности средствам измерения этого параметра или, как мы условились, порядок калибровки, приводится в стандартах [1, 2]. В качестве рабочего эталона часто используются неселективные приемники излучения — пироэлектрические приемники, термисторные болометры, термоэлементы, оптико-акустические преобразователи. Эти приемники используются и как первичные преобразователи излучения оптического диапазона в широкополосных (по длинам волн) радиометрах. При этом конфигурация «эталон—исследуемое средство измерительной техники» является согласованной системой в метрологии, и присвоенная единица измеряемой величины СИТ не зависит от спектрального состава излучения.

Если в качестве фотоприемника средства измерения энергетической освещенности используется селективный приемник, то наименьшее отклонение спектрального состава измеряемого источника излучения от спектрального состава источника, который использовался при калибровке СИТ, приводит к увеличению погрешности измерения энергетической освещенности. То же происходит, если эталон используется при определении энергетической освещенности для передачи ее величины исследуемому СИТ с более узким спектральным диапазоном чувствительности, чем спектральный диапазон чувствительности эталона. К таким средствам измерений относятся, например, радиометры, предназначенные для измерения энергетической освещенности в видимом или ультрафиолетовом (УФ) диапазонах. УФ-диапазон в свою очередь делится на поддиапазоны: 220—280 нм (поддиапазон С), 280—320 нм (поддиапазон В) и 320—400 нм (поддиапазон А) [3, 4].

Рассмотрим проблемы, возникающие при калибровке УФ-радиометров.

Из результатов исследований параметров приемников, чувствительных в УФ-диапазоне [5], видим, что для УФ-радиометров лучше всего подходят фотодиоды на основе селенида цинка и фосфида галлия. Их преимущество очевидно — это относительно высокая чувствительность и ограниченная спектральная характеристика чувствительности в длинноволновой части спектрального диапазона, что является важным при формировании поддиапазонов.

Однако их спектральные характеристики чувствительности являются селективными, и воспроизвести форму спектральной характеристики идеальной (теоретической) радиометрической головки (РГ) УФ-радиометра при помощи корректирующих светофильтров очень сложно. Это было бы возможно при условии, что светофильтр вне рабочего диапазона будет непрозрачным, а в рабочей области будет иметь спектральную характеристику пропускания, которая описывается соотношением

$$\tau_{\lambda} = \frac{1}{S_{\lambda}}, \quad (1)$$

где τ_{λ} — спектральный коэффициент пропускания корректирующего светофильтра в рабочем диапазоне РГ;

S_{λ} — относительная спектральная характеристика чувствительности фотоприемника.

Однако изготовить светофильтр по заданным формулой (1) требованиям невозможно, поэтому реальные характеристики РГ отличаются от идеальных. Исследования технических параметров и характеристик УФ-радиометров, выпускаемых фирмами «ТКА» (г. С.-Петербург), «Аргус» (г. Москва) и НПФ «Тензор» (г. Черновцы), подтверждают сказанное — спектральные характеристики исследованных УФ-радиометров отличаются от идеальных и для однотипных приборов схожи между собой.

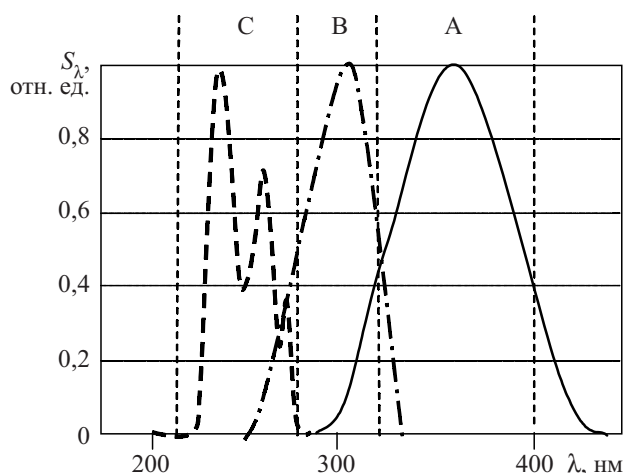


Рис. 1. Относительные спектральные характеристики чувствительности РГ в поддиапазонах А, В и С

Типовые спектральные характеристики чувствительности РГ, измеренные на спектральном комплексе КСВУ-6, приведены на рис. 1. В этом случае (случае селективности чувствительности радиометрических головок) погрешность измерений спектральной характеристики РГ и определения величины отличия спектральной характеристики реальной головки от идеальной определяют качество УФ-радиометра, т. е. определяют уровень его метрологических характеристик, а соответственно, и пригодность к применению.

Калибровку УФ-радиометров с селективной чувствительностью РГ удобно проводить при монохроматическом потоке излучения, который можно вы-

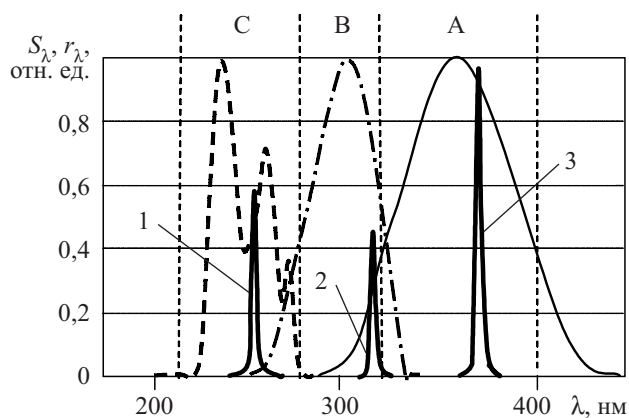


Рис. 2. Относительные спектральные характеристики чувствительности РГ (S_λ) и положения выделенных линий ртути (r_λ): 254 нм (1); 313 нм (2); 365 нм (3)

делить при помощи монохроматора или выделением линий ртути в рабочем спектральном поддиапазоне при помощи интерференционных светофильтров: в поддиапазоне С — длину волны $\lambda_{\max}=254$ нм, в поддиапазоне В — длину волны $\lambda_{\max}=313$ нм и в поддиапазоне А — длину волны $\lambda_{\max}=365$ нм.

Положение выделенных ртутных линий и спектральные характеристики чувствительности РГ приведены на рис. 2.

Рассмотрим причины, влияющие на качество калибровки спектрально-зависимых УФ-радиометров, процесс которой является довольно сложным техническим приемом.

Во-первых, необходимо качественно выделить линию, т. е. выделить только рабочую длину волны излучения и подавить остальные, попадающие в диапазон чувствительности РГ. Для этой цели подходят интерференционные светофильтры, изготовленные Казанским оптико-механическим заводом.

Спектральные характеристики пропускания фильтров были измерены на спектральном комплексе КСВУ-6. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Спектральные характеристики пропускания интерференционных светофильтров

Параметры	Спектральные поддиапазоны		
	$\lambda_{\max}=365$ нм (А)	$\lambda_{\max}=313$ нм (В)	$\lambda_{\max}=254$ нм (С)
$\lambda_{\max} (\tau_{\max})$	364 нм ($\tau=18\%$)	314 нм ($\tau=29\%$)	254 нм ($\tau=27\%$)
$\Delta\lambda_{0,5}$	360—369 нм	310—318 нм	245—275 нм
$\Delta\lambda_{0,1}$	357—375 нм	307—322 нм	222—285 нм
$\Delta\lambda_{0,001}$	200—355 нм; 375—500 нм	200—305 нм; 325—500 нм	200—315 нм; 390—500 нм

Отметим, что при полуширине ртутных линий $\Delta\lambda_{0,5Hg}$, не превышающих 3 нм, незначительные отклонения положений максимумов пропускания фильтров λ_{\max} в диапазонах А и В при полном подавлении излучения других линий ($\Delta\lambda_{0,001}$) не влияют на качество выделения рабочих линий излучения. Немного хуже выделяется ртутная линия с длиной волны 254 нм — при полуширине спектральной характеристики фильтра, равной 30 нм, на радиометрическую головку попадают потоки излучения соседних линий с максимумами 265 и 280 нм, которые по мощности излучения немного меньше (на 30—50%) мощности излучения рабочей линии. Однако при близких формах спектральной характеристики чувствительности эталонной и испытуемой радиометрических головок это отличие учитывается при калибровке УФ-радиометра автоматически.

Во-вторых, как видно из рис. 2, линии ртути не совпадают с максимумами чувствительности РГ.

В процессе исследований спектральных характеристик чувствительности УФ-радиометров типа УФР-21, выпускаемых фирмой «Тензор», (более 50 шт.) и ТКА-АВС, выпускаемых фирмой «ТКА», (4 шт.) были установлены пределы изменения величин относительной чувствительности РГ на рабочих

Таблица 2
Спектральная чувствительность РГ на рабочих длинах волн, отн. ед.

Тип УФ-радиометра	$S_{\lambda=365 \text{ нм}}$	$S_{\lambda=313 \text{ нм}}$	$S_{\lambda=254 \text{ нм}}$
УФР-21	0,89—0,98	0,64—0,82	0,44—0,94
ТКА-АВС	0,90—1,00	0,52—0,79	0,49—0,97

длинах волн. В табл. 2 приведены результаты измерений.

Меньший диапазон изменения чувствительности РГ на длине волны $\lambda_{\text{max}}=365 \text{ нм}$ объясняется меньшим отличием формы спектральных характеристик фотоприемников, используемых в РГ, и более широким спектральным поддиапазоном А (320—400 нм), а соответственно и более пологими фронтами спектральных характеристик.

На длине волны $\lambda_{\text{max}}=313 \text{ нм}$ диапазон изменения чувствительности РГ больше из-за более узкого спектрального поддиапазона В (280—320 нм), и незначительные изменения формы спектральной характеристики фотоприемника или корректирующего фильтра приводят к увеличению разброса чувствительности РГ на длине волны калибровки.

Применение интерференционных фильтров на спектральный поддиапазон С (200—280 нм) приводит к еще большему разбросу чувствительности РГ. Причина в том, что излучение на длине волны $\lambda_{\text{max}}=254 \text{ нм}$ приходится на крутой фронт или на провал спектральной характеристики пропускания фильтра. Поскольку на сегодня производителям фильтров не удается изготовить более качественные фильтры, разработчикам оптико-электронных измерительных приборов приходится вводить поправочные коэффициенты.

В-третьих, уровень метрологических характеристик УФ-радиометров зависит от качества воспроизведения формы спектральной характеристики

чувствительности реальной РГ и степени отличия ее от формы идеальной (теоретической) головки.

Так как фотосигнал на выходе измерительной РГ определяется по формуле

$$I_{\tau, \text{ABC}} = \int_{\lambda=200}^{\lambda=500} S_{\lambda, \text{ABC}} r_{\lambda} \cdot d\lambda, \quad (2)$$

где $I_{\tau, \text{ABC}}$ — фототок на выходе РГ, А;

$S_{\lambda, \text{ABC}}$ — спектральная чувствительность РГ, работающей в поддиапазонах А, В и С, соответственно, А/Вт;

r_{λ} — спектральное распределение излучения в диапазоне чувствительности фотоприемника, используемого в РГ, Вт,

то при воздействии на спектрально-зависимую радиометрическую головку потоков разнотипных источников УФ-излучения (например, с одинаковой интегральной мощностью) получим разные фотосигналы. (Типы источников и виды их спектральных характеристик приведены в табл. 3.) Иными словами, такой радиометр будет вносить большую погрешность в измерения, чем задекларированная в технической документации.

Отличие формы относительной спектральной характеристики чувствительности реальной РГ (см. рис. 1) от формы для идеальной (теоретической) головки ($S_{\lambda_i}=1$ — в рабочем диапазоне, $S_{\lambda_i}=0$ — вне диапазона) в процессе измерений можно учесть вводом коэффициента отличия для каждого типа источника излучения. Коэффициент отличия определяется расчетным путем как отношение фотосигналов, полученных при действии данного типа источника излучения на идеальную и реальную головки.

Коэффициенты отличия приведены в табл. 4. Отметим, что чем больше коэффициент K отличается от 1, тем больше влияние незначительного изменения спектрального состава источников на точность измерений.

Таблица 3

Типы источников излучения и их спектральные характеристики

Тип источника излучения	Приблизительный вид распределения излучения в УФ-диапазоне
1. Газоразрядные ртутные лампы без люминофоров (ДРТ, ДРШ, СВДШ)	<p>1) r_{λ} vs $\lambda, \text{ нм}$ (200-500)</p> <p>2) r_{λ} vs $\lambda, \text{ нм}$ (200-500)</p> <p>3) r_{λ} vs $\lambda, \text{ нм}$ (200-500)</p> <p>4) r_{λ} vs $\lambda, \text{ нм}$ (500-)</p>
2. Дейтериево-водородные лампы (ДАС-30, ЛД(Δ) и др.)	
3. Источники излучения с нормальным законом спектрального распределения плотности излучения (распределение, близкое к абсолютно черному телу — АЧТ): — Солнце за атмосферой; — электрические дуги; — дуговые газоразрядные лампы (ΔКсШ, ΔКрШ); — АЧТ (с $T_{\text{АЧТ}}$ от 2000 до 6000 К); — лампы накаливания с кварцевой колбой (лампы типа КГМ)	
4. Газоразрядные ртутные лампы с люминофорами (ЛД, ЛТБ, ЛБ, ЛХБ и т. п.)	

Таблица 4

Коэффициенты отличия (K) спектральной чувствительности реальной головки от идеальной

Тип источника излучения	Тип УФ-радиометра	Спектральные поддиапазоны		
		A	B	C
Ртутная лампа	УФР-21	0,94—0,98	0,83—1,01	1,51—1,77
	ТКА-АВС	1,02—1,07	0,98—1,09	1,58—1,95
Солнце	УФР-21	0,96—1,13	0,80—1,01	0,99—1,71
	ТКА-АВС	1,16—1,25	0,94—1,07	1,15—2,33
Дейтериево-водородная лампа	УФР-21	0,96—0,99	0,97—1,02	2,02—2,22
	ТКА-АВС	1,12—1,16	1,08—1,15	1,91—3,01

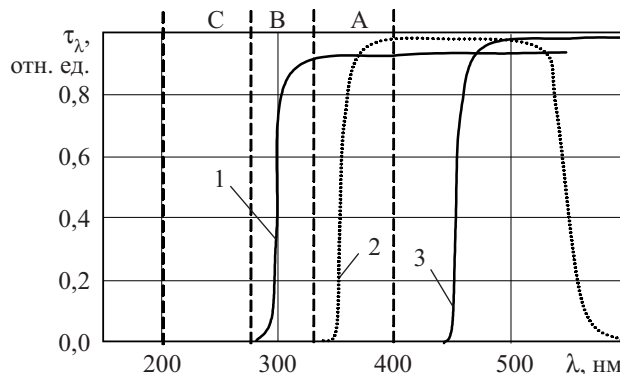


Рис. 3. Спектральные характеристики светофильтров: 1 — органическое стекло; 2 — СЗС-21; 3 — ЖС-11

Уровень остаточной чувствительности вне рабочего диапазона

Таблица 5

Тип источника излучения	Тип УФ-радиометра	Спектральные поддиапазоны					
		A		B		C	
		Рабочий диапазон	Вне диапазона	Рабочий диапазон	Вне диапазона	Рабочий диапазон	Вне диапазона
Ртутная лампа	УФР-21	1	0,002	1	0,01	1	0,01
	ТКА-АВС	1	0,003	1	0,03	1	0,02
Солнце	УФР-21	1	0,02	1	0,38	1	0,93
	ТКА-АВС	Данные отсутствуют					
КГМ24-150	УФР-21	1	0,10	1	0,21	1	0,91
	ТКА-АВС	1	0,10	1	0,13	1	0,99

Проблемным является и вопрос качества измерений спектральных характеристик вне рабочего диапазона РГ. Проблема в том, что при корректировании светофильтром спектральной характеристики фотоприемника вне рабочего диапазона РГ фотосигналы не достигают пороговой чувствительности измерительного тракта спектрального комплекса. Поэтому при расчете коэффициента отличия спектральной характеристики реальной РГ от идеальной не учитывается остаточная чувствительность вне рабочего диапазона.

Хотя остаточная чувствительность является малой величиной, при высокой мощности излучения вне рабочего диапазона она приводит к значительному увеличению погрешности измерений. Для определения уровня остаточной чувствительности удобно применять отрезающие светофильтры, спектральные характеристики которых приведены на рис. 3: для поддиапазона C — органическое стекло, для поддиапазона B — стекло СЗС-21 и для поддиапазона A — стекло ЖС-11 с коэффициентами ослабления рабочего диапазона $K_{осл}$ $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ и $1 \cdot 10^6$ раз, соответственно [6]. В табл. 5 приведены результаты исследования остаточной чувствительности, определенной при помощи отрезающих светофильтров и пронормированной относительно чувствительности в рабочем диапазоне.

На сегодня фирмами «ТКА» (г. С.-Петербург), «Аргус» (г. Москва) калибровка УФ-радиометров производится методом сравнения с образцовыми средствами измерения, в качестве которых отобра-

ны радиометры, аналогичные калибруемым [7, 8]. Учитывая вышеприведенные результаты исследований причин ухудшения метрологических характеристик УФ-радиометров, можно сделать вывод: метод сравнения в данном случае имеет ограничения, и применять УФ-радиометры для измерений энергетической освещенности в условиях, отличных от условий калибровки, нельзя.

Нами предлагается методика калибровки УФ-радиометров, которая учитывает изменения условий измерений.

Для калибровки УФ-радиометра энергетической освещенности используется установка, структурная схема которой приведена на рис. 4.

Для качественных измерений необходимо, чтобы в плоскости крепления РГ энергетическая освещенность была не меньше 100 мВт/м^2 . Интерференционный фильтр должен обеспечивать максимальное пропускание на соответствующих длинах волн: поддиапазон A — $\lambda_{\max}^A = 365 \text{ нм}$; B — $\lambda_{\max}^B = 313 \text{ нм}$;

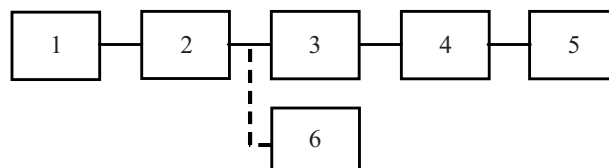


Рис. 4. Схема установки для калибровки УФ-радиометра: 1 — источник УФ-излучения (лампа типа ДРТ220); 2 — интерференционный фильтр на области A, B, C; 3 — рабочая эталонная РГ; 4 — преобразователь «ток—напряжение» ППТН-1; 5 — вольтметр типа В7-23 (В7-34); 6 — УФ-радиометр

C — $\lambda_{\max}^C = 254$ нм. Эталонная РГ должна быть аттестована по чувствительности в спектральном диапазоне от 200 до 500 нм с погрешностью не более $\pm 5\%$.

После установки интерференционного фильтра на поддиапазон C и установки на рабочую эталонную РГ (ЭРГ) диафрагмы диаметром 5—7 мм производится измерение фотосигнала U_k и рассчитывается энергетическая освещенность (E_{e1}) по формуле

$$E_{e1} = \frac{4U_k}{K_{\text{пр}} S_{\text{к1}} \pi d^2}, \quad (3)$$

где E_{e1} — энергетическая освещенность, создаваемая потоком излучения на длине волны $\lambda_{\max}^C = 254$ нм, Вт/м²;

U_k — величина напряжения фотосигнала, измеренная вольтметром В7-23, В;

$K_{\text{пр}}$ — коэффициент преобразования ППТН-1, В/А;

$S_{\text{к1}}$ — токовая монохроматическая чувствительность ЭРГ на длине волны $\lambda_1 = \lambda_{\max}^C$, А/Вт;

d — диаметр диафрагмы, м.

Вместо ЭРГ устанавливается радиометрическая головка УФ-радиометра с насадкой 220-280, соединенной с измерительным блоком радиометра. При этом верхний срез косинусной насадки РГ УФ-радиометра должен находиться в плоскости крепления диафрагмы ЭРГ. Переключатель выбора спектрального поддиапазона измерительного блока устанавливается в положение «С» и производится измерение энергетической освещенности E_e^C , которая должна быть равной

$$E_e^C = E_{e1} S_{\lambda}^C K_{\Delta\text{РТ}}^C, \quad (4)$$

где E_{e1} — энергетическая освещенность, рассчитанная по формуле (3), Вт/м²;

S_{λ}^C — чувствительность РГ УФ-радиометра на длине волны $\lambda_{\max}^C = 254$ нм, определенной по относительной спектральной характеристике чувствительности, отн. ед.;

$K_{\Delta\text{ДО}}^N$ — коэффициент отличия формы относительной спектральной характеристики чувствительности реальной РГ (S_{λ}^C) в поддиапазоне C от формы идеальной (теоретической) головки (S_{λ}^C) для ртутных источников УФ-излучения.

Коэффициент $K_{\Delta\text{РТ}}^C$ определяется по формуле

$$K_{\Delta\text{РТ}}^C = \frac{\int_{\lambda=200}^{\lambda=500} S_{\lambda_i}^C r_{\lambda}^{\Delta\text{РТ}} d\lambda}{\int_{\lambda=200}^{\lambda=500} S_{\lambda}^C r_{\lambda}^{\Delta\text{РТ}} d\lambda}, \quad (5)$$

где $r_{\lambda}^{\Delta\text{РТ}}$ — спектральное распределение потока излучения ртутной лампы, отн. ед.;

$S_{\lambda_i}^C$ — относительная спектральная характеристика чувствительности идеальной РГ;

S_{λ}^C — относительная спектральная характеристика чувствительности реальной РГ.

Относительная спектральная характеристика чувствительности идеальной РГ имеет вид: $S_{\lambda_i}^C = 1$ — в рабочем диапазоне, $S_{\lambda_i}^C = 0$ — вне диапазона.

Если показания УФ-радиометра отличаются от расчетной величины энергетической освещенности, то при помощи юстировочных приспособлений прибора на табло радиометра устанавливается расчетное значение освещенности в пределах $\pm 5\%$.

Аналогично производится калибровка УФ-радиометра с насадками 280-320 и 320-400, при этом поочередно устанавливаются интерференционные фильтры с длинами волн $\lambda_2 = \lambda_{\max}^B$ и $\lambda_3 = \lambda_{\max}^A$, а переключатель выбора спектрального диапазона — соответственно в положение «В» и «А».

Основная относительная погрешность калибровки УФ-радиометра не выходит за пределы $\pm 10\%$.

Выводы

1. В процессе разработки методики калибровки УФ-радиометра были определены наиболее весомые факторы, влияющие на метрологические характеристики радиометра при его калибровке и эксплуатации. Результаты исследований могут быть полезны при разработке новых радиометров.

Разработаны методики определения коэффициентов отличия формы относительной спектральной характеристики чувствительности реальной радиометрической головки от формы спектральной характеристики идеальной (теоретической).

2. Введением коэффициентов расширяется область применения УФ-радиометров.

3. Разработаны методики калибровки УФ-радиометров энергетической освещенности, улучшающие метрологические характеристики данного класса приборов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ДСТУ 3193—95. Метрологія. Державна повірна схема для засобів вимірювань енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням.

2. ГОСТ 8.195—89. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений ... энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2—25,0 мкм.

3. Гигиеническая оценка и методы контроля оптического излучения производственных источников. (Методические рекомендации.) — Киев: Министерство здравоохранения УССР, 1986.

4. Санітарні норми та правила устрою, експлуатації та контролю обладнання, яке генерує електромагнітне випромінювання оптичного діапазону (інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове). — Київ: АМН України, 1997.

5. Шабашкевич Б. Г., Назаренко Л. А., Годованюк В. М. та ін. Дослідження параметрів приймачів, чутливих в УФ-діапазоні // Український метрологічний журнал. — 2004. — Вип. 1. — С. 33—36.

6. Каталог цветного стекла. — М.: Машиностроение, 1967.

7. www.tka.spb.ru

8. www.octava.info