

УДК 53.082.5+621.373.826

ИЗМЕРЕНИЕ ОСВЕЩЕННОСТИ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 0,001 ДО 1,000 ЛК

Длугунович В.А.², Никоненко С.В.², Тарасова О.Б.¹

¹ Белорусский государственный институт метрологии, г. Минск, Республика Беларусь

² Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

В ходе модернизации в 2008–2010 гг. Национального эталона единиц силы света и освещенности Республики Беларусь разработан и создан фотометр малых уровней освещенности. Описан метод создания шкалы малых уровней освещенности. Приведена схема фотометра и его основные характеристики. (E-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by)

Ключевые слова: освещенность, фотометрия.

Введение

Национальный эталон единиц силы света и освещенности (НЭССО), утвержденный постановлением Госстандарта Республики Беларусь в 2002 г. в качестве Национального эталона, воспроизводил, хранил и передавал единицу освещенности в диапазоне от 10 до 1500 лк [1]. Научные и практические исследования в области фотометрии, проводимые для промышленных предприятий и научных организаций Республики Беларусь с помощью НЭССО, требовали проведения модернизации НЭССО в целях расширения диапазона воспроизведения освещенности в сторону малых уровней – до $1 \cdot 10^{-3}$ лк. Это обусловлено, прежде всего, тем, что за последние годы значительно возросла номенклатура производимых и поставляемых на экспорт отечественными предприятиями оптико-электронных изделий: приборов ночного видения; систем видеонаблюдения, приборов для аэросъемки местности, средств контроля безопасности дорожного движения и др. Их калибровка, юстировка и проверка работоспособности производится при малых уровнях освещенности.

Эталонная база ведущих национальных метрологических институтов в области фотометрии малых уровней освещенности

По данным СМС-таблиц на сайте Международного бюро мер и весов, только у двух национальных метрологических институтов NIST (США) и PTB (Германия) заявлена возможность измерения освещенности и калиб-

ровки средств измерений освещенности в диапазоне малых уровней от $1 \cdot 10^{-3}$ до 1 лк с относительной расширенной неопределенностью от 0,4 до 1,5 %. В NIST измерения силы света и освещенности реализованы на фотометрической скамье длиной 5,4 м [2]. Для воспроизведения единицы освещенности в NIST используют 8 эталонных фотометров собственной разработки, характеристика преобразования которых линейна в пределах выходных токов от 10^{-10} до 10^{-4} А, что соответствует диапазону освещенностей от $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^4$ лк. Для расширения шкалы освещенности в сторону малых уровней осуществляют увеличение времени интегрирования. Кроме того, перед светоизмерительной лампой устанавливают специальные диафрагмы и более тщательно проводят юстировку тела накала лампы. Процедура измерения малых уровней освещенности, реализованная в NIST, одна из лучших на сегодняшний день. Но разработка специализированного фотометра, имеющего усилитель с коэффициентом усиления от 10^4 до 10^{11} , является достаточно сложной и дорогостоящей технической задачей, так как коммерчески доступных подобных фотометров и усилителей нет.

В PTB измерение силы света и освещенности реализованы на фотометрической скамье длиной 40 м [3]. В отличие от NIST измерение малых уровней освещенности обеспечивается большими расстояниями между светоизмерительной лампой и фотометром или калибруемым прибором. К основному недостатку данного подхода измерений малых уровней освещенности следует отнести дорогостоящую фотометрическую скамью, которую следует раз-

мещать в помещение длиной не менее 43 м, стены которого должны быть окрашены матовой черной или темно-серой краской.

В HUT (Финляндия) реализация хранения и передачи единиц силы света и освещенности основана на эталоне светового потока [4]. Основным недостатком данного метода является необходимость регулярной калибровки интегрального источника светового потока, так как в ее отсутствие требуется постоянный контроль спектрального коэффициента отражения внутренней поверхности фотометрического шара и неравномерности освещенности апертуры выходного отверстия, что технически выполнить достаточно сложно.

Фотометр малых уровней освещенности

Шкалу малых уровней освещенности можно реализовать на основе точно известных коэффициентов яркости диффузно отражающей (рассеивающей) пластины. Оптическая схема реализации измерений освещенности в плоскости приемника излучения E_2 приведена на рисунке 1.

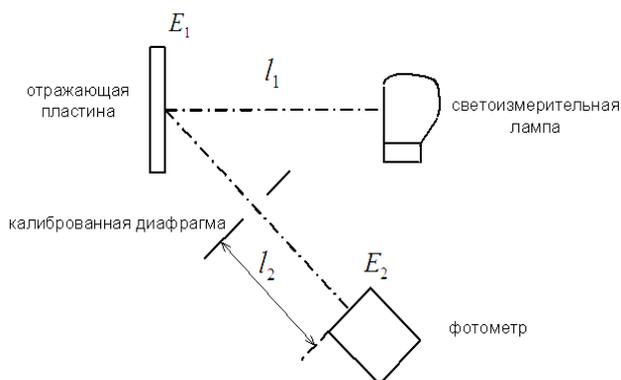


Рисунок 1 – Оптическая схема измерения освещенности на основе определения коэффициентов яркости диффузно отражающей пластины:

E_1 – освещенность на поверхности отражающей пластины; l_1 – расстояние между плоскостью нити накала лампы и диффузно отражающей пластиной; l_2 – расстояние между калиброванной диафрагмой и апертурной диафрагмой фотометрической головки исследуемого фотометра, E_2 – освещенность на апертурной диафрагме фотометрической головки исследуемого фотометра

Диффузно отражающая пластина из молочного стекла или политетрафторэтилена однородно освещается светоизмерительной лампой силы света с цветовой температурой $T_c = 2856$ К.

Освещенность E_1 на поверхности пластины можно определить из формулы:

$$E_1 = \frac{I_v}{l_1^2}, \tag{1}$$

где l_1 – расстояние между плоскостью нити накала лампы и диффузно отражающей пластиной, м; I_v – сила света светоизмерительной лампы, кд.

Фактически диффузно рассеивающая пластина, отражающая излучение под углом 45° , в этом случае представляет собой источник излучения с яркостью:

$$L_v = \frac{kE_1\rho}{\pi}, \tag{2}$$

где ρ – коэффициент яркости диффузно отражающей пластины; поправочный коэффициент k определяется по формуле:

$$k \cong 1 + \left(\frac{r_{\partial 1}}{l_2}\right)^2 + \left(\frac{r_{\partial 2}}{l_2}\right)^2, \tag{3}$$

где l_2 – расстояние между калиброванной диафрагмой и апертурной диафрагмой фотометрической головки (ФГ) исследуемого фотометра, м; $r_{\partial 1}$ и $r_{\partial 2}$ – радиусы калиброванной диафрагмы и апертурной диафрагмы ФГ исследуемого фотометра, м.

Площадь калиброванной диафрагмы $A_{\partial 1}$ можно вычислить по формуле:

$$A_{\partial 1} = \frac{\pi d_1^2}{4}, \tag{4}$$

где d_1 – диаметр калиброванной диафрагмы, м.

В результате с учетом (4) получаем, что с помощью ФГ исследуемого фотометра можно измерить освещенность E_2 :

$$E_2 = \frac{L_v A_{\partial 1}}{l_2^2} = \frac{I_v k \rho d_1^2}{4 l_1^2 l_2^2}. \tag{5}$$

Проведенное численное моделирование, а также анализ литературных данных позволили установить, что для реализации шкалы освещенности в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ до 1 лк измерительная

установка должна иметь следующие основные параметры:

- сила света светоизмерительной лампы должна составлять от 1 до 10 кд;
- диффузно отражающая пластина должна иметь коэффициент яркости не ниже 0,8;
- расстояние между плоскостью нити накала лампы и диффузно отражающей пластиной должно составлять от 50 до 700 мм;
- расстояние между апертурой выходной диафрагмы и апертурой фотометра должно составлять от 10 до 500 мм;
- калиброванные по площади апертуры диафрагмы должны иметь следующие номинальные диаметры: 2; 5; 10; 20 и 30 мм.

Данный метод воспроизведения единицы освещенности лег в основу создания фотометра малых уровней освещенности, который впоследствии вошел в состав НЭССО [5, 6].

Немаловажную роль в выборе метода сыграл тот факт, что калировки светоизмерительной лампы по силе света, светорассеивающей пластины по коэффициенту яркости и отверстия диафрагмы по диаметру можно осуществить на эталонах, имеющихся в БелГИМ. Структурная схема фотометра представлена на рисунке 2.

Основными источниками неопределенности воспроизведения единицы освещенности с помощью данной установки являются:

- нестабильность источника питания светоизмерительной лампы;
- дрейф излучения лампы;
- флуктуации излучения лампы;
- погрешность измерения тока лампы;
- неточность определения коэффициента яркости диффузно отражающей пластины;
- отклонения параметров диафрагм;
- погрешность определения расстояний.

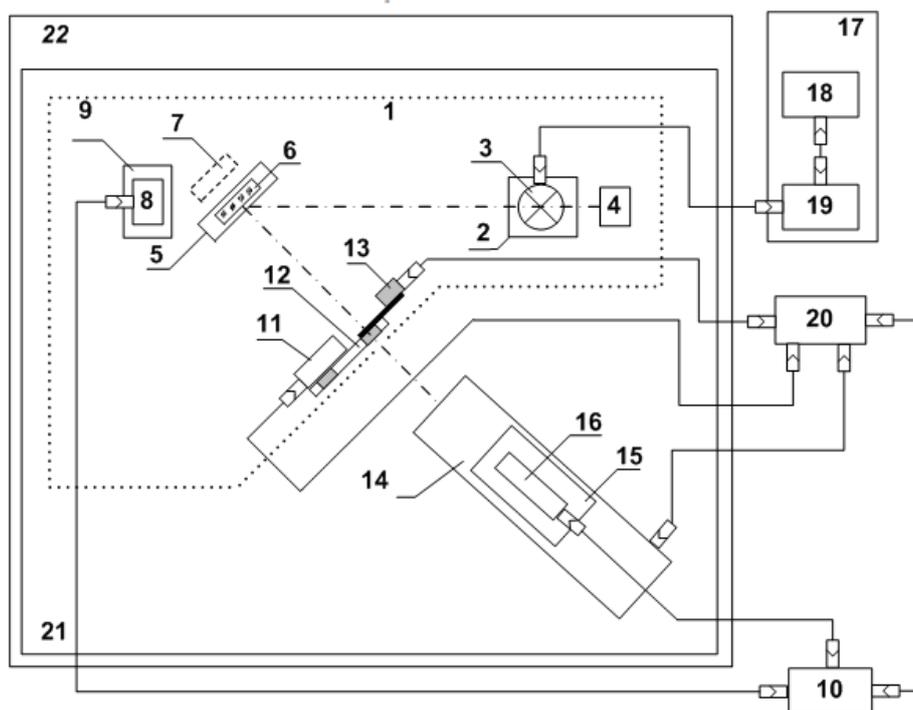


Рисунок 2 – Структурная схема фотометра малых уровней освещенности:

- 1 – блок осветителя; 2 – позиционирующее устройство с держателем светоизмерительной лампы силы света; 3 – комплект светоизмерительных ламп силы света; 4 – лазер; 5 – позиционирующее устройство с держателем диффузно отражающей пластины; 6 – диффузно отражающая пластина; 7 – юстировочное зеркало; 8 – прецизионный приемник оптического излучения; 9 – позиционирующее устройство для прецизионного приемника оптического излучения; 10 – мультиметр; 11 – турель; 12 – диск с калиброванными диафрагмами; 13 – светонепроницаемая заслонка; 14 – автоматизированная рельсовая система; 15 – позиционирующее устройство для прецизионных и испытуемых фотометров; 16 – комплект прецизионных фотометров; 17 – система питания и контроля светоизмерительных ламп силы света; 18 – блок питания светоизмерительных ламп силы света; 19 – мультиметр; 20 – персональный компьютер; 21 – общий светонепроницаемый корпус; 22 – оптический стол

Для проверки правильности воспроизведения единицы освещенности с помощью фотометра малых уровней освещенности и отработки программного обеспечения проведены экспериментальные исследования, где в качестве эталонного приемника оптического излучения применен трап-детектор Trap-SST-D №1007.

Исследования проводились для каждой калиброванной диафрагмы при расстоянии между телом накала лампы СИС 10-5 № 9 и центром рабочей поверхности светорассеивающей пластины $l_1 = 0,5$ м. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 3.

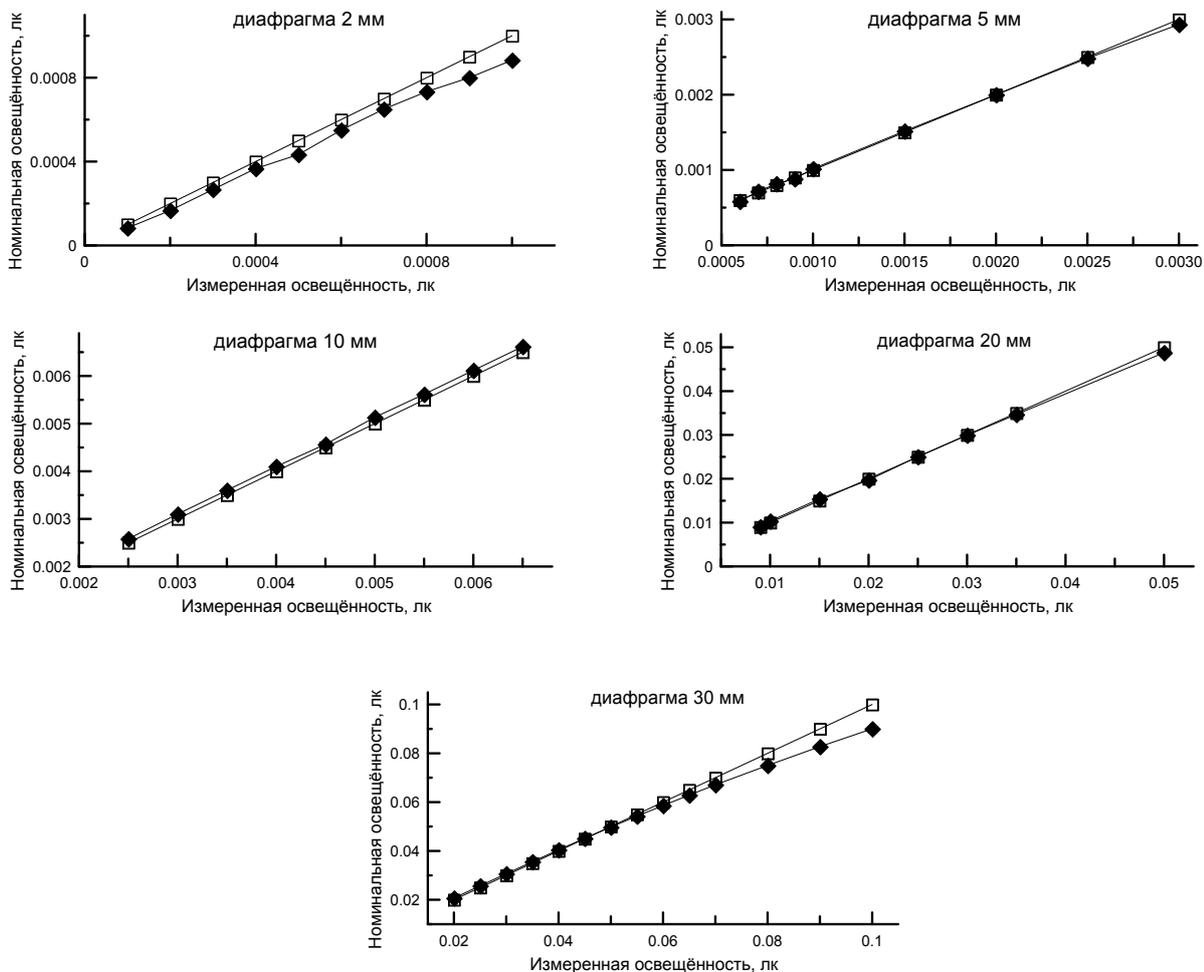


Рисунок 3 – Результаты экспериментальных исследований освещенностей с разными диафрагмами: □ – зависимость номинальной освещенности и освещенности, полученной расчетным путем; ◆ – зависимость номинальной освещенности и освещенности, воспроизводимой фотометром малых уровней освещенности и измеренной с помощью трап-детектора

При использовании каждой из калиброванных диафрагм следует установить ограничения диапазонов освещенности, что необходимо указать в эксплуатационной документации фотометра. Это обусловлено тем, что при приближении приемника оптического излучения к плоскости калиброванной диафрагмы на расстояние, меньшее 10-кратного значения диаметра диафрагмы, нарушается закон квадратов расстояний для расчета освещенности, принятый в фотометрии.

Разница между номинальным и измеренным значением освещенности при использовании диафрагмы 2 мм объясняется рассогласованием диаметра диафрагмы с апертурной диафрагмой эталонного приемника оптического излучения. Для уменьшения погрешности воспроизведения единицы освещенности с помощью этой диафрагмы следует вводить корректирующий множитель k_1 , определяемый формулой:

$$k_1 = \frac{d_1^2}{d_2^2}, \quad (6)$$

где d_1 – диаметр апертурной диафрагмы эталонного приемника, d_2 – диаметр калиброванной диафрагмы в фотометре.

Заключение

Разработан и изготовлен фотометр малых уровней освещенности. Его характеристики подтверждены результатами метрологической аттестации и составляют:

- диапазон воспроизведения освещенности: от $1 \cdot 10^{-3}$ до 1,0 лк;
- границы неисключенной систематической погрешности передачи единицы освещенности: $\pm 1,6\%$;
- среднеквадратическое отклонение результата наблюдения освещенности: 0,001 безразм. ед.

Список использованных источников

1. Национальный эталон единицы силы света и освещенности / В.Е. Плюта [и др.] // Метроло-

гия и приборостроение. – 2002. – № 3 – 4. – С. 15–17.

2. Ohno, Y. NIST measurement services: Photometric calibrations. / Y. Ohno // NIST Special Publication 250-37. U.S. Government Printing Office, Washington. – 1997. – 85 p.
3. Metzdorf, Y. Network and traceability of the radiometric and photometric standards at the PTB / Y. Metzdorf // Metrologia. – 1993. – Vol. 30. – P. 403–408.
4. International Comparison: International comparison of the illuminance responsivity scales and units of luminous flux maintained at the HUT (Finland) and the NIST (USA) / J. Hovila [et al.] // Metrologia. – 2002. – Vol. 39. – P. 219–223.
5. Патент RU 95398U1 от 02.03.2010 на полезную модель «Установка для хранения и передачи размера единицы освещенности». Заявители – Институт физики НАН Беларуси, БелГИМ. Авторы – О.Б. Тарасова (БелГИМ), С.В. Никоненко (Институт физики).
6. Патент ВУ 6367 U от 30.06.2010 на полезную модель «Установка для хранения и передачи размера единицы освещенности». Заявители – БелГИМ, Институт физики НАН Беларуси. Авторы – О.Б. Тарасова (БелГИМ), С.В. Никоненко (Институт физики).

Dlugunovich V.A., Nikanenko S.V., Tarasova O.B.

Illuminance measurement in the range from 0,001 to 1,000 lx

During modernization of the National standard of units of luminous intensity and illuminance of the Republic of Belarus in 2008–2010 the photometer for small levels of illuminance has been developed. The method of creation of a scale of small levels of illuminance is described. The scheme of the photometer and its basic characteristics are presented. (E-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by)

Key words: illuminance, photometry.

Поступила в редакцию 27.12.2012.