

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПЕРЕДАЧИ СВЕТОВЫХ ЕДИНИЦ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЫБОРОМ РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ЛАМПЫ

А.Д. Купко, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



Представлены результаты экспериментальных исследований распределения излучения от нити светоизмерительной лампы. Проанализированы погрешности измерения световых единиц, связанные с выбором режима горения лампы.

*The results of experimental research into the distribution of radiation from the filament of photometric lamps are presented. Light unit measurement errors due to the lamp burning mode are analyzed.*

При измерении световых величин используются приемники, спектральная чувствительность которых скорректирована в соответствии с ГОСТ 8.332-78 [1]. Идеальной коррекции достичь невозможно, поэтому возникает погрешность, связанная как со спектральными характеристиками приемника, так и со спектральными характеристиками регистрируемого излучения. Поправочный коэффициент (отношение того, что нужно измерить, к тому, что измеряет прибор) будет разным для излучений с различными спектрами. Однако на этапе передачи единицы от эталона к рабочим средствам измерительной техники принято минимизировать вносимую погрешность благодаря тому, что во всех случаях используется стандартный источник – источник типа А. Особенно актуальным такой подход был в то время, когда широко использовались селеновые люксометры без дополнительной коррекции спектральной чувствительности. Спектральный состав источника типа А совпадает со спектром абсолютно черного тела при температуре 2856 К. Модель черного тела с такой температурой – сложное дорогостоящее устройство, поэтому используют

вольфрамовые лампы накаливания. Технические условия светоизмерительных ламп регламентируются ГОСТ 10771-82 [2]. Температура этих ламп должна быть такой, чтобы спектр их излучения максимально походил на спектр излучения источника типа А. Для световых измерений обычно используются лампы со спиральным телом накаливания. Коэффициент излучения вольфрама исследован [3], однако для разных углов и разных длин волн коэффициенты отличаются. Поэтому связь спектра излучения от спиральной лампы накаливания со спектром излучения абсолютно черного тела достаточно сложна даже в предположении постоянства температуры по всему телу накаливания. В связи с этим задача выбора режима питания лампы для работы в качестве источника типа А является нетривиальной, а потребность в таком источнике существует в каждой лаборатории, которая занимается поверкой и калибровкой приборов для световых измерений.

Данная статья посвящена минимизации погрешностей при передаче световых единиц за счет оптимизации способа выбора режима горения лампы с учетом существующей в Украине ситуации и действующих нормативных документов. Представлены результаты экспериментальных исследований и теоретического анализа затронутых вопросов.

Необходимость экспериментальных исследований вызвана тем, что процессы при излучении светоизмерительной лампы существенно отличаются от процессов при излучении абсолютно черного тела. Следует выяснить, в чем заключается это отличие и к чему оно приводит. Для экспериментальных исследований погрешностей метода, связанных с неравномерным излучением с поверхности нити накала лампы, была собрана установка, схема которой представлена на рис. 1. Нить накала лампы фотографировалась цифровым фотоаппаратом.

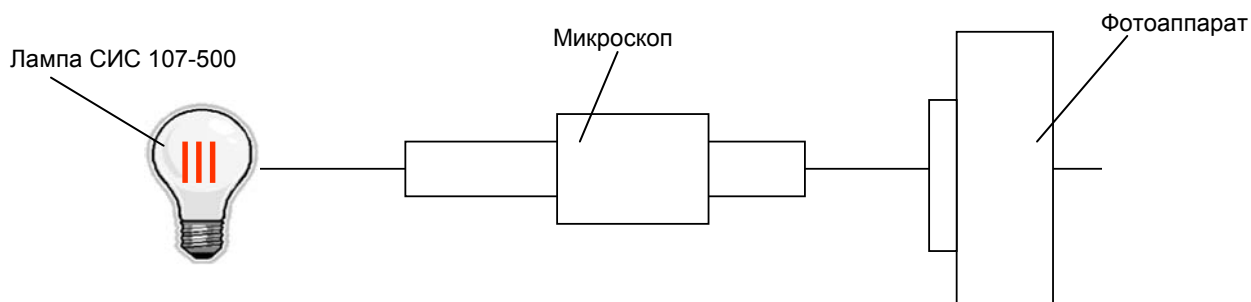


Рис. 1. Схема установки для изучения неравномерности излучения нити накала лампы

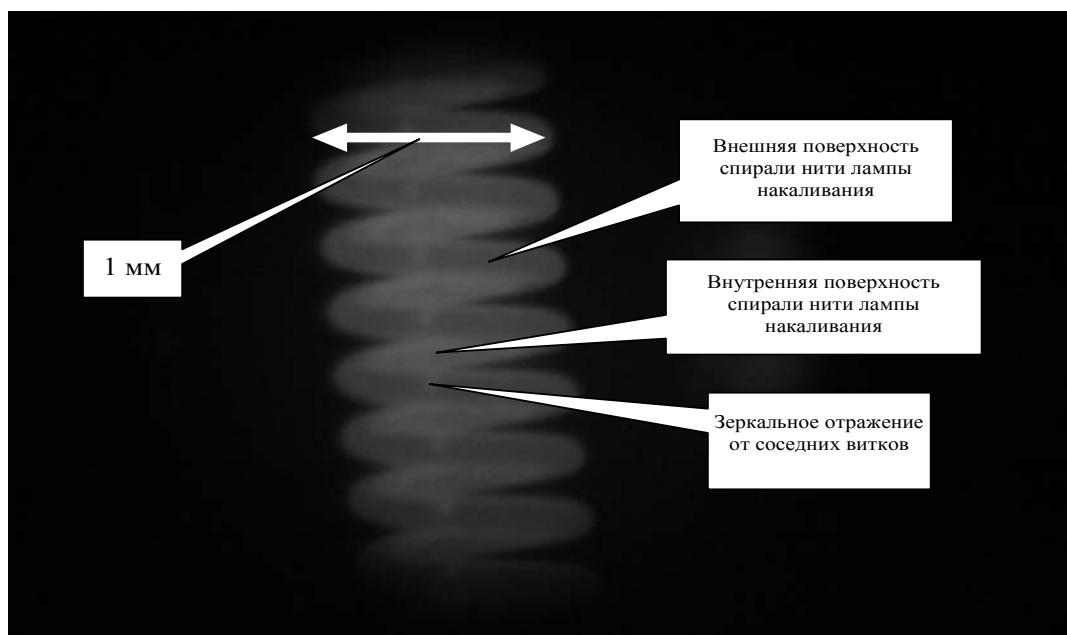


Рис. 2. Характерный вид тела накаливания лампы СИС 107-500

Типичная фотография нити накала лампы представлена на рис. 2. На рисунке хорошо видно, что внутри лампы существуют переотражения, а возможно, и зона повышенной температуры, что приводит к увеличению излучения с единичной поверхности. Видны переотражения от соседнего ряда витков нити, а также увеличение яркости излучения для участков, видимых при больших углах излучения (вскользь). Можно заметить, что яркость участков с зеркальным отражением от соседних витков ненамного меньше, чем яркость внутренних участков спирали лампы. Это говорит о том, что предположение о равномерном нагреве всей нити накала обосновано. На краях, вблизи держателей, видно заметное уменьшение яркости нити. С учётом того, что соотношение видимых площадей внешней и внутренней поверхностей тела на-

каливания лампы зависит от юстировки, вопрос о соотношении вкладов сигналов от них представляется важным.

Малые размеры нити накала затрудняют изучение распределения излучения по его поверхности. Для измерений была собрана установка на основе пирометра ЭОП-66, схема которой представлена на рис. 3.

Принцип измерений пирометром ЭОП-66 состоит в выравнивании яркости лампы накаливания внутри пирометра и исследуемого участка поверхности. Выравнивание яркости производится за счет изменения величины тока через нить накала лампы внутри пирометра. Нить обращена к наблюдателю плоским участком, поэтому искажений, обусловленных разными углами излучения, не возникает. Процедура измерений состояла в том, что изображе-

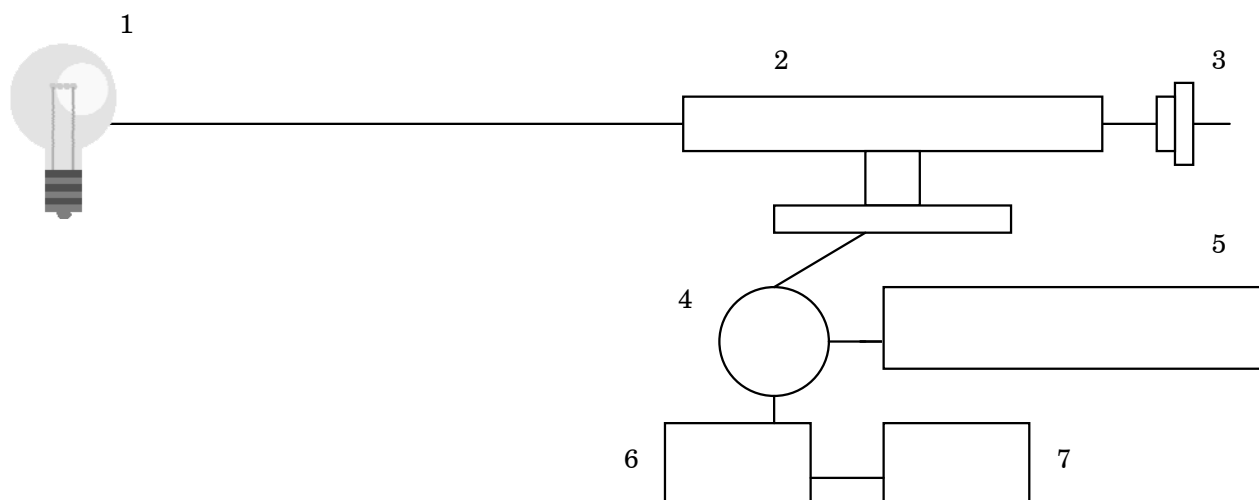


Рис. 3. Схема установки для исследования распределения яркостной температуры по поверхности спирали лампы: 1– лампа СИС 107-500; 2 – пирометр ЭОП-66; 3 – цифровой фотоаппарат; 4 – катушка сопротивления; 5 – вольтметр В 7-46; 6 – потенциометр; 7 – стабилизированный источник питания

ние нити накала пирометра поочередно подводилось к разным участкам изображения нити накала лампы, выравнивались яркости и фиксировался ток. Ток пересчитывался в яркостные, а затем и в истинные температуры при помощи аппроксимационной формулы с учетом коэффициента излучения вольфрама и коэффициента пропускания стекла лампы. Таким образом, истинная температура лампы, в данном случае условная, подразумевает, что коэффициент излучения тела накаливания лампы совпадает с коэффициентом излучения вольфрама [3], а коэффициент пропускания стекла лампы не зависит от длины волны и постоянен для любого места колбы лампы. Поскольку области визирования малы, проводились многократные измерения группами по 10. Для определения погрешности измерения проводились в середине нити накала лампы в течение нескольких дней при неизменном режиме горения лампы. Максимальная разница между показаниями в группе менялась в разные дни (видимо, в зависимости от восприятия оператора) от 23 до 111 К.

Также были проведены измерения распределения температур в середине и на концах нити. Результаты измерения температуры в средней части и на вершине тела накаливания вблизи держателей для внутренней и внешней частей спирали представлены на рис. 4. С использованием аналогичных подходов было определено, что концы тела накаливания холоднее, чем середина, на 90 К (внутренняя часть тела накаливания) и 70 К (внешняя часть).

По всему телу накаливания лампы истинная температура меняется от 2650 до 3000 К. В результате проведенных измерений становится очевидно, что в теле накаливания лампы распределение яркости соответствует распределению температуры от максимальной до минимальной приблизи-

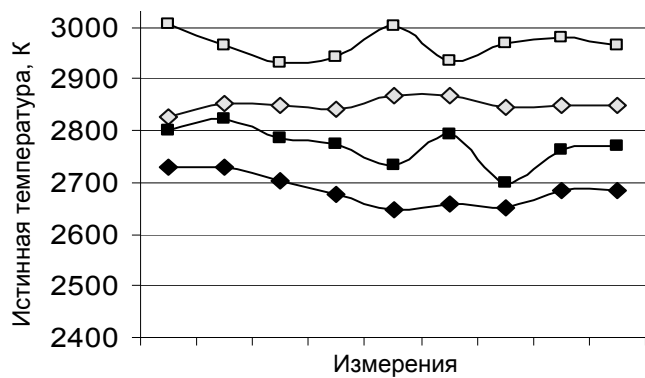


Рис. 4. Результаты измерения температуры лампы СИС 107-500 в различных точках тела накаливания: ◇ – вершина, внутренняя часть; ◆ – вершина, внешняя часть; □ – середина, внутренняя часть; ■ – середина, внешняя часть

тельно на 350 К. Поэтому характеризовать режим горения лампы температурой 2856 К следует осторожно, уточняя, какая именно температура подразумевается.

Для рассмотрения вопроса об экспериментальной возможности определения режима горения лампы по цветовой температуре были проведены измерения яркостной температуры светоизмерительной лампы СИС 107-500 в диапазоне напряжений от 104 до 109 В. Этот диапазон соответствует максимальному разбросу в режимах для подавляющего большинства ламп. Яркостная температура пересчитывалась в истинную, как описано ранее. Результаты измерений представлены на рис. 5.

Учитывая, что погрешности определения температуры достигали в данном случае 30 К, неудивительно, что при изменении напряжения на 5 В не удалось заметить четкой зависимости температуры от напряжения питания как для внешней части тела накаливания, так и для внутренней.

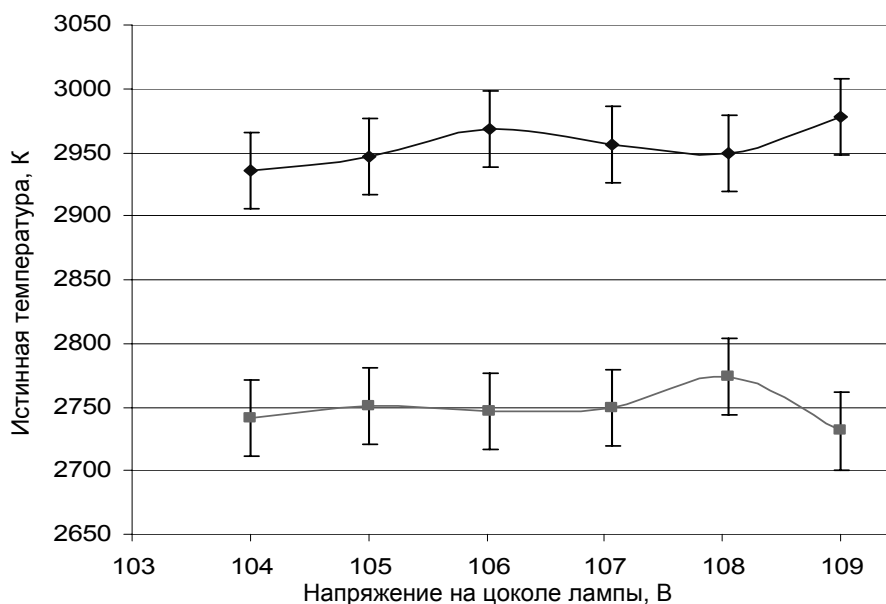


Рис. 5. Результаты определения истинной температуры светоизмерительной лампы СИС 107-500 при помощи пирометра ЭОП-66: ◇ – внутренняя часть тела накаливания; □ – внешняя часть тела накаливания

Вполне вероятно, что такой результат обусловлен трудностями экспериментального определения температуры для малых объектов. Поэтому были проведены дополнительные измерения при помощи цифрового фотоаппарата. Схема измерений представлена на рис. 6. Излучение лампы СИС 107-500 (1) попадало на молочное стекло МС20 (2). Освещенная сторона стекла (а) фотографировалась цифровым фотоаппаратом (3). По файлам изображения определялись изменения координат цветности при изменении напряжения питания. Метод основан на обработке сигналов  $r$ ,  $g$ ,  $b$  пикселей в матрице фотоаппарата и подробно описан в [4], погрешности метода проанализированы в [5]. Для того чтобы гарантировать линейность измерений, расстояние до фотоаппарата менялось (b, c, d). Суммарная погрешность метода сравнения координат цветности при помощи фотоаппарата не превышает 0,02, однако, с учётом постоянства условий наблюдения, составляет около 0,01. Детально результаты опубликованы в [6].

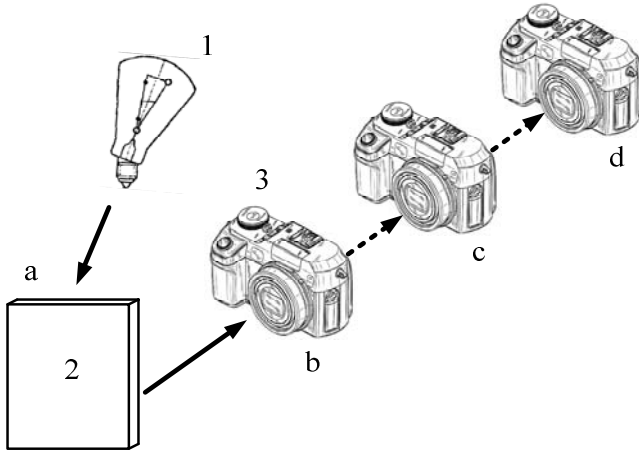


Рис. 6. Схема измерений изменения координат цветности при помощи цифрового фотоаппарата: 1 – СИС-107-500; 2 – стекло МС 20; 3 – фотоаппарат

Изменялись режимы работы фотоаппарата, однако монотонной зависимости координат цветности от напряжения питания лампы выявлено не было.

Суммируя результаты экспериментальных исследований, можно утверждать, что требования ГОСТ 10771-82 [2] к определению режима горения лампы, по крайней мере, спорны. Ситуацию следует проанализировать теоретически, исходя из зафиксированных погрешностей измерения спектральных характеристик, температуры и координат цветности.

Поскольку формально для определения режима горения следует обеспечить соответствие спектра лампы спектру черного тела с температурой 2856 К, то следует использовать поверочную схему [7], возглавляемую спектрорадиометрическим эталоном ДПЕ 11-06-06. В соответствии с этой по-

верочной схемой, погрешности измерения относительной спектральной плотности энергетической силы излучения для рабочих эталонов составляют от 2 до 6 % и для рабочих средств измерения – от 6 до 12 %. Однако такой способ крайне затруднителен из-за больших затрат времени, необходимого для спектральных измерений. Поэтому следует проанализировать и другие возможности.

Наиболее простой способ – использование измерений цветовой температуры. Идеологически такой способ основывается на предположении, что если при измерении излучения от эталонной и калибруемой лампы обеспечить совпадение относительной спектральной плотности энергетической силы излучения на двух длинах волн, то будет обеспечено и совпадение этих величин по всему спектру. Очевидно, что в первом приближении это верно, так как в лампах используется одинаковый материал – вольфрам. Однако различия в форме нити, структуре металла, наличие переотражений оставляют множество вопросов, связанных с погрешностями метода. Погрешности измерения цветовой температуры регламентируются поверочной схемой [8]. Погрешности пирометров цветовой температуры (рабочих средств измерений) при температурах до 2800 °С составляют от 10 до 35 °С. Следует проанализировать погрешности определения относительной спектральной плотности энергетической силы излучения при использовании цветовой пирометра. Цветовая температура рассчитывается для двух определенных длин волн, поэтому необходимо уточнить, каких именно. Поскольку удельные координаты цвета  $x$ ,  $y$ ,  $z$  имеют максимумы на 450, 555 и 600 нм, представляется разумным рассматривать отношение силы излучения на длинах волн 450 и 600 нм. Многие цветовые пирометры работают на таких длинах волн. Рассчитаем изменение координат цветности и соответствующие отношения для сил излучения на этих длинах волн.

Поскольку корреляционная цветовая температура определяется по координатам цветности, следует определить, к каким погрешностям приведет использование колориметров в соответствии с поверочной схемой [9]. Минимальная погрешность измерения координат цветности рабочими колориметрами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  равна 0,002.

В соответствии с ГОСТ 10771-82 режим горения светоизмерительной лампы в ранге рабочего эталона определяется по номинальной температуре, для которой указывается напряжение на цоколе лампы. Для лампы СИС 40-100, которая наиболее часто используется в качестве источника типа А, даже для рабочего средства измерения режим определяется по номинальной температуре. Величина тока через лампу указывается как справочная величина. Очевидно, что имеется некое падение напряжения на подводящих проводах и на контактах между патроном и цоколем лампы. В связи с этим было бы логичнее измерять именно ток, проходя-

щий через лампу, но сложилось именно существующее положение. Необходимо проанализировать, к каким погрешностям приводит измерение напряжения на лампе вместо тока через лампу, и сравнить эти погрешности с допустимыми в соответствии с ДСТУ 3394-96 [10].

Анализ погрешностей проводился на основе материалов по ежегодным поверкам светоизмерительных ламп в ННЦ “Институт метрологии” с 1996 г. и по настоящее время, в частности, для некоторых областных метрологических центров определялись зависимость силы света от напряжения на цоколе светоизмерительной лампы, а также зависимость цветовой температуры от того же напряжения. Для ламп СИС 40-100 увеличение напряжения на 1 В обычно приводит к увеличению силы света на 7–8 кд и к увеличению цветовой температуры на 32–37 К. Для ламп СИС 107-500 соответствующие коэффициенты составили 13–14 кд/В и 9–10 К/В. Эти данные позволяют связать электрические параметры лампы с ее световыми и температурными характеристиками, в частности, оценить вклад в погрешность определения силы света принятого способа определения режима лампы (по напряжению). Характерные примеры: 2001–2011 гг. сопротивление лампы СИС 40-100 № 121 (~20 Ом) менялось на 0,38 Ом (1,5 %), а при измерениях во время одной поверки на 0,08 Ом, за те же годы сопротивление лампы СИС 107-500 № 254 (33 Ом) менялось на 0,2 Ом (0,9 %), а при измерениях во время одной поверки на 0,04 Ом. Для других ламп характерны приблизительно такие же изменения. К сожалению, статистика определения сопротивления ламп в месте их эксплуатации отсутствует. Однако разовые измерения сопротивления, проведенные для лампы СИС 40-100 разных конструкций патронов, показали, что они так же могут отличаться на 0,4 Ом. Для лампы СИС 107-500 зафиксировано отличие сопротивления в 0,2 Ом.

Таким образом, для разных способов задания режима горения ламп определялись спектральные погрешности (отклонение отношения спектральной силы излучения для длин волн 450 и 600 нм), погрешности определения температуры (все результаты пересчитаны для истинной температуры), погрешности определения координат цветности. Для каждого из способов задания режима горения ламп (по спектру, цветовой температуре, координатам цветности, напряжению на цоколе) определялись погрешности определения остальных характеристик. Например, с учётом погрешности определения цветовой температуры рассчитывались погрешно-

сти определения спектра, погрешности определения координат цветности и погрешность определения силы света. Погрешности определения силы света рассчитывались для двух люксметров – условно хорошего 1 и условно посредственного 2. Поскольку внешне спектральные чувствительности люксметров мало отличаются от  $V(\lambda)$  и друг от друга, в таблице приведены общепринятые характеристики соответствия спектральной чувствительности относительной спектральной чувствительности монохроматического излучения для дневного зрения. Приведены коэффициент актичности, характеристики  $\Delta_{\max}$ ,  $\alpha_{ИК}$ ,  $\alpha_{УФ}$  по [11], а также характеристика  $f'_1$  по [12].

Расчет оценки погрешностей, возникающих при определении режима лампы по спектральным характеристикам, проводился, основываясь на погрешности 6 % – минимальной погрешности для рабочих средств измерений. Соотношение спектральной плотности силы излучения при температуре 2856 К для длин волн 450 и 600 нм составляет 0,257. Для 6-процентного отклонения этой величины рассчитывались температуры, при которых такое соотношение достигалось. Они составили 2794 и 2917 К, то есть различие больше, чем по ДСТУ 3194-2005 [8]. Соответствующие этим температурам координаты цветности составили  $x=0,4521$ ;  $y=0,4088$  и  $x=0,4428$ ;  $y=0,4061$ , то есть различие составило  $\Delta x=0,0093$  и  $\Delta y=0,0027$  (больше, чем по [9]). Для этих же температур коэффициенты актичности составили для люксметра 1...0,11 %, для люксметра 2...0,2 %. Такие различия в температурах приведут к изменению силы света лампы СИС 40-100 на 13 кд (33 %), а для лампы СИС 107-500 на 87 кд (17 %), что превосходит погрешности, допустимые в соответствии с ДСТУ 3394-96 для рабочих эталонов (1,5...2,5 %) и для люксметров – рабочих средств измерений (2...15 %).

Расчет оценки погрешностей, возникающих при определении режима лампы по температуре, проводился, основываясь на погрешности 10 °С – минимальной погрешности для цветковых пирометров (рабочих средств измерения), в соответствии с [8]. Температуры в данном случае составляют 2846 и 2866 К. Соответствующие этим температурам координаты цветности составили  $x=0,4482$ ;  $y=0,4077$  и  $x=0,4467$ ;  $y=0,4073$ , то есть различие составило  $\Delta x=0,0015$  и  $\Delta y=0,000441$  (меньше, чем по [9]). Соотношение спектральной силы излучения лампы для длин волн 450 и 600 нм при этом изменяется на 2 %, то есть меньше, чем по [7]. Для этих же температур коэффициенты актичности составили для

Характеристики люксметров для оценки коэффициентов относительной актичности

Люксметр	Характеристики				
	Коэффициент актичности, %	$\Delta_{\max}$ , %	$\alpha_{УФ}$ , %	$\alpha_{ИК}$ , %	$f'_1$ , %
1	1,06	2,04	0,00196	0,481	4,73
2	6,04	5,84	0,00424	0,174	10,95

люксметра 1 – 0,018 %, для люксметра 2 – 0,023 %. Такие различия в температурах приведут к изменению силы света лампы СИС 40-100 на 2,1 кд (5 %), а для лампы СИС 107-500 на 14 кд (2,8 %), то есть укладываются в рамки погрешностей, допустимых в соответствии с ДСТУ 3394-96 [10] для рабочих ламп и люксметров.

Расчет оценки погрешностей, возникающих при определении режима лампы по координатам цветности, проводился, основываясь на погрешностях  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , равных 0,002. Определялись температуры, приводящие к таким изменениям координат цветности. Разницу в  $\Delta x=0,002$  обеспечивают температуры 2827 и 2882 К (разница 55 К – больше, чем по [8]). Для этих температур коэффициенты активности для люксметра 1 составили 0,05 %, для люксметра 2 – 0,06 %. Результаты расчета для  $\Delta y=0,002$  (разница 191 К) не рассматривались, так как для того чтобы различать точки на плоскости ( $x, y$ ), достаточно, чтобы они отличались по одной координате. Соответствующие этой температуре различия в силе света составили 12 кд для лампы СИС 40-100 (29 %) и 78 кд (16 %) для лампы СИС 107-500, то есть больше, чем по [10].

Расчет оценки погрешностей, возникающих при определении режима лампы по напряжению на лампе, проводился по приведенным ранее коэффициентам связи напряжения, силы света и температуры. Для лампы СИС 40-100 характерная величина переходного сопротивления патрон-цоколь приводит к различию силы света в 4,5 кд (11 %), для лампы СИС 107-500 – в 13 кд (2,6 %) в пределах, допустимых для люксметров – рабочих средств измерения. Это соответствует различию в температурах нити накала 21 К (2835...2877 К) и 9,5 К (2846,5...2865,5 К) для ламп СИС 40-100 и СИС 107-500 соответственно, то есть такого же порядка, как по [8].

Соотношение спектральной силы излучения лампы СИС 40-100 для длин волн 450 и 600 нм при этом изменяется на 4 % – меньше, чем по [7], коэффициенты активности для люксметров 1 и 2 – приблизительно на 0,04 %. Координаты цветности для лампы СИС 40-100 изменялись на  $\Delta x=0,0032$  и  $\Delta y=0,00093$ .

Соотношение спектральной силы излучения лампы СИС 107-500 для длин волн 450 и 600 нм при этом изменяется на 1,9 % – меньше, чем по [7], коэффициенты активности для люксметра 1 – на 0,017 %, для люксметра 2 – на 0,021 %. Координаты цветности для лампы СИС 107-500 изменялись на  $\Delta x=0,00145$  и  $\Delta y=0,00042$ .

Для всех проанализированных случаев различие в коэффициентах активности для двух рассмотренных люксметров не превышало 0,2 %, что существенно меньше, чем погрешности, допустимые для рабочих эталонов. Если провести ту же работу для других люксметров результаты будут несколько отличаться, но вывод о том, что изменение коэффициента активности (то есть именно то, из-за чего и введено требование использования

источника типа А), обусловленное выбором режима горения лампы гораздо меньше, чем допустимые погрешности измерения, останется справедливым. Учитывая повсеместный переход от хранения и передачи световых величин при помощи ламп к хранению и передаче при помощи приемников, а также то, что качество коррекции спектральной чувствительности приемников растет, можно сделать вывод о том, что особого смысла в определении режима светоизмерительных ламп при помощи корреляционной цветовой температуры в настоящее время уже нет. Режим может определяться любым рассмотренным способом при изготовлении лампы или при ее аттестации, проще всего, по номинальному значению напряжения. Фиксироваться же режим лампы должен по току, протекающему через лампу, для исключения влияния сопротивления переходных контактов. Внедрение такого подхода потребует соответствующих изменений в нормативной документации, а в дальнейшем приведет к существенному упрощению процедуры определения силы света светоизмерительных ламп.

#### Список литературы

1. ГСИ. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения: ГОСТ 8.332-78. – [Дата введения 1980-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 6 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
2. Лампы накаливания электрические светоизмерительные рабочие. Технические условия: ГОСТ 10771-82. – [Дата введения 1983-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 16 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
3. Излучательные свойства твердых материалов / под ред. А.Е. Шейндлина и др. – М.: Энергия, 1974. – 471 с.
4. Купко А.Д. Контроль цвета источников света цифровым фотоаппаратом / А.Д. Купко, М.В. Волошин // Світло Люкс. – 2007. – № 6. – С. 62–65.
5. Купко А.Д. Контроль координат цветности дорожных знаков / А.Д. Купко // Український метрологічний журнал. – 2008. – № 4. – С. 37–43.
6. Купко О.Д. Аналіз характеристик світловимірювальних ламп розжарювання за допомогою цифрового фотоапарата / О.Д. Купко В.М. Славков, О.П. Давиденко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2011. – № 2. – С. 28–33.
7. Державна повірочна схема для засобів вимірювання спектральної густини енергетичної яскравості в діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 25 мкм, спектральної густини сили випромінювання та спектральної густини енергетичної освітленості в діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 2,5 мкм, потужності випромінювання, сили випромінювання та енергетичної освітленості в спектральних інтервалах шириною від  $1 \cdot 10^{-4}$  мкм

- до  $2 \cdot 10^{-2}$  мкм в діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 2,5 мкм (на розгляді).
8. Державна повірочна схема для засобів вимірювання температури. Безконтактні засоби вимірювання температури: ДСТУ 3194:2005. – [Чинний від 2006-01-01]. – К.: Держстандарт України, 2006. – (Національний стандарт України).
  9. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань координат кольору та координат колірності (на розгляді).
  10. Державна повірочна схема для засобів вимірювань світлових величин: ДСТУ 3394-96. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України. – (Національний стандарт України).
  11. Преобразователи излучения измерительные для световых измерений. Характеристика относительной спектральной чувствительности. Требования и классификация: ОСТ 16 0 800. 814-81. – [Дата введения 1983-09-01]. – М.: Изд-во стандартов. – (Отраслевой стандарт).
  12. Methods of characterizing illuminance meters and luminance meters: International commission on illumination. – Publication CIE No 69. – Vienna, Austria, 1987.