

Измерение бактерицидного потока ультрафиолетовых трубчатых ртутных ламп низкого давления

А.Л. ВАСЦЕРМАН

E-mail: alexzo@list.ru

Аннотация

В статье предлагается альтернативный метод измерения потока излучения ртутных трубчатых бактерицидных медицинских ламп низкого давления. Метод базируется на трёх рабочих гипотезах, экспериментально подтверждённых: 1) индикатриса распределения сил излучения в продольной плоскости трубчатых ртутных ламп без покрытия колбы с достаточной точностью описывается эллипсом; 2) фотометрическое тело представляет собой эллипсоидальный тор; 3) плазма электрического разряда бактерицидных ламп прозрачна для видимого и ультрафиолетового излучения.

Ключевые слова: гониофотометр, объёмный и поверхностный трубчатые излучатели, телесный угол, фотометрическое тело, закон Ламберта.

Значение ультрафиолетового бактерицидного потока $\Phi_{\text{БК}}$ и, соответственно, бактерицидной отдачи $\Phi_{\text{БК}}/P_{\text{л}}$ ртутных трубчатых ламп низкого давления, а также индикатрисы распределения сил излучения в продольной плоскости являются основными параметрами для решения той или иной задачи в медицинской практике, в том числе для обеззараживания воды и воздуха в помещениях ЛПУ. Существует ГОСТ 8.760–211 по методу измерения бактерицидного потока излучения трубчатых ультрафиолетовых ламп размером не более 1,5 м по формуле:

$$\Phi_{\text{БК}} = \Omega E_{\text{БК}} R^2 \quad (1),$$

где $E_{\text{БК}}$ – бактерицидная облученность на расстоянии R от центра лампы до радиометра, спектральная чувствительность которого скорректирована с кривой бактерицидного действия УФ излучения (например, радиометра ТКА-UV или АРГУС – 06), Ω – геометрический фактор (или телесный угол), определяемый при измере-

нии потока излучения бактерицидных ламп с помощью гониофотометра.

К сожалению, в ГОСТ не указана методика вычисления значения телесного угла. Формула (1) справедлива, когда выполняется закон обратных квадратов, при котором отношение R к длине светящей части лампы L составляет не менее 10.

Существующие гониофотометры предназначены только для измерения потока световых источников излучения, а не ультрафиолетовых. Если в гониофотометре установить радиометр, фиксирующий ультрафиолетовое излучение, то можно в **относительных** единицах измерить значения бактерицидного потока $\Phi_{\text{отн}}$ и максимальной силы излучения $I_{\text{отн}}$ для трубчатых ламп и вычислить значение телесного по формуле:

$$\Omega = \Phi_{\text{отн}} / I_{\text{отн}}$$

К сожалению, из-за дороговизны оборудования приобрести гониофотометр могут лишь специализированные измерительные лаборатории, для рядовых же лабораторий он недоступен.

На практике выход может быть найден, если предположить, что лампа представляет собой трубчатый излучатель, излучение которого в пространстве подчиняется закону Ламберта, то есть $I_{\varphi} = I_0 \cos \varphi$. Тогда телесный угол вычисляется по формуле (2), приведенной в [1] для вычисления значения телесного угла только для трубчатых поверхностных простейших излучателей:

$$\Omega_{\text{ц}} = \Phi_{\text{БК}}/I_0 = 2\pi \int_0^{\pi} \sin^2 \varphi d\varphi = \pi^2 \cdot \text{ср} \quad (2)$$

где I_0 – максимальная сила излучения, $\Phi_{\text{БК}}$ – бактерицидный поток.

Или по формуле (3), приведенной в книге [2]:

$$\Omega_{\text{ц}} = S_{\text{ц}} / R^2 = \pi^2 \cdot \text{ср}, \quad (3)$$

где $S_{\text{ц}}$ – площадь поверхности цилиндрического тора, R – расстояние от центра лампы до поверхности тора. При этом поток вычисляется по формуле (1).

Это справедливо для трубчатых ламп с покрытием, например, люминесцентных ламп, у которых индикатриса распределения силы излучения в продольной плоскости описывается окружностью. Для трубчатых ртутных ламп без покрытия колбы это не так. В этом случае, что экспериментально установлено, индикатриса распределения сил излучения в продольной плоскости трубчатых ртутных ламп описывается эллипсом. Как правило, любая рабочая гипотеза является ценной, если она позволяет объяснить или предвидеть результат эксперимента.

Г.Н. Рохлин объяснил причину закономерности расхождения излучения в пространстве между двумя типами трубчатых разрядных ламп. Причина эта заключается в том, что у первой группы ламп разряд не прозрачен для собственного излучения, а у второй – прозрачен, что свидетельствует о малом коэффициенте поглощения излучения в объёме разряда [3]. Это согласуется с объяснением существующего явления академиком А.Л. Арцимовичем [4]: «В противоположность чёрному телу плазма при не слишком большой величине электронной концентрации почти совершенно прозрачна для видимого и ультрафиолетового излучения, а излучение плазмы наружу пропорционально объёму, занимаемому плазмой». Кварцевая или увиолевая колба лампы также пропускает ультрафиолетовое (линию 254 нм) и видимое излучение в существующих бактерицидных излучателях.

Первую группу ламп можно рассматривать, как поверхностные излучатели, а вторую – как объёмные, не подчиняющиеся закону косинуса Ламберта.

На рис. 1 приведены индикатрисы распределения сил излучения в продольной плоскости для двух типов трубчатых ламп. Из рис. 1 видно, что для поверхностных трубчатых излучателей индикатриса распределения сил излучения в продольной плоскости описывается окружностью, а для объёмных – эллипсом, у которого при-

няты «а» – как малая полуось, «в» – как большая полуось. В этом случае для поверхностных излучателей фотометрическое тело представляет собой круговой тор, а для объёмных – эллипсоидальный тор. Продольное сечение для кругового тора – окружность, а для эллипсоидального – эллипс.

Аналитического уравнения для вычисления телесного угла для трубчатых объёмных излучателей не существует. Для решения этой задачи можно воспользоваться формулой (3).

Тогда, учитывая, что периметр эллипса равен $Y = \pi(a+b)$ [5], получим уравнение для вычисления телесного угла трубчатых объёмных излучателей по формуле:

$$\Omega_3 = S_3 / R^2 = 2\pi a \times \pi(a+b) / (2a)^2 = \pi^2(a+b) / 2a, \text{ ср} \quad (4)$$

Если учесть, что для поверхностного трубчатого излучателя ($a = b$), тогда $\Omega_{\text{ц}} = \pi^2$ ср.

В книге Г.Н. Рохлина [3] приведено экспериментальное значение телесного угла трубчатых ксеноновых разрядных ламп, $\Omega_3 = (11-11,5)$.

В книге [6] приведена таблица 1 экспериментальных значений телесных углов для большинства типов трубчатых ртутных и ксеноновых ультрафиолетовых излучателей, что согласуется с данными Г.Н. Рохлина,

Несущественные расхождения значений телесных углов можно объяснить инструментальной погрешностью. Это случайные ошибки наблюдений, что позволяет сделать вывод о существующей закономерности. Методы математической статистики при многократных наблюдениях ($n = 6$) подчиняются нормальному распределению, при этом наиболее вероятным значением искомой величины является среднееарифметическое значение Ω_3 из n наблюдений и вычисляется по формуле:

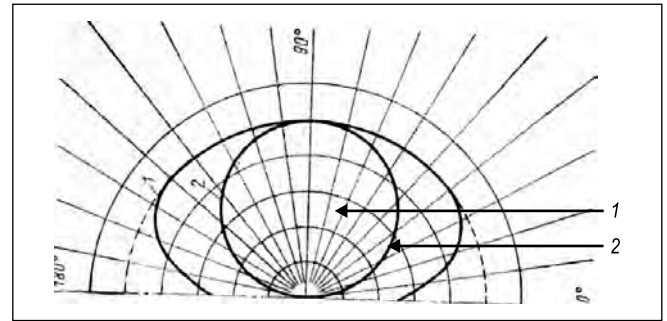
$$\bar{\Omega}_3 = \left(\sum_1^6 \Omega_n \right) / n = 11,305 \text{ ср.}$$

Несмещённое стандартное отклонение определяется по формуле

$$s = \left(\sum_1^6 (\Omega_n - \bar{\Omega}_3)^2 \right) / (n-1)^{0,5} = 0,1525.$$

Верхняя и нижняя границы доверительного интервала, внутри кото-

Рис. 1. Индикатриса сил излучения разрядных трубчатых излучателей в продольной плоскости: люминесцентная лампа (1) и ртутная лампа низкого давления (2)



рого заключено истинное значение $\bar{\Omega}_3$, определяются по формулам

$$\Omega_{\text{макс}} = \bar{\Omega}_3 + \Delta\Omega \text{ и}$$

$$\Omega_{\text{мин}} = \bar{\Omega}_3 - \Delta\Omega,$$

где $\Delta\Omega$ – абсолютная ошибка прямых наблюдений.

Значение $\Delta\Omega$ определяется по формуле:

$$\Delta\Omega = (t_c \cdot s) / n^{0,5} = (2,58 \cdot 0,1525) / 6^{0,5} = 0,16$$

Где t_c – коэффициент Стьюдента, значение которого определяется для доверительного интервала как

$$\sigma t_{0,95} = 2((n-1)/(n-3))^{0,5} = 2,58.$$

Тогда верхняя и нижняя границы доверительного интервала равны 11,46 и 11,14 соответственно.

Все результаты наблюдений находятся в этом интервале. Отклонение от среднего значения телесного угла 11,3 составляют менее двух процентов.

Для исключения значения грубого наблюдения, заметно отличающегося от значений серий n наблюдений, применяют критерий Стьюдента с помощью неравенства

$$(\Omega_6 - \bar{\Omega}_3) / s \leq t_c; \quad (11,5-11,3) / 0,1525 \leq 2,58.$$

Если соблюдается это неравенство, то наблюдение не считается грубым. Относительная ошибка измерений:

$$\sigma(\Omega) = (\Delta\Omega / \bar{\Omega}_3) \cdot 100 = (0,16 / 11,3) \cdot 100 = 1,4 \%$$

Очевидно, целесообразно значение телесного угла для трубчатых объёмных излучателей $\Omega_3 = 11,3$ ср принять за константу. Это подтверждается и тем, что индикатрисы распределения сил излучения в продольной плоско-

сти подобны для трубчатых объёмных излучателей, так как значения отношений полуосей эллипса практически одинаковы: $b/a = 1,29; 1,275; 1,3; 1,32; 1,26; 1,33$.

Тогда истинное значение потока вычисляется по формуле (1):

$$\Phi_{\text{БК}} = 11,3 E_{\text{БК}} R^2$$

при соблюдении закона обратных квадратов.

В реальных условиях выполнить это требование практически невозможно из-за больших габаритных размеров трубчатых излучателей. Какое же плечо должен иметь гониофотометр?

В.В. Мешков приводит в книге [7] формулу, которая при несоблюдении закона обратных квадратов позволяет определить освещённость от светящей линии конечных размеров при условии, что длина светящей части много больше, чем её диаметр. Такая формула применяется и за рубежом [8]. Эту формулу можно преобразовать для вычисления истинного значения бактерицидно потока излучения трубчатых ртутных ламп низкого давления:

$$\Phi_{\text{БК}} = 2 \Omega_3 L R E_{\text{БК}} / (2\sigma + \sin 2\sigma) \quad (5)$$

где:

$\Omega_3 = 11,3$ – телесный угол для трубчатых ртутных ламп низкого давления, ср;

$\sigma = \arctg L / 2R$, град;

$\sigma = \arctg L / 2 \ell R_* \pi / 180$, рад;

$E_{\text{БК}}$ – бактерицидная облученность на расстоянии R от центра лампы до радиометра;

L – длина светящей части лампы, м.

С целью упрощения вычислений можно воспользоваться программной электронной таблицей Excel.

В рабочий бланк таблицы заносятся следующие данные:

- В ячейку A1 – длина светящей части лампы в метрах, в ячейку A2 –

Экспериментальные значения телесных углов для трубчатых объемных излучателей по формуле (4)

Тип излучателя	Малая полуось эллипса, отн. ед.	Большая полуось эллипса, отн. ед.	Телесный угол (Ω_3), ср
ДРТ-250, ртутная лампа высокого давления. Кварцевая	1,75	2,25	11,27
ДРТ-400, ртутная лампа высокого давления. Кварцевая	4	5,1	11,2
ДБ-30, ртутная лампа низкого давления, Увиолевая	5	6,5	11,3
ИСПТ-6000, ксеноновая импульсная лампа. Кварцевая	4,3	5,7	11,46
ИСПТ-2000, ксеноновая импульсная лампа. Кварцевая	3,5	4,38	11,1
ДКсТ-10000, ксеноновая лампа. Кварцевая	3	4	11,5

расстояние от центра лампы до радиометра в метрах, в ячейку А3 – облучённость на радиометре в Вт/м²;

▪ Записывается формула (5) в формате *Excel* для объёмных облучателей –

$$A1 * A2 * A3 * 11, \\ 3 / (ATAN(A1 / (2 * A2))) + \\ + (SIN(2 * ATAN(A1 / (2 * A2)))) / 2).$$

В результате вычислений по формуле в *Excel* появится значение бактерицидного потока лампы в бактерицидных ваттах. Для поверхностного излучателя полученный результат необходимо разделить на 11,3 и умножить на π^2 . Исходные данные в ячейках можно изменять в процессе измерения, для получения результата нужно только нажимать *Enter*.

При проведении измерений необходимо выполнить следующие условия:

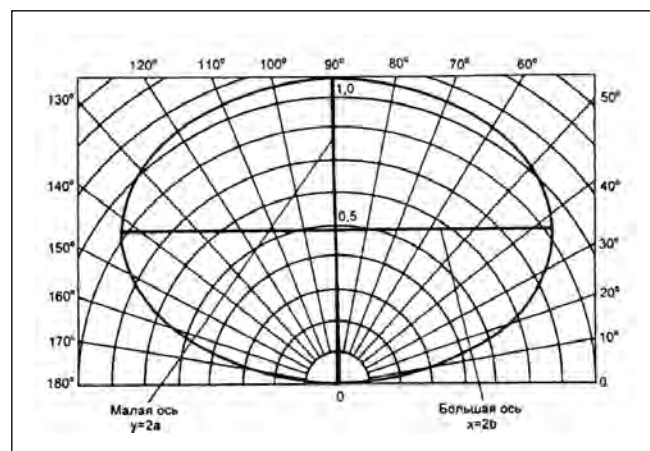
▪ стены помещения, в котором проводятся измерения, должны быть выкрашены чёрной краской, поглощающей УФ излучение.

▪ для исключения фонового излучения от стен, влияющего на результат (на что обратили внимание авторы статьи [9]) можно рекомендовать защитные экраны, исключающие облучение радиометра.

Это позволяет проводить измерения большинства трубчатых бактерицидных ламп, выпускаемых промышленностью, длиной не более 1,5, например, ДБК100 или ДБ 75–2.

Для измерения бактерицидных ламп с большей длиной приводится методика с применением диафрагм Алекса Воронова из компании Хериус [10]. При этой методике в центре светящей части лампы длиной L выделяется участок t малого размера. Остальная часть светящей лампы

Рис. 2. Индикатриса сил излучения в продольной плоскости ртутной лампы высокого давления ДРТ-400



экранируется. В этом случае бактерицидный поток лампы вычисляется по формуле: $\Phi_{\text{БК}} = \Omega E_{\text{БК}} R^2 \cdot L / t$. Автор допускает, что некоторые трубчатые бактерицидные лампы являются поверхностными ламбертовскими излучателями, за счёт конструктивных и технологических приемов. Доказательством этого может служить только индикатриса распределения сил излучения, которая является окружностью, и тогда телесный угол $\Omega = \pi^2$ ср. Доказательств нет.

В таблице 1 приведён перечень широко применяемых бактерицидных ламп – кварцевых, увиолевых низкого и высокого давления, импульсных и постоянного горения. У всех перечисленных ламп индикатриса распределения сил излучения в продольной плоскости имеет форму эллипса. В этом случае телесный угол равен $\Omega = 11,3$ ср. Объяснение этому см. выше. На рис. 2 приведена индикатриса распределения сил излучения в продольной плоскости лампы ДРТ – 400 [11].

Предлагаемая методика обладает ещё одним недостатком.

Известно, что светимость по длине светящей части лампы снижается от центра к краям в приэлектродную область [3, 9]. В процессе работы лампы свечение в приэлектродной области снижается более интенсивно, чем в центральной области, за счёт распыления электродов. Это приводит к ошибочным результатам при проведении стендовых испытаний ламп для определения действительного срока службы.

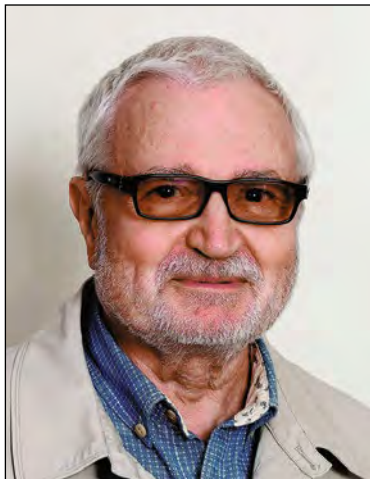
Это положение может быть исправлено за счёт увеличения размера t до половинного размера светящей части лампы, а результат измерения необходимо умножить на 2. При этом должен соблюдаться закон обратных квадратов.

Из вышеизложенного следует, что если при измерениях в расчётах использовать значение телесного угла для разрядных ртутных трубчатых объёмных излучателей π^2 , как это принято сейчас, а не 11,3, то это почти на 15 % уменьшит истинное значение бактерицидного потока лампы. Заниженное значение бактерицидного потока лампы приведёт на практике к увеличению энергозатрат.

Владимиру Михайловичу Пятигорскому – 80 лет!

2 февраля 80-летний юбилей отметил Владимир Михайлович Пятигорский – ведущий специалист светотехнической отрасли, кандидат технических наук, главный конструктор ВНИСИ им. С.И. Вавилова, лауреат Государственной премии РФ.

В.М. Пятигорский начал свой профессиональный путь в 1956 г. электромонтажником на заводе «Прожектор», затем – служба в армии, учёба в МЭИ. В 1968 г. Владимир Михайлович поступил на работу во Всесоюзный научно-исследовательский светотехнический институт (ВНИСИ), где прошёл путь от инженера до заведующего лабораторией. Под его руководством и при непосредственном участии разработаны световые приборы для общественных и промышленных зданий, больниц, спортивных сооружений. Эти приборы выпускались большими партиями на Ардатовском, Рижском и Московском опытных светотехнических заводах, ПО «Ватра» (г. Тернополь). Когда под руководством Ю.Б. Айзенберга начало развиваться новое направление в области световых прибо-



ров – осветительные устройства со щелевыми световодами, одним из неумолимых участников развития этого направления стал В.М. Пятигорский, став генератором многих идей, которые воплотились в схемы и конструкции осветительных устройств со световодами.

Важнейшими в государственном масштабе работами лаборатории под руководством В.М. Пятигорского стали освещение 320 взрывоопасных насосных станций нефтепровода «Дружба» и освещение всех помещений заводов по изготовлению взрывчатых веществ, что привело к прекращению взрывов на таких предприятиях.

В соавторстве с другими специалистами В.М. Пятигорским сделано 22 изобретения, из них семь были защищены патентами США, Великобритании, Германии, Франции, Италии и Японии.

На профессиональном счету Владимира Михайловича – проектные работы по художественному освещению более 350 зданий и архитектурных комплексов столицы, ведущее участие в создании концепции единой цветоцветовой среды г. Москвы. В.М. Пятигорский является автором более 100 научных публикаций, многократным лауреатом технических выставок, за работы по освещению г. Москвы награжден Международной академией общественных наук медалью «Честь и польза», а коллектив ООО «ВНИСИ» грамотой «За обустройство земли Российской».

Коллектив ВНИСИ им. С.И. Вавилова, редакция и редколлегия журнала «Светотехника», коллеги и друзья поздравляют Владимира Михайловича с Юбилеем и желают ему многих сил и энергии на новые замечательные свершения в светотехнике!

Выводы

1. Предложенная методика измерения потока излучения трубчатых разрядных ламп по формуле В.В. Мешкова применима как для поверхностных, так и для трубчатых объёмных излучателей (люминесцентных, эритемных и бактерицидных ламп).

2. Действующий ГОСТ 8.760–2011 «Измерение энергетических эффективных характеристик ультрафиолетового излучения бактерицидных облучателей» устарел и не отвечает современным научным и техническим достижениям в области создания но-

вых видов поверхностных и объёмных трубчатых ультрафиолетовых разрядных ламп, широко применяемых на практике. Необходима новая редакция ГОСТ.

3. С целью сохранения единства измерения бактерицидного потока массового источника ультрафиолетового излучения – ультрафиолетовых трубчатых ртутных ламп низкого давления – необходимо создание образцового эталона (ультрафиолетовой нормали) для хранения и рабочих эталонов для измерительных лабораторий.

Автор искренне благодарит С.Г. Ашуркова за полезную дискус-

сию по обсуждению статьи и рецензента за полезные замечания и советы, учтённые при корректировке статьи.



Вассерман Александр Львович, кандидат технических наук. Окончил электрофизический факультет ВЗЭИ в 1957 г. Консультант ООО НПВФ «Кумарин»