

**Математическая модель положительного столба разряда низкого давления  
в люминесцентных лампах**

С. А. Микаева, А. С. Микаева, О. Е. Железникова,  
В. В. Муравьев, М. И. Бойчук

*Проведен анализ математических моделей расчета микро- и макрохарактеристик положительного столба разряда в парах ртути низкого давления и люминесцентных ламп. Описаны основные процессы и характеристики, подлежащие учету в математической модели положительного столба люминесцентных ламп. Представлены и описаны радиальные распределения, закономерности и связи, примененные при разработке программы. Разработаны и описаны алгоритм и программа расчета микрохарактеристик плазмы и удельных характеристик положительного столба. Представлены основные формулы применимые для расчета и данные о зависимостях от параметров разряда в виде формул, полученных по экспериментальным результатам зондовых и термопарных измерений в лампах с трубками большого диаметра. Приведена блок-схема программы *Liten-Contrast*, которая состоит из подпрограмм, выполненных в виде отдельных файлов, позволяющих реализовать определенные этапы расчета.*

*Ключевые слова:* разряд низкого давления, параметры разряда, положительный столб, пары ртути, люминесцентная лампа, математическая модель, алгоритм, программа.

**Введение**

Несмотря на всё более широкое использование светодиодных источников света, люминесцентные лампы по-прежнему сохраняют своё преимущество в ряде областей применения, прежде всего, для освещения помещений большой площади, в световой рекламе, в подсветке фасадов, а также в местном освещении рабочих и бытовых

мест. Поэтому исследование и совершенствование их характеристик остается важной научно-технической задачей.

Люминесцентная лампа — это газоразрядный источник света, в котором электрический разряд в парах ртути создаёт ультрафиолетовое излучение, которое преобразуется в видимый свет с помощью люминофора, например, смеси галофосфата кальция с другими элементами.

Целью данной работы являлось проведение комплекса исследований, позволяющих установить взаимосвязи основных характеристик положительного столба (ПС) люминесцентных ламп (ЛЛ) с параметрами разряда и люминофорного слоя в интересах использования полученных результатов при разработке новых ЛЛ и совершенствовании существующих ЛЛ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научно-технические задачи: разработана и выбрана методика исследований микро- и макрохарактеристик ПС; выполнены исследования и установлены связи характеристик с параметрами в условиях, максимально приближенных к режимам работы ЛЛ в осветительных установках; разработаны программы и проведены многовариантные расчетные исследования ЛЛ, работающих в реальных условиях.

Микаева Светлана Анатольевна<sup>1</sup>, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.

Микаева Анжела Сергеевна<sup>2</sup>, доцент, к.э.н.

Железникова Ольга Евгеньевна<sup>3</sup>, директор Института электроники и светотехники, к.т.н.

Муравьев Вячеслав Викторович<sup>4</sup>, ассистент кафедры.

Бойчук Максим Иванович<sup>4</sup>, аспирант.

<sup>1</sup> Физико-технологический институт, Московского технологического университета. Россия, 107076, Москва, ул. Стромьнка, 20.

Тел. 8(499) 268-42-17. E-mail: mikaeva@npo.lit.ru

<sup>2</sup> Институт комплексной безопасности и специального приборостроения, Московского технологического университета. Россия, 107076, Москва, ул. Стромьнка, 20.

<sup>3</sup> Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева. Россия, 430005, Республика Мордовия, Саранск, ул. Большевитская, 11.

<sup>4</sup> Московский технологический университет. Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 26 января 2018 г.

© Микаева С. А., Микаева А. С., Железникова О. Е., Муравьев В. В., Бойчук М. И., 2018

### Физико-технические основы работы

ЛЛ, разработанные в нашей стране во ВНИИИС им. А. Н. Лодыгина, включают две серии ламп:

1) типа КЛС мощностью 9, 13, 18, 25 Вт с цоколем E27 и встроенным индуктивным стартерным пускорегулирующим аппаратом ПРА [1];

2) двухканальные ЛЛ типа КЛ мощностью 5, 7, 9, 11, 18, 24, 36 Вт с цоколями G23, 2G7 (5,7,9,11 Вт), G32 и 2G11 (18, 24, 36 Вт) и  $d_{нар} = 6-16$  мм,  $d_{вн} = 4-14$  мм) и  $l_{тр.} = 60-240$  мм.

Анализ существующих математических моделей (ММ) расчета микро- и макрохарактеристик ПС и ЛЛ в целом показал, что при современных средствах вычислительной техники целесообразно не только в исследовательских целях, но и в инженерной практике применять ММ с максимальным учетом известных физических процессов и явлений, связей между различными микрохарактеристиками плазмы и макрохарактеристиками ламп, физических свойств материалов (прежде всего люминофоров, ртути и инертных газов), явлений в приэлектродной области.

Рассмотрим отдельные процессы, микро- и макрохарактеристики и необходимость их учета в ММ для расчета ЛЛ, алгоритм и программу расчета плазмы ПС и ЛЛ в целом, при этом за основу применим программу LUMEN, разработанную для расчета ПС ЛЛ с трубками большого диаметра (25–54 мм) [1].

### Энергетические уровни атомов Hg

В ММ следует учитывать все уровни, переходы между которыми определяют основные процессы в плазме ПС ЛЛ, а именно:  $6^1S_0$ ;  $6^3P_{0,1,2}$ ;  $6^1P_1$ ;  $7^3S_1$ ;  $6^3D_{1,2,3}$ , состояние ионизации. Игнорирование уровней  $6^1P_1$ ;  $7^3S_1$ ;  $6^3D_{1,2,3}$  совершенно недопустимо для расчетов плазмы в трубках малого диаметра, а также для определения доли излучения разряда в видимой и в близкой ультрафиолетовой области для бытовых, медицинских ЛЛ и ЛЛ для музеев. При этом следует учесть, что объединение уровней  $6^3P_{0,1,2}$  в один уровень – ненужная мера, приводящая к неправильности расчета излучения с  $\lambda = 253,7$  нм.

### Сечения возбуждения

Следует применять точные аппроксимации экспериментально полученных сечений, так как упрощенные аппроксимации дают разную точность в зависимости от режима разряда. Так, аппроксимация сечений ступенчатого возбуждения уровня  $6^1P_1$  «ступенькой», примененная

В. П. Калановым, дает совпадение результатов с сечением по Х. Посту [2] при 14000 К, но при 10000 К завышает результат на 30–40 %, а при 20000 К – занижает на 40–60 %. Применение ЭВМ позволяет использовать реальные зависимости в табличной форме и ставит под сомнение вопрос необходимости применения аппроксимаций вообще.

### Ионизация

Необходимо учитывать наиболее вероятные процессы ионизации с учетом возбужденных атомов (ступенчатая, прямая ассоциативная, ионизация), так как они не только определяют распределение  $n_v$  по радиусу, но и вносят заметный вклад в баланс возбужденных атомов.

### Функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ)

ФРЭЭ, примененная Г. П. Панасюком, В. М. Милениным [3], Е. В. Охонской и М. А. Мальковым [4], дает небольшое отклонение от максвелловского распределения (получается завышение в 1,5 раза потоков излучения). Р. Лягушенко и Д. Майя [5] заявили, что получение максимума в зависимости  $E = \varphi(P_{Hg})$  они обеспечили благодаря, в основном, особой ФРЭЭ для высокоэнергетичной группы электронов, отличающейся от применяемой на фирме Philips [6]. Они считают, что существующие модели плазмы ЛЛ только лишь приближаются к решению проблемы, т. е. необходимо дальнейшее накопление данных по сечениям возбуждения и диффузии излучения.

В программе расчета ПС ЛЛ целесообразно, так же как в программе LUMEN [7], применять коэффициент немаксвелловости, подобранный специально для ЛЛ путем согласования расчетных и экспериментальных значений потока линии 253,7 нм.

### Контур линии излучения

Следует применять только фойхтовский профиль линии, который дает хорошие результаты при малых и больших  $P_{Hg}$ . Для расчета излучения линии 184,9 нм лоренцовское распределение подходит практически всегда, но для расчета излучения 253,7 нм доплеровское распределение может применяться только при малых  $P_{Hg}$  (меньше 0,2 Па), а лоренцовское – при больших  $P_{Hg}$  (больше 2 Па).

### Упругие соударения

Нужно учитывать потери энергии не только при столкновении электронов с атомами аргона,

но и с атомами ртути, особенно это необходимо при больших  $P_{\text{Hg}}$ , а также при перераспределении по сечению трубки плотности нейтральных частиц при высоких токах разряда.

### **Радиальные распределения**

Радиальные распределения  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $T$ ,  $n_{\text{Hg}}$ ,  $A_{\text{эфф}}$  необходимо правильно учитывать, даже если ведутся расчеты с усредненными по сечению микрохарактеристиками. Для аргона это менее критично (общее количество газа остается постоянным, а меняется распределение по сечению). Если даже предположить равенство напряженности поля  $E$  по сечению, то за счет этого эффекта (перераспределение  $n_{\text{Ar}}$ ) следует ожидать уменьшение потерь на упругие соударения, так как большое количество атомов аргона смещается в область малых  $n_e$ , т. е. к стенке. Распределение  $n_e = \varphi(r/R)$  не соответствует бесселевскому – это хорошо показывает эксперимент [8], и это обязательно нужно учитывать. Радиальные процессы учитывались в полной теории М. Кейлеса [9], в модели ВНИИИС (г. Саранск, Мордовия) [8] и в модели Д. Дакина (фирма General Electric, США) [10]. Д. Дакин делает вывод, что многие упрощения, сделанные для моделирования при стандартных условиях, менее ценны при условиях значительного газового нагрева и радиального катафореза, который не учитывается в большинстве моделей.

В программе расчета ПС ЛЛ для радиальных распределений  $n_e$ ,  $T_e$ ,  $T$  целесообразно использовать закономерности и связи, примененные при разработке программы LUMEN [1].

### **Отражение излучения от стенки**

Этот процесс никто не учитывает, хотя излучение видимого триплета хорошо и многократно отражается и частично поглощается в разряде, приводя к некоторому изменению в распределении возбужденных атомов по сечению; резонансное излучение также частично отражается люминофорным покрытием – до 15–20 %; соответственно излучение люминофорного слоя претерпевает многократные отражения.

### **Сверхтонкая структура линии**

Сверхтонкая структура линий обязательно должна учитываться, причем структуры линий 184,9 нм и 253,7 нм различны [1].

**Тушение метастабильных атомов** происходит в объеме при ступенчатой ионизации, ступенчатом возбуждении, переходе на уровень  $6^3P_1$  и

при ассоциативной ионизации. Диффузию на стенку следует учитывать при малых давлениях. Распределение  $n_b = \varphi(r/R)$  зависит от параметров и изменяется от бесселевского до постоянного по сечению, а то и с максимумом между осью и стенкой (расчеты М. А. Кейлеса и А. С. Федоренко). Тенденция выравнивания по сечению для метастабильных атомов была показана еще Ф. А. Уваровым и В. А. Фабрикантом [11].

### **Эффективная вероятность вылета фотонов ( $A_{\text{эфф}}$ )**

Расчет  $A_{\text{эфф}}$  – как уже отмечалось, является одним из самых сложных элементов ММ. Некоторые авторы (Д. Уэймаус, Ф. Биттер) применяют поправки к  $A_{\text{эфф}}$  для согласования расчета и эксперимента.  $A_{\text{эфф}}$  следует рассчитывать, применяя фойхтовский контур линий тонкой структуры с учетом изотопного состава ртути [13].

### **Характеристики люминофоров и люминофорных покрытий**

Эти характеристики пока почти никем не учитываются, кроме модели Д. Уэймауса и Ф. Биттера [13] и модели ВНИИИС [1, 12]. Учет свойств люминофорного покрытия позволяет не только получать конечный результат в части светотехнических характеристик ламп, но и существенно приблизить расчет к реальным условиям работы ЛЛ.

В программе расчета ПС ЛЛ учет характеристик люминофоров осложняется тем, что требуется вводить характеристики многокомпонентного люминофорного слоя, состоящего из частиц люминофоров красного, зеленого и синего цвета свечения.

Многообразие методов математического моделирования плазмы ПС ЛЛ вызвано во многом тем, что совмещение в расчете таких процессов и свойств плазмы, как нестационарность, изменение характеристик по радиусу, учет изотопической структуры линий излучения с применением фойхтовского профиля линий тонкой структуры, отклонение функции распределения электронов по энергиям от максвелловской, взаимодействие излучения со стенкой и др. до последнего времени было затруднено из-за чрезвычайно большого объема вычислений, а также отсутствия программы, объединяющей различные ММ. Поэтому расчет плазмы ПС ЛЛ нами будет проводиться для стационарного режима работы, а переход на режим высокочастотного питания (ЛЛ с электронным высокочастотным (ЭВЧ) ПРА) путем исполь-

зования результатов, полученных Е. В. Охонской и приведенных в [1, 18, 19].

### Алгоритм и программа расчета микрохарактеристик плазмы и удельных характеристик положительного столба

Алгоритм расчета для ЛЛ с трубками большого диаметра с пояснением и обоснованием всех расчетных формул изложен в [1]. Для рассматриваемой ММ расчета ЛЛ здесь мы приведем только те формулы, которые претерпели корректировку или изменения в связи со спецификой разряда и люминофорного слоя в трубках малого диаметра.

#### Формулы для $n_e$ , $T_e$ , $T$

Одна из особенностей алгоритма расчета и программы LUMEN [1] заключается в том, что данные о зависимостях  $n_{eo}$ ,  $n_{er}$ ,  $T_{eo}$ ,  $T_{er}$ ,  $T_o$ ,  $T_r$  от параметров разряда вводятся в виде эмпирических формул, полученных по экспериментальным результатам зондовых ( $n_e$ ,  $T_e$ ) и термопарных измерений ( $T$ ) в лампах с трубками большого диа-

$$n_{er} = n_{eo} \times \left[ 1 - (r/R)^2 \times (0,18 + 0,6743I) + (r/R) \times (0,7385I - 0,529) \right]. \quad (2)$$

Обработка экспериментальных результатов зондовых измерений, приведенных в [14], с учетом закона подобия для положительного столба

$$T_{eo} = \left[ (1,175/R)^{0,25} \times (137 - 0,44 \cdot t_{x3}) / (n_{eo} \times 10^{-11})^{(0,047 + 0,00022 \cdot t_{x3})} \right]^2, \quad (3)$$

где  $t_{x3}$  – температура холодной зоны.

Для определения  $T_{er}$  также используется формула (3), но при этом вместо величины  $n_{eo}$  подставляется величина  $n_{er}$ .

Для расчета  $T_o$  и  $T_{er} = \varphi(r/R)$  используется формула, которая была получена путем уточнения

$$T_r = 273 + \left( 0,73 + 0,27 \times 0,6 \times P_{Ar}^{0,739} \times (1 + 0,146 \times (P_{Ar} - 2))^{(0,638 + 0,052 \cdot R)} \right) \times \\ \times \left( I^{0,54} \times (123,35 - 75,45 \times (r/R)) + t_{x3} \times \left( ((0,36 - 0,076R) - 0,155 \times (r/R)) \times I^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (0,595(r/R) - 0,965) \times I + 0,38 + 0,14R + 0,29(r/R) - 10(R - 1,6) * (1,2 + I) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (1 + 0,25(1,5 - I) \times (r/R)) \right) \right). \quad (4)$$

метра. Для трубок малого диаметра ( $d_{нар} = 12-16$  мм,  $d_{вн} = 10-14$  мм) подобные измерения ламп не проводились, а были использованы имеющиеся в литературе результаты и связи между микрохарактеристиками. Приведенные в [1] результаты зондовых измерений  $n_{eo}$  [14] для ламп с  $d_{вн} = 14$  мм,  $P_{Ar} = 400$  Па и  $P_{Hg} = 0,1-10$  Па были нами аппроксимированы следующей формулой:

$$n_{eo} = 2,182 \times 10^{11} abI, \quad (1)$$

где  $a$  – поправка, учитывающая влияние  $R$  и  $P_{Hg}$ ,  $b$  – поправка, учитывающая влияние  $P_{Ar}$ :

$$a = 28,1 - 7,04 \times R + \\ + \left( 0,2372 \times R^2 - R + 1,118 \right)^{0,5} \times P_{Hg} \times 10^3,$$

$$b = \left[ 1 + 0,146 \times (P_{Ar} - 3) \right].$$

Распределение по радиусу  $n_e - n_{er} = \varphi(r/R)$  нами принято такое же, как и для ламп с  $R = 1,175$  см (наименьший радиус в проведенных ранее исследованиях [1]) и определяется формулой:

ЛЛ и его отдельных зон [15] позволила установить следующую эмпирическую зависимость для  $T_{eo}$ :

В формулах (1)–(4) размерности величин следующие:  $I$  – [А],  $R$  – [см],  $P_{\text{Hg}}$ ,  $P_{\text{Ar}}$  – [мм рт. ст.],  $n_{e0}$ ,  $n_{er}$  – [см<sup>-3</sup>],  $T_{e0}$ ,  $T_r$ ,  $T_o$  – [К],  $t_{x3}$  – [°С].

### Формула для $A_e$

Изменения алгоритма и программы LUMEN с целью использования их для расчета ЛЛ касалось определения поправочного коэффициента  $A_e$  [1], характеризующего отклонение ФРЭЭ от максвелловской. Коэффициент  $A_e$  установлен путем согласования рассчитанного и экспериментального [16] значений суммарного удельного лучистого потока ПС для линий 253,7 нм и 184,9 нм в трубках, имеющих следующие параметры:  $d_{\text{вн}} = 14$  мм,  $I = 0,17$  А,  $P_{\text{Ar}} = 532$  Па,  $t_{x3} = 40$  °С. При этом учитывалось повышение световой отдачи ПС разряда на постоянном токе на 6÷8 % по сравнению с переменным током при  $f = 50$  Гц [1, 16].

Для коэффициента  $A_e$  установлена следующая формула:

$$A_e = 0,615 \left( 17,446 (n_{e0} \times 10^{-11})^{-0,9846} + 0,9205 \right) \times (T_{e0} / 12500) \times (n_{e0} \times 10^{-11} / 17,5)^{0,125}. \quad (5)$$

### Формула для $N_{\text{Hg}}$

Учитывая факт общего повышения температуры колбы в лампах с трубками малого диаметра (даже при нормальных для ЛЛ условиях и режимах работы), представляло интерес исследование изменения общего количества нейтральных атомов в разряде при изменении тока лампы и температуры окружающей среды. Предполагалось также, что такая информация позволит объяснить смещение зависимости  $\Phi_{\text{л}} = \varphi(t_{x3})$  в область более высоких температур ( $\Phi_{\text{л}}^{\text{max}}$  лежит при  $t_{x3} = 50$ – $60$  °С) [17], а также меньшего спада  $\Phi_{\text{л}}$  при значениях  $t_{x3} > 50$  °С.

Для расчета полного количества атомов Hg на единице длины ПС ( $N_{\text{Hg}}$ ) используется формула:

$$N_{\text{Hg}} = 2\pi \int_0^R n_{\text{Hg}}(r) \cdot r \cdot dr, \quad (6)$$

где  $n_{\text{Hg}}(r)$  – концентрация атомов ртути в основном состоянии в точке с текущим радиусом  $r$ . Размерность  $N_{\text{Hg}}$  и  $n_{\text{Hg}}(r)$  – [см<sup>-3</sup>].

### Расчет удельного светового потока ПС с многокомпонентными люминофорными слоями

Применение в ЛЛ смесей редкоземельных (РЗМ) люминофоров требует необходимости расчета вклада в общий световой поток лампы каждого люминофора. При этом для каждого компонента смеси необходимо знать спектральные характеристики возбуждения и излучения, квантовые выходы, квантовые отношения, коэффициенты отражения, пропускания и коэффициент полезного действия многокомпонентного люминофорного слоя.

Рассмотрим формулы для расчета удельного светового потока  $\Phi_1$  для ПС с трехкомпонентным люминофорным слоем и его компонент:

$$\Phi_1 = \Phi_1^{\text{K}} \cdot K^{\text{K}} + \Phi_1^{\text{З}} \cdot K^{\text{З}} + \Phi_1^{\text{С}} \cdot K^{\text{С}} + \Phi_1^{\text{вид}}, \quad (7)$$

где  $\Phi_1^{\text{K}}$ ,  $\Phi_1^{\text{З}}$ ,  $\Phi_1^{\text{С}}$  – удельные световые потоки (поток с единицы длины ПС) компонент люминофорного слоя, излучающих соответственно в красной, зеленой и синей областях спектра;

$K^{\text{K}}$ ,  $K^{\text{З}}$ ,  $K^{\text{С}}$  – весовые коэффициенты содержания красной, зеленой и синей компонент люминофорного слоя ( $K^{\text{K}} + K^{\text{З}} + K^{\text{С}} = 1$ );

$\Phi_1^{\text{вид}}$  – удельный световой поток, создаваемый видимыми линиями разряда после их прохождения через люминофорный слой.

Изменяя  $K^{\text{K}}$ ,  $K^{\text{З}}$ ,  $K^{\text{С}}$  от 0 до 1 можно получить лампы красным ( $K^{\text{K}} = 1$ ,  $K^{\text{З}} = 0$ ,  $K^{\text{С}} = 0$ ), зеленым ( $K^{\text{K}} = 0$ ,  $K^{\text{З}} = 1$ ,  $K^{\text{С}} = 0$ ) или синим ( $K^{\text{K}} = 0$ ,  $K^{\text{З}} = 0$ ,  $K^{\text{С}} = 1$ ) цветом излучения. Изменяя эти коэффициенты в пределах от 0,1 до 0,9 можно получить всю палитру цветности ламп от тепло-белой до дневной. Так, для ламп цветности ТБЦ имеют место (определены экспериментально) следующие значения [1]:  $K^{\text{K}} = 0,65$ ;  $K^{\text{З}} = 0,315$ ;  $K^{\text{С}} = 0,025$ ; для ламп цветности ЛЕЦ:  $K^{\text{K}} = 0,5$ ;  $K^{\text{З}} = 0,37$ ;  $K^{\text{С}} = 0,13$ .

Формулы для  $\Phi_1^{\text{K}}$ ,  $\Phi_1^{\text{З}}$ ,  $\Phi_1^{\text{С}}$  и  $\Phi_1^{\text{вид}}$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \Phi_1^K &= 683 \cdot C^K \cdot \eta_{\text{сл}} \cdot \tau_{\text{ст}} \cdot [\eta_{\text{КВ}}^K(253,7) \cdot R^K(253,7) \cdot (1 - \rho_{\text{лс}} - \tau_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{253,7} + \\ &+ \eta_{\text{КВ}}^K(184,9) \cdot R^K(184,9) \cdot (1 - \rho'_{\text{лс}} - \tau'_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{184,9} + \eta_{\text{КВ}}^K(296,7) \cdot R^K(296,7) \cdot (1 - \rho''_{\text{лс}} - \tau''_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{296,7} + \\ &+ \eta_{\text{КВ}}^K(312,6) \cdot R^K(312,6) \cdot (1 - \rho'''_{\text{лс}} - \tau'''_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{311,6} + \eta_{\text{КВ}}^K(365,0) \cdot R^K(365,0) \cdot (1 - \rho''''_{\text{лс}} - \tau''''_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{365,0}], \end{aligned} \quad (8.1)$$

$$\begin{aligned} \Phi_1^3 &= 683 \cdot C^3 \cdot \eta_{\text{сл}} \cdot \tau_{\text{ст}} \cdot [\eta_{\text{КВ}}^3(253,7) \cdot R^3(253,7) \cdot (1 - \rho_{\text{лс}} - \tau_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{253,7} + \\ &+ \eta_{\text{КВ}}^3(184,9) \cdot R^3(184,9) \cdot (1 - \rho'_{\text{лс}} - \tau'_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{184,9} + \eta_{\text{КВ}}^3(296,7) \cdot R^3(296,7) \cdot (1 - \rho''_{\text{лс}} - \tau''_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{296,7} + \\ &+ \eta_{\text{КВ}}^3(312,6) \cdot R^3(312,6) \cdot (1 - \rho'''_{\text{лс}} - \tau'''_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{311,6} + \eta_{\text{КВ}}^3(365,0) \cdot R^3(365,0) \cdot (1 - \rho''''_{\text{лс}} - \tau''''_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{365,0}], \end{aligned} \quad (8.2)$$

$$\begin{aligned} \Phi_1^c &= 683 \cdot C^c \cdot \eta_{\text{сл}} \cdot \tau_{\text{ст}} \cdot [\eta_{\text{КВ}}^c(253,7) \cdot R^c(253,7) \cdot (1 - \rho_{\text{лс}} - \tau_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{253,7} + \\ &+ \eta_{\text{КВ}}^c(184,9) \cdot R^c(184,9) \cdot (1 - \rho'_{\text{лс}} - \tau'_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{184,9} + \eta_{\text{КВ}}^c(296,7) \cdot R^c(296,7) \cdot (1 - \rho''_{\text{лс}} - \tau''_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{296,7} + \\ &+ \eta_{\text{КВ}}^c(312,6) \cdot R^c(312,6) \cdot (1 - \rho'''_{\text{лс}} - \tau'''_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{311,6} + \eta_{\text{КВ}}^c(365,0) \cdot R^c(365,0) \cdot (1 - \rho''''_{\text{лс}} - \tau''''_{\text{лс}}) \cdot \Phi_{365,0}], \end{aligned} \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} \Phi_1^{\text{вид}} &= 683 \cdot \tau_{\text{ст}} \cdot [\eta_{\text{сл}}(404,7) \cdot K(404,7) \cdot \Phi_{404,7} + \eta_{\text{сл}}(435,8) \cdot K(435,8) \cdot \Phi_{435,8} + \\ &+ \eta_{\text{сл}}(546,1) \cdot K(546,1) \cdot \Phi_{546,1}], \end{aligned} \quad (8.4)$$

где  $\rho_{\text{лс}}$ ,  $\rho'_{\text{лс}}$ ,  $\rho''_{\text{лс}}$  и  $\rho'''_{\text{лс}}$ ,  $\tau_{\text{лс}}$ ,  $\tau'_{\text{лс}}$ ,  $\tau''_{\text{лс}}$  – коэффициенты отражения и пропускания люминофорным слоем соответственно линий 253,7; 184,9 нм и средней для группы линий 296,7; 312,6; 365,0;

$\Phi_\lambda$  – удельные (на единицу длины) лучистые потоки излучения разряда с длиной волны  $\lambda$ ;

$\eta_{\text{сл}}$  и  $\eta_{\text{сл}}(\lambda)$  – КПД слоя для выхода излучения люминесценции, образованного в слое за счет возбуждения ультрафиолетовым излучением, и линий видимого излучения разряда соответственно;

$\tau_{\text{ст}}$  – коэффициент пропускания стеклянной трубки для видимого излучения.

$K(\lambda)$  – относительный коэффициент видимости глаза для излучения разряда с длиной волны  $\lambda$ ;

$C^K$ ,  $C^3$ ,  $C^c$  – относительный коэффициент видимости глаза для излучения компонент люминофорного слоя в красной, зеленой и синей областях спектра;

$\eta_{\text{КВ}}^K(\lambda)$ ,  $\eta_{\text{КВ}}^3(\lambda)$ ,  $\eta_{\text{КВ}}^c(\lambda)$  – квантовый выход излучения, компонент люминофорного слоя, излучающих в красной, зеленой и синей областях спектра при возбуждении излучением разряда с длиной волны  $\lambda$ ;

$R^K(\lambda)$ ,  $R^3(\lambda)$ ,  $R^c(\lambda)$ ,  $\lambda_{\text{возб}} / \bar{\lambda}_{\text{люм}}$  – кванто-

вые отношения для компонент люминофорного слоя, излучающих в красной, зеленой и синей областях спектра; причем  $\lambda_{\text{возб}} = 253,7; 184,9;$

$296,7; 312,6; 365,0$  нм и  $\bar{\lambda}_{\text{люм}} = \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) d\lambda /$

$\int_{380}^{780} \varphi(\lambda) (1/\lambda) d\lambda$  – эффективная длина волны

люминесценции компонент люминофора, соответствующая центру тяжести кривой  $\varphi(\lambda)$ ;

$\varphi(\lambda)$  – спектральная интенсивность лучистого потока люминесценции каждой компоненты люминофора.

В формулах (8.1)–(8.4) величины имеют следующие размерности  $\Phi_\lambda$  – [Вт];  $\Phi_1^K$ ,  $\Phi_1^3$ ,  $\Phi_1^c$ ,  $\Phi_1^{\text{вид}}$ ,  $\Phi_1$  – [лм]. Значения величин, входящих в формулы (8.1)–(8.4), для галофосфатного люминофора (ГФК) и отдельных компонент РЗМ-люминофоров приведены в табл., при этом значения для ГФК-люминофора взяты из базы данных программы LUMEN, а для РЗМ-люминофоров взяты из [1], а также любезно предоставлены лабораторией люминофоров и люминофорных покрытий ВНИИИС.

Таблица

## Характеристики люминофоров и люминофорных слоев ЛЛ различных цветностей

Характеристика люминофора или люминофорного слоя	Тип люминофора			
	ФЛ-3500	ФЛ612-1	ФЛ543-1	ФЛ447
$\overline{\lambda}_{\text{люм}}$	569	611	543	450
$C$	0,604	0,49	0,917	0,038
$\eta_{\text{сл}}$	0,81	0,81	0,81	0,81
$\tau_{\text{ст}}$	0,92	0,92	0,92	0,92
$\eta_{\text{кв}} (253,7)$	0,91	0,95	0,98	0,98
$\eta_{\text{кв}} (184,9)$	1,48	1,48	1,48	1,48
$\eta_{\text{кв}} (296,7)$	0,21	0,21	0,21	0,21
$\eta_{\text{кв}} (312,6)$	0,03	0,21	0,21	0,21
$\eta_{\text{кв}} (365,0)$	0,03	0,85	0,85	0,85
$R (253,7)$	0,445	0,416	0,468	0,561
$R (184,9)$	0,324	0,303	0,341	0,408
$R (296,7)$	0,521	0,468	0,546	0,655
$R (312,6)$	0,549	0,512	0,576	0,69
$R (365,0)$	0,641	0,598	0,672	0,806
$\rho_{\text{лс}} (253,7)$	0,112	0,132	0,082	0,072
$\rho'_{\text{лс}} (184,9)$	0,10	0,10	0,10	0,10
$\rho'''_{\text{лс}} (296,7)$	0,570	0,570	0,570	0,570
$\rho''_{\text{лс}} (312,6)$	0,66	0,66	0,66	0,66
$\rho''_{\text{лс}} (365,0)$	0,72	0,72	0,72	0,72
$\tau_{\text{лс}} (253,7)$	0,002	0,002	0,002	0,002
$\tau'_{\text{лс}} (184,9)$	0,001	0,001	0,001	0,001
$\tau'''_{\text{лс}} (296,7)$	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092
$\tau''_{\text{лс}} (312,6)$	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093
$\tau''_{\text{лс}} (365,0)$	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094
$\rho'' (435,8)$	0,28	0,28	0,28	0,28
$\rho'' (546,1)$	0,28	0,28	0,28	0,28
$\rho'' (404,7)$	0,29	0,29	0,29	0,29

**Расчет энергетического КПД излучения  
и затрат на упругие соударения  
и ионизацию**

В дополнение к расчетам, проводимым по программе LUMEN, в программу для расчета ЛЛ были введены формулы для определения доли мощности, идущей на излучение (КПД излучения), на упругие потери и на ионизацию. Они определяются следующими формулами:

$$\eta_{253,7} = \Phi_{253,7} / P_1, \quad (9)$$

$$\eta_{184,9} = \Phi_{184,9} / P_1, \quad (10)$$

$$\eta_{\text{рез}} = (\Phi_{253,7} + \Phi_{184,9}) / P_1, \quad (11)$$

$$\eta_{\text{вид}} = (\Phi_{404,7} + \Phi_{435,8} + \Phi_{546,1}) / P_1, \quad (12)$$

$$\eta_{\text{уф}} = (\Phi_{296,7} + \Phi_{312,6} + \Phi_{365,0}) / P_1, \quad (13)$$

$$\eta_{\text{упр}}^{\text{Ar}} = W_{\text{ев}}^{\text{Ar}} / P_1, \quad (14)$$

$$\eta_{\text{упр}}^{\text{Hg}} = W_{\text{ев}}^{\text{Hg}} / P_1, \quad (15)$$

$$\eta_{\text{ион}} = W_{\text{ион}} / P_1, \quad (16)$$

где  $W_{\text{ев}}^{\text{Ar}}$ ,  $W_{\text{ев}}^{\text{Hg}}$  – полные потери энергии электронами на упругие столкновения с атомами Ar и Hg;  
 $W_{\text{ион}}$  – полные затраты энергии электронами на ионизацию;  
 $P_1$  – удельная мощность ПС.

### Расчет габаритных размеров световой части ЛЛ и длины ПС для двухканальных ЛЛ

Расчет проведен по данным работ [1, 18, 19].  
Применив соотношения

$$l_{сч} = l_{л} - l_{ц}, \quad (17)$$

$$a_{сч} = 2d_{тр} + \Delta_{тр}, \quad (18)$$

$$b_{сч} = d_{тр}, \quad (19)$$

где введены обозначения:

$l_{л}$  – длина лампы,

$l_{ц}$  – высота цоколя,

$d_{тр}$  – внешний диаметр трубки ( $d_{тр} = 2(R + \Delta_{ст})$ ),

$\Delta_{тр}$  – расстояние между трубками,

$\Delta_{ст}$  – толщина стенки трубки,

получаем выражения для  $l_{сч}$ ,  $a_{сч}$ ,  $b_{сч}$  – длины, ширины и высоты световой части соответственно. Окончательно имеем следующие формулы:

$$l_{пс}^H = 2 \cdot l_{сч} - 2 \cdot l_{цэ} - l_{эч} - 2 \cdot l_{пт} + d_{тр} - d_{пк} + \Delta_{тр}, \quad (20)$$

$$l_{пс}^П = 2 \cdot l_{сч} - 2 \cdot l_{цэ} - l_{эч} + \Delta_{тр}, \quad (21)$$

где  $l_{пс}^H$  – длина ПС для ламп с переходными каналами между трубками (по типу ламп PL, КЛ),

$l_{пс}^П$  – длина ПС для ламп с переходным торцевым U-образным каналом (ламп Dulux S),

$l_{цэ}$  – длина трубки от цоколя до электрода,

$l_{эч}$  – длина электродной части разряда, равная расстоянию от электрода до ПС (от катода до ПС при выполнении электродом функции катода),

$l_{пт}$  – длина заглушенного конца трубки, равная расстоянию от переходного канала, соединяющего трубки, до торца заглушенного конца трубки,

$d_{пк}$  – внутренний диаметр переходного канала.

### Блок-схема программы LUMEN-COMPACT

Блок-схема программы LUMEN-COMPACT приведена на рисунке. Она состоит из подпрограмм, выполненных в виде отдельных файлов, позволяющих реализовать определенные этапы расчета [18, 19].

В программе LUM Z реализованы следующие этапы расчета: расчет вероятностей переходов между уровнями ртути в расчете на 1 электрон и 1 атом ( $Z_{ik}$ ,  $Z_{ki}$ ); расчет эффективной вероятности выхода резонансного излучения из разряда ( $A_{\lambda,r}$ );

расчет распределения концентраций возбужденных атомов ( $n_b$ ) по сечению трубки (в 10 кольцевых зонах шириной  $R/10$ ).

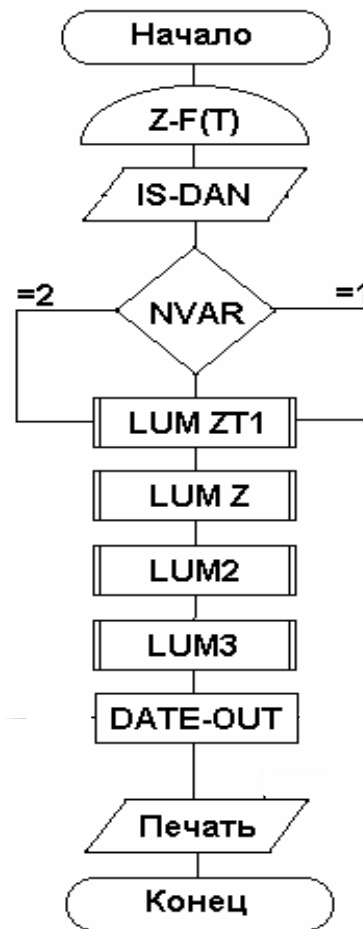


Рис. Блок-схема программы LUMEN-COMPACT.

В подпрограмме LUM 2 на основе полученной зависимости  $n_b = \varphi(r/R)$  проводится расчет удельных лучистых потоков линий излучения разряда.

В подпрограмме LUM 3 проводятся расчеты: расчет составляющих баланса энергии, расходуемой электронами на упругие потери с атомами Ar и Hg ( $W_{ev}^{Ar}$ ,  $W_{ev}^{Hg}$ ); на излучение различных линий ( $\Phi_{253,7}$ ;  $\Phi_{184,9}$ ;  $\Phi_{296,7}$ ;  $\Phi_{312,6}$ ;  $\Phi_{365,0}$ ;  $\Phi_{404,7}$ ;  $\Phi_{435,8}$ ;  $\Phi_{546,1}$ ); на ионизацию ( $W_{ион}$ ); расчет полных затрат энергии в расчете на 1 электрон ( $W_{e1}$ ); расчет подвижности электронов ( $b_e$ ), градиента потенциала ( $E$ ) и удельной мощности в ПС ( $P_1$ ); расчет удельного светового потока ( $\Phi_1$ ) и световой отдачи ПС ( $\eta_{пс}$ ); расчет доли затрат энергии на излучение ( $\eta_{253,7}$ ;  $\eta_{184,9}$ ;  $\eta_{рез}$ ;  $\eta_{вид}$ ;  $\eta_{уф}$ ), на упругие соударения ( $\eta_{упр}^{Ar}$ ,  $\eta_{упр}^{Hg}$ ), на ионизацию



( $\eta_{\text{ион}}$ ); расчет полного количества атомов Hg в основном состоянии ( $N_{\text{Hg}}$ ) и полного количества электронов ( $N_e$ ) в ПС единичной длины (1 см); расчет средних значений  $T, n_e, n_{\text{Hg}}$  в ПС.

Программа LUMEN-COMPACT также включает подпрограмму Z-F(T), которая содержит таблицу вероятностей переходов между уровнями Hg в функции электронной температуры  $Z_{ik} = \varphi(T_e)$ , и подпрограмму IS-DAN, содержащую исходные данные для расчета, которые варьируются по желанию пользователя:  $I, P_{\text{Ar}}, R, t_{\text{x3}}$  (определяет  $P_{\text{Hg}}$ ), характеристики люминофора и люминофорного слоя.

Кроме того, программа LUMEN-COMPACT включает подпрограмму DATE-OUT, которая создает массив данных, необходимых для построения графиков. В данный файл копируются результаты расчета световых и электрических характеристик ПС ЛЛ, радиальные значения в 11 точках (на оси и в 10 зонах) следующих величин:  $n_e, T_e, T, n_{\text{в}}$  (на уровнях  $6^3P_0, 6^3P_1, 6^3P_2, 6^1P_1, 7^3S_1, 6^3D_{1,2,3}, A_{253,7}, A_{184,9}, b_e$ .

Заметим, что допустимы просмотру и выводу на печать значения остальных величин:  $P_{\text{Hg}}, I, P_{\text{Ar}}, R, t_{\text{x3}}, n_{e0}$  и  $T_{e0}$ , средние по сечению значения  $n_e, T, n_{\text{Hg}}, b_e$ , значения  $F_1 / A_e$  для возбуждения всех уровней с уровня  $6^1S_0$ , значения  $Z_{ik}$  и  $Z_{ki}$ , коэффициенты системы линейных уравнений для определения концентраций возбужденных атомов на всех уровнях, полные затраты энергии в расчете на 1 электрон, удельные (на 1 электрон) затраты энергии на упругие потери в  $W_{el}^{\text{Hg}}$  и  $W_{el}^{\text{Ar}}$ , затраты на ионизацию  $W_{el}^{\text{ион}}$ .

Программа LUMEN-COMPACT в режиме NVAR-2 позволяет изменять любые параметры независимо друг от друга, что дает возможность рассматривать и детально анализировать разнообразные модели ПС ЛЛ, которые порой невозможно осуществить экспериментально [19].

С использованием разработанной модели можно проводить расчетные исследования при широком варьировании параметров ( $R = 5,4 \div 0,4$  см,  $I_{\text{л}} = 0,05 \div 2$  А,  $P_{\text{Ar}} = 1 \div 6$  мм рт. ст.,  $P_{\text{Hg}} = 0,1 \div 10$  Па,  $t_{\text{x3}} = 30 \div 80$  °С).

### Тестирование программы

Анализ проведенных расчетов показал хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментальными исследованиями для выпускаемых производством ЛЛ (расхождение  $\approx 1$  %). Учитывая достигнутую приемлемую точность расчетов,

сделан вывод о применимости созданной ММ для расчета характеристик ламп с трубками малого диаметра.

Были рассмотрены и другие работы, в частности, рассмотрены примеры для диаметра разряда 16 мм, который часто используется в источниках УФ-излучения низкого давления. Такие разряды рассматривались в работах Шункова Ю. Е., Попова О. А., Левченко В. А., [20] и др.

Полученные результаты должны учитываться отечественным и импортным производством, а также в разработках новых конструкций перспективных источников света.

### Заключение

Созданная программа LUMEN-COMPACT реализует алгоритм расчета основных микро- и макрохарактеристик ПС ЛЛ, который получен путем усовершенствований алгоритма программы LUMEN. Было решено для этой цели использовать программу обработки электронных таблиц QUATTRO PRO for WINDOWS, так как она предоставляет пользователю широкие возможности по созданию трехмерных документов, использованию различных математических функций, представлению результатов расчетов в виде двумерных и трехмерных диаграмм.

Разработанная программа позволяет проведение многовариантных расчетных исследований основных характеристик ПС на базе микрохарактеристик ПС, физических характеристик атомов ртути и инертного газа, причем с учетом процессов, имеющих место в разряде ЛЛ, которые работают в реальных условиях.

Программа LUMEN-COMPACT может быть основой для инженерных решений и предложений по совершенствованию существующих и созданию новых типов ЛЛ, методов расчета и контроля характеристик ЛЛ и их элементов. Действительно, полученные результаты расчетов, анализ их с учетом имеющих место в плазме элементарных процессов и влияния на них поведения микрохарактеристик при изменении параметров разряда, сравнение результатов с собственными и литературными экспериментальными результатами позволяют сделать следующие выводы: разработанная программа LUMEN-COMPACT позволяет получать зависимости микро- и макрохарактеристик ПС от параметров разряда, которые с достаточной для инженерных целей точностью совпадают с имеющимися экспериментальными данными. Полученные расчетные радиальные зависимости микрохарактеристик плазмы позволяют объяснить поведение удельных макрохарактеристик ПС и баланса энергии в ПС.

Таким образом, учитывая приемлемую точность расчетов удельных характеристик ПС, полученные результаты могут быть применены для расчета характеристик ЛЛ различного конструктивного исполнения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Микаева С. А. Создание нового поколения люминесцентных устройств с улучшенными световыми характеристиками. – М.: Научтехлитиздат, 2004.
2. Post H. A. // J. Physic B: At. – Mol. Physic. 1984. Vol. 17. P. 3193.
3. Миленин В. М., Тимофеев Н. А. Плазма газоразрядных источников света низкого давления. – Л.: Ленинградский университет, 1991.
4. Охонская Е. В., Мальков М. А. Расчет характеристик плазмы разряда низкого давления и люминесцентных ламп. Учебное пособие. – Саранск: Изд-во Мордов. гос. ун-та, 1985.
5. Maya J., Grossman M. W., Lagushenko R., Waymouth J. F. // Science. 1984. Vol. 226. P. 435.
6. Vriens L., Lighthart F. A. S. // Philips Research Reports. 1977. Vol. 32. No. 1. P. 1.
7. Охонская Е. В. Физические основы расчета и конструирования газоразрядных источников света. Учебное пособие. – Саранск: Изд-во Мордов. гос. ун-та, 1985.
8. Федоренко А. С. Люминесцентные лампы (Расчет, моделирование, экспериментальные исследования, создание конструкторских и технологических решений). – Саранск: Изд-во СВМО, 2009.
9. Cayless M. A. / Proceeding of the Fifth International Conference on Ionisation Phenomena in Gases. – Munich: North-Holland Publishing Co, 1962. Vol. 1. P. 262.
10. Dukin J. T. / Proc. Forth Intern. Symposium on the Science and Technology of Light Sources. – Karlsruhe. 1986. P. 7.
11. Уваров Ф. А., Фабрикант В. А. // Оптика и спектроскопия. 1965. Т. 18. Вып. 5. С. 768.
12. Ashryatov A. A., Fedorenko A. S., Mikaeva S. A. // Light & Engineering. 2012. Vol. 20. No. 2. P. 93.
13. Waymouth J. F., Bitter F. // J. Applied Physics. 1956. Vol. 27. No. 2. P. 122.
14. Zhu S. L., Zhang B. H. / Proc. Third Int., Conf. Tuluse. 1983. P. 1.
15. Миленин В. М., Тимофеев Н. А. В книге: Спектроскопия газоразрядной плазмы. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. Вып. 2. С. 122.
16. Цыганова Л. В., Федоренко А. С. Технология материалов и изделий электронной техники. – Саранск: Изд-во Морд. универ-т, 2011.
17. Литвинов В. С., Мальков М. А., Охонская Е. В., Прытков А. А., Цыганова Л. В. // Светотехника. 1986. № 11. С. 16.
18. Микаева С. А. Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. – М.: РУСАЙНС, 2017.
19. Микаева С. А. Повышение качества технологии производства приборов, установок и систем на базе перспективных источников света. – М.: Московский технологический университет (МИРЭА), 2017.
20. Шунков Ю. Е., Попов О. А., Левченко В. А. // Вестник Московского энергетического института. 2014. № 2. С. 51.

PACS: 84.60.BK

## Main processes and characteristics in the mathematical model for a positive column of fluorescent lamps

S. A. Mikaeva<sup>1</sup>, A. S. Mikaeva<sup>2</sup>, O. E. Zheleznikova<sup>3</sup>, V. V. Murav'ev<sup>4</sup>, and M. I. Boychuk<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics and Technology, Moscow Technological University  
20 Stromynka str., Moscow, 107076, Russia  
E-mail: mikaeva@npolit.ru

<sup>2</sup>Institute for Integrated Security and Special Engineering, Moscow Technological University  
20 Stromynka str., Moscow, 107076, Russia

<sup>3</sup>N. P. Ogarev Mordovian State University.  
11 Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia

<sup>4</sup>Moscow Technological University  
78 Vernadsky ave., Moscow, 119454, Russia

Received January 26, 2018

*Consideration is given to mathematical models for the analysis of the micro- and macrocharacteristics of a positive column in fluorescent lamps and CFLs. The described main processes and features of the positive column of compact fluorescent lamps must be taken into account in the mathematical model. The presented and described radial distributions, patterns and connections were used in the*

**design of the program. The algorithm and the program of calculation of microcharacteristics of plasma and specific characteristics of the positive column have been developed and described. The formulas derived from experimental results of probe and thermocouple measurements in tubes with tubes of large diameter have been presented for calculation and data dependences on the discharge parameters. The block diagram of the Lumen–Compact program consists of routines implemented in the form of separate files, allowing to implement certain stages of the calculation.**

**Keywords:** low pressure discharge, discharge parameters, positive column, mercury vapor, fluorescent lamp, mathematical model, algorithm, program.

## REFERENCES

1. S. A. Mikaeva, *Creation of the Next Generation of Luminescent Devices* (Naughtekhlitizdat, Moscow, 2004) [in Russian].
2. H. A. Post, *J. Physic B: At. – Mol. Physic.* **17**, 3193 (1984).
3. V. M. Milenin and N. A. Timofeev, *Plasma of Gas Discharge in the Light Sources* (Leningr. Univer., Leningr., 1991) [in Russian].
4. E. V. Okhonskaya and M. A. Mal'kov, *Calculation of Plasma Characteristics of Luminescent Lamps* (Mordovsk. Univer, Saransk, 1985) [in Russian].
5. J. Maya, M. W. Grossman, R. Lagushenko, and J. F. Waymouth, *Science* **226**, 435 (1984).
6. L. Vriens and F. A. S. Lighthart, *Philips Research Reports* **32** (1), 1 (1977).
7. E. V. Okhonskaya, *Physical Foundations of Calculation of Gas Discharge of the Light Sources* (Mordovsk. Univer., Saransk, 1985) [in Russian].
8. A. S. Fedorenko, *Luminescent Lamps* (SVMO, Saransk, 2009) [in Russian].
9. M. A. Cayless, in *Proceeding of the Fifth International Conference on Ionisation Phenomena in Gases*. (Munich: North-Holland Publishing Co, 1962). Vol. 1. P. 262.
10. J. T. Dukin, in *Proc. Forth Intern. Symposium on the Science and Technology of Light Sources*. (Karlsruhe. 1986). P. 7.
11. F. A. Uvarov and V. A. Fabrikant, *Optika Spektroskop.* **18** (5), 768 (1965).
12. A. A. Ashryatov, A. S. Fedorenko, and S. A. Mikaeva, *Light & Engineering* **20** (2), 93 (2012).
13. J. F. Waymouth, and F. Bitter, *J. Applied Physics* **27** (2), 122 (1956).
14. S. L. Zhu and B. H. Zhang, in *Proc. Third Int., Conf. Tuluse*. (1983). P. 1.
15. V. M. Milenin and N. A. Timofeev, in *Book: Spectroscopy of Gas Discharge Plasma* (Leningr. Univer., Leningr., 1980). Issue 2. P. 122.
16. L. V. Tsyganova and A. S. Fedorenko, *Technology of Materials of Electronic Devices* (Mordovsk. Univer., Saransk, 2011) [in Russian].
17. V. S. Litvinov, M. A. Mal'kov, E. V. Okhonskaya, et al., *Svetotekhnika*, No. 11, 16 (1986).
18. S. A. Mikaeva, *Experimental Investigations of Characteristics of the Perspective Light Sources* (RUSAINS, Moscow, 2017) [in Russian].
19. S. A. Mikaeva, *Refinement of Technology of Devices on the Base of Perspective Light Sources* (Moscow Technological Univer. (MIREA), 2017) [in Russian].
20. Yu. E. Shunkov, O. A. Popov, and V. A. Levchenko, *Vestnik MEI*, No. 2, 51 (2014).