

# К вопросу об оптимизации параметров комплекта зеркальный световой прибор — разрядная лампа высокой интенсивности

В.С. ЛИТВИНОВ, В.В. ТРЕМБАЧ, доктора техн. наук, профессора

Московский энергетический институт\*

Как известно [1], для реализации так или иначе заданной кривой светораспределения (КСС;  $I_{(\alpha, \beta)}$ ) при достаточно высоком КПД ( $\eta$ ) необходимо учитывать взаимодействие в световом приборе (СП) источника света (ИС) и оптического устройства (ОУ) прибора. Взаимодействие бывает эффективным тогда [1], когда яркость ( $L$ ) или габаритная яркость ( $L_g$ ), а также форма и размеры светящего тела (СТ) должным образом связаны с формой, размерами, коэффициентами отражения  $\rho$  и пропускания  $\tau$  оптического устройства.

В настоящее время, в согласии со сложившейся практикой, расчетчики и разработчики СП имеют дело с конкретными вариантами ИС, параметры которых приводятся в исходной документации. При таком подходе вариантность ИС, например, в части параметров СТ, полностью отсутствует, ибо проблемой управления характеристиками ИС (например, при  $P_l = \text{const}$ ) занимаются большей частью только в рамках экспе-

риментальных и расчетных исследований. Также уместно отметить, что у разработчиков зеркальных СП (ЗСП) обычно нет исходной информации о яркостных характеристиках СТ (или о  $L_g$  СТ), без знания которых расчет и конструирование ЗСП вряд ли вообще уместны; к тому же из приведенной в технической литературе (техдокументации), на соответствующие ИС не всегда ясно насколько информация о световых потоках ( $\Phi$ ) и световых отдачах ( $C, \eta_v$ ), а иногда и размерах светящихся тел (см., например, данные для НЛВД [2, 5, 6] соответствуют той усредненной лампе, на которую и следует ориентироваться при создании нового зеркального отражателя (ЗО) прибора. Отсутствие данных о варианты параметров ламп (например, при  $P_l = \text{const}$ ), имеющих соответствующие  $I_{(\alpha, \beta)}, R_a, T_{\text{цв}}$ , длины  $l_{\text{ст}}$  и диаметры  $d_{\text{ст}}$  светящихся тел, обусловлено и тем, что пока что разработчики ЗО не очень-то предъявляли требования к ИС соответственно с полагающимся обоснованием и с учетом возможностей ИС, хотя, в итоге, важен эффект от комплекта ИС-ЗО, а еще точнее, при использовании

разрядных ИС от комплекта ИС-ПРАЗО.

Комплексное рассмотрение упомянутой выше системы дает основание, даже при предварительном подходе, отметить, что: а) в настоящее время далеко не исчерпывающе ясно, к каким формам и размерам светящихся тел (например у МГЛ и НЛВД), с позиций пары ИС-ЗО, следует стремиться, если необходимо обеспечить ту или иную заданную  $I_{(\alpha, \beta)}$  и насколько возможно больший полезный КПД прибора [1]; б) нетальной ясности в том, чему же следует отдавать предпочтение СО источника света или его световому потоку, либо  $L_g$ , поскольку ЗО считаются по яркостным характеристикам ламп [1] и не всегда большим значениям  $L_g$  соответствуют и большие СО ( $\Phi$ ) ламп при  $P_l = \text{const}$ ; при оптимизации параметров системы ИС-ЗО многое может измениться и, прежде всего, для потребителей ИС и ЗО, если: учесть  $L_i(t)$  и  $L_g(t)$ ; большее внимание уделять — особенно в настоящее время — реальному сроку службы ламп (СС;  $\tau_p$ ) при их работе в ЗО; уделять полагающееся внимание вопросу, касающемуся производства вариантов ламп (например, при  $P_l = \text{const}$ ; либо при использовании единой нагрузочной вольт-амперной характеристики индуктивного балласта, т.е. при использовании одного и того же балласта с вариантами ламп [6]).

В настоящей статье обсуждается, с учетом изложенного, возможность управления перераспределением светового потока в пространстве с помощью целенаправленного изменения в ЗО параметров пары, лампы (МГЛ или НЛВД) и зеркального отражателя (с целью выявления наиболее рациональных показате-

\* 105568, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, кафедра Светотехники.

- использования реальных, а не условных КСС световых приборов;
- учета цветовых характеристик ИС и отражающих и пропускающих поверхностей.

Важно отметить, что помимо возможности качественного восприятия объекта программа позволяет оценить и количественные параметры освещения (яркость или освещенность) (рис. 3, б).

Конечно, затраты времени на выполнение задания по визуализации объекта значительно большие, чем в случае двухмерной модели, и в зависимости от степени детализации объекта могут составить от 5 до 30 мин. При этом для эффективной и надежной работы программы требуется достаточно мощный процессор

(не ниже Pentium-100) и расширенная оперативная память (не менее 32 Mb).

Как показывает практика, использование обеих (двухмерной и трехмерной) моделей позволяет более эффективно решать поставленную задачу. Предварительно на двухмерной модели по количественным характеристикам освещения путем многоразовых, но практически мгновенных прогонов программы подбираются приемлемые варианты параметров ОУ (тип СП, их количество, координаты расположения и нацеливания, мощность и цветность ИС), а затем для двух или нескольких отобранных вариантов по трехмерной модели осуществляется оценка качества найденных цветосветовых решений и делается окончательный

выбор. Существенно то, что исходные данные, введенные для двухмерной модели, используются и для трехмерной.

В заключение необходимо сказать, что программный комплекс **Light-in-Night** прошел всестороннюю и успешную апробацию в НПСП "Светосервис", где с его помощью выполнен большой комплекс проектных работ по архитектурно-художественной подсветке более 200 наиболее значимых в архитектурном плане зданий и сооружений в Москве и других городах России, в их числе: церкви и монастыри, высотные здания и телевизионные башни, памятники и музеи, вокзалы и мосты, старинные и современные административные здания.

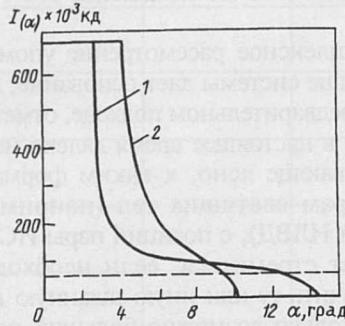


Рис. 1. Влияние размеров светящего тела на  $I_{(\alpha)}$  светового прибора при неизменной площади СТ и его габаритной яркости:

1 —  $d_{\text{cr}1} = 22 \text{ мм}$ ,  $l_{\text{cr}1} = 86 \text{ мм}$ ; 2 —  $d_{\text{cr}2} = 30 \text{ мм}$ ,  $l_{\text{cr}2} = 63 \text{ мм}$ , угол охвата  $\varphi_{\max} = 90^\circ$

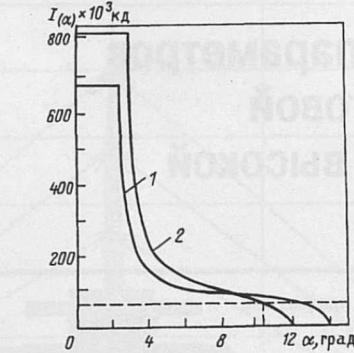


Рис. 2. Влияние габаритной яркости  $L_r$  на  $I_{(\alpha)}$  светового прибора при неизменной силе света горелки:

1 —  $d_{\text{cr}1} = 22 \text{ мм}$ ,  $l_{\text{cr}1} = 86 \text{ мм}$ ; 2 —  $d_{\text{cr}2} = d_{\text{cr}1}$ ,  $l_{\text{cr}2} = 69 \text{ мм}$ , угол охвата  $\varphi_{\max} = 90^\circ$

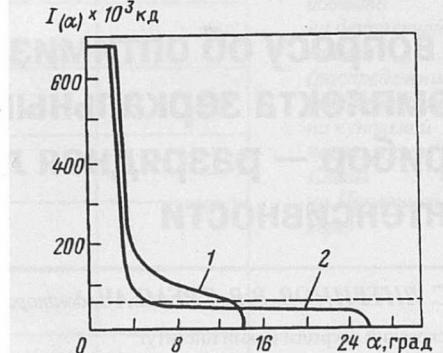


Рис. 3. Влияние угла света прибора:

1 —  $\varphi_{\max} = 90^\circ$ ,  $d_{\text{cr}1} = 22 \text{ мм}$ ,  $l_{\text{cr}1} = 86 \text{ мм}$ ; 2 —  $\varphi_{\max} = 120^\circ$ ,  $d_{\text{cr}2} = d_{\text{cr}1}$ ,  $l_{\text{cr}2} = l_{\text{cr}1}$

лей рассматриваемого комплекта). Следует отметить, что такая проблема ставится впервые. Традиционно, в согласии с отмеченным выше, учет совместного действия этой пары заключается в следующем: параметры ИС принимаются неизменными и по ним определяются форма и размеры ЗО (как правило, и без возможной многовариантности) так, чтобы совокупное действие ЗО и ИС создавало заданную КСС (с насколько возможно меньшим отклонением от так или иначе обоснованной исходной  $I_{(\alpha, \beta)}$ ). Однако, как показала практика расчетов и конструирования СП, такое во многом однобокое решение не всегда рационально и часто приводит к увеличенным размерам ЗО либо к уменьшенным значениям его полезного КПД. Правда, такая нетрадиционная постановка проблемы вызывает новые задачи, например необходимость разработки лампы высокой интенсивности по заданным размерам ее горелки (ее светящего тела). Эта так называемая обратная задача еще не решалась в теории и практике расчетов и конструирования ИС (не говоря о многовариантности такого рода решений, естественно зависящей в том числе и от возможных ограничений и условий использования ламп).

С целью относительно наглядной иллюстрации возможных и желаемых связей между ИС и ЗО решено было проиллюстрировать это на примере приборов прожектороного класса, для которых светотехнические требования преопределяют значение осевой силы света  $I_o$  и полезный угол рассеяния  $\alpha_p$ , часто определяемый 10%-ным снижением — по сравнению с  $I_o$  — силы света ( $\alpha_{10}$ ), а для светильников — КСС и его КПД  $\eta = \Phi_{\text{пр}} / \Phi$ . Однако требование  $\eta = \eta_{\max}$  для ЗО совсем не обязательно,

так как рационально определять КПД полезно используемым световым потоком  $\Phi_p$ , а не его полным потоком  $\Phi_{\text{пр}}$ . Например, для прожекторов [1, 3]  $\eta_p = \frac{\Phi_p}{\Phi} \leq 0,25$ , а для светильников, имеющих КСС типа К  $\eta_p \leq 0,4$  в пределах заданного плоского угла излучения  $\alpha_{\text{из}} \leq 30^\circ$ . При росте  $\alpha_{\text{из}}$ , т.е. для более широкоизлучающих светильников,  $\eta_p$  повышается и для КСС типа Л и Ш  $\eta_p = \eta \leq 0,85$  (во всех рассмотренных случаях ЗО имели  $\rho \geq 0,8$ ).

Как известно [1], распределение светового потока в пределах телесного угла, определяемого  $\alpha_{\text{из}}$  или  $\alpha_p$ , зависит во многом от яркости, размеров и формы светящего тела лампы. Это тело у большинства типов ламп высокой интенсивности (например, у МГЛ и НЛВД), имеет цилиндрическую (или близкую к таковой) форму с размерами  $d_{\text{ct}}$  и  $l_{\text{ct}}$ . По значению параметра  $a = l_{\text{ct}} / d_{\text{ct}}$  СТ можно разделить на "собственно" цилиндрические, у которых [1, 2]  $2 \leq a \leq 5$  (МГЛ и некоторые типы НЛВД) и "нитевидные", имеющие  $5 \leq a \leq 10$  (например, НЛВД при  $P_l > 100 \text{ Вт}$ ). Лампы с цилиндрическими СТ применяются [1, 3] как в круглосимметричных (при осевом расположении), так и в несимметричных ЗО; ИС с нитевыми СТ рационально использовать [1] в ЗО с цилиндрическими отражателями. Для уменьшения рассеяния светового потока ЗО за пределы углов его полезного использования необходимо стремиться к уменьшению параметра  $a$ . Имеющийся опыт дает основание считать, что снижая  $a$  следует снижать  $l_{\text{ct}}$ , оставляя неизменным  $d_{\text{ct}}$  и даже увеличивая  $d_{\text{ct}}$ . Так как во всех случаях  $l_{\text{ct}} > d_{\text{ct}}$ , то ЗО не критичны к продольным (при расположении СТ вдоль оси) расфокусировкам

( $\Delta f_p < l_{\text{ct}}/2$ ) и аберрациям ( $\Delta f_p \ll \Delta f_{\text{ct}}/2$ ). Малые диаметры СП, особенно с НЛВД, делают ЗО чувствительными к поперечным (боковым) расфокусировкам и аберрациям. Из сказанного становится очевидной нецелесообразность применения МГЛ и НЛВД в одном и том же зеркальном СП; ЗО с такими лампами будет обеспечивать различные КСС, что недопустимо [1]. Для предотвращения попадания отраженного потока снова на лампу, что нарушает ее тепловой режим (и, следовательно, меняет — в той или иной степени — характеристики ИС) и изменяет расчетную КСС, необходимо колбу лампы делать цилиндрической с наименьшими диаметрами  $d_k$  и длиной  $l_k$ , не выходя за рамки, налагаемыми допустимым тепловым режимом колбы при использовании ИС в приборе.

Поэтому МГЛ в эллипсоидных колбах нецелесообразны, так как выполнение указанных выше требований увеличивает диаметр и габариты зеркального отражателя. Тот же расчетный опыт дает основание утверждать [1], что применение одного и того же прибора для однотипных ламп разной мощности возможно в том случае, если параметр  $a$  меняется не более чем на единицу при  $d_{\text{ct}} \gg \Delta f_a$ .

На примере прожекторного прибора проиллюстрируем изменения светотехнических параметров при варьировании размеров СТ. Прибор имеет параболоидный ЗО с  $D = 0,45 \text{ м}$ ,  $f = 0,1125 \text{ м}$ ,  $\varphi_{\max} = 90^\circ$  и лампу МГЛ типа ДРИ-1000-6; размеры СТ лампы:  $d_{\text{ct}1} = 22 \text{ мм}$ ,  $l_{\text{ct}1} = 86 \text{ мм}$  и габаритная яркость  $L_{\text{r}1} = I_{\text{max}} / (d_{\text{ct}} l_{\text{ct}}) = 5,3 \text{ Мкд/м}^2$ . Изменение силы света прожектора дано на рис. 1 (кривая 1). Оставляя  $\Phi$ ,  $I_{\text{max}}$ , площадь проекции  $A_{\text{ct}1} = (d_{\text{ct}} l_{\text{ct}})$  и, следовательно,  $L = L_{\text{r}1}$  постоянными, изменяем размеры СТ так, чтобы увеличить равномерность светового потока в

пучке прожектора. Размеры нового СТ2 —  $d = 30$  мм и  $l_{ct2} = 63$  мм (рис. 1, кривая 2). Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что полочка увеличилась с  $2,51^\circ$  до  $4^\circ$ ; а значение  $\alpha_{10}$  уменьшилось с  $12,5^\circ$  до  $9^\circ$ , что дает увеличение полезного КПД ( $\eta_{p2} > \eta_{p1}$ ). Увеличить значение осевой силы света прожектора ( $I_o$ ) можно за счет повышения габаритной яркости ( $L_r$ ) путем сокращения площади проекции ( $A_{ct2} < A_{ct1}$ ) при  $\Phi = \text{const}$  и  $I_{\max} = \text{const}$ . Оставив неизменным  $d_{ct} - d_{ct2} = d_{ct1}$  — уменьшим длину —  $l_{ct2} \approx 69$  мм (рис. 2, кривая 2). КСС прожектора с ДРИ-1000-6 приведена на рис. 2 (кривая 1). Из кривых рис. 2 видно, что  $I_{o2}$  по сравнению с  $I_{o1}$  увеличилась на 20, а  $\alpha_{10}$  сократился до  $10^\circ 30'$ . Увеличение  $L_r$  за счет снижения  $d_{ct}$  нерационально из-за повышения при этом критичности прибора к поперечным расфокусировкам и aberrации. Повышать  $L_r$ , когда необходимо увеличить  $I_o$ , можно и при снижении  $\Phi$ . НЛВД выпускаются в матированной колбе; это оправдано, если колба цилиндрическая, так как КСС светильника при матировке становится более стабильной, пусть и "за счет" небольшой потери светового потока. Покажем, как изменение параметров ЗО оказывается на КСС прибора. Для этого при  $D = 0,45$  м увеличим угол охвата  $\varphi_{\max}$  до  $120^\circ$ , что вызовет снижение  $f$  до 62,8 мм. Изменение силы света этого прожектора показано на рис. 3 (кривая 2); там же приведена КСС прожектора при  $\varphi_{\max} = 90^\circ$  (кривая 1). Сравнение КСС указывает на резко возросшую неравномерность светового пучка (угол излучения увеличился до  $26^\circ$ ) короткофокусного прожектора; при этом  $\eta_{p2} > \eta_{p1}$ , так как значение  $I_\alpha$  начиная с  $4^\circ$  оказывается ниже полезного уровня.

Приведенные выше данные и связи побудили [2—6] укрупненно рассмотреть возможные способы управления  $d_{ct}$  и  $l_{ct}$  НЛВД, перспективность которых не вызывает сомнений. Так как

$$P_l = K_l U_l I, \quad P_1 = K_{ct} \varepsilon I;$$

$$I_3 = (U_l - U_{ak}) / \varepsilon, \quad a_{ak} P_1 = q_{izl} \pi d_2;$$

$$q_{izl} = \varepsilon_k \sigma_0 (T_2^4 - T_0^4);$$

$$\varepsilon = (50 + 0,08 p_{xe}) \mu_{Na}^{-2} t_{x3} \cdot 10^{-12} I^{-0,2};$$

$$\eta_v = \eta_{vc} \left(1 - \frac{P_{ak}}{P_l}\right); \quad P_{ak} = K_{ak} U_{ak} I;$$

$$\eta_{vc} = a_{ak} \psi(P_1),$$

где  $P_l$ ,  $P_{ak}$ ,  $P_1$  — мощности лампы, анодно-катодной области и положительного столба — ПС — единичной длины;

$U_l$ ,  $U_{ak}$  — напряжение на лампе и анодно-катодное падение напряжения для НЛВД  $U_{ak} = (4 \pm 1)$ , В;  $I$  — ток лампы;  $K_l$ ,  $K_{ct}$ ,  $K_{ak}$  — коэффициенты мощности лампы, ПС и анодно-катодной области;  $\varepsilon$  — градиент потенциала в ПС;  $d_2$ ,  $l_3$  — внешний диаметр горелки и расстояние между ее электродами;  $a_{ct}$  — доля  $P_1$ , поглощаемая стенкой горелки;  $q_{izl}$  — удельные потери внешней поверхности горелки на лучеиспускание;  $\varepsilon_k$  — интегральный коэффициент излучения стенок горелки,  $\varepsilon = f(T_2)$ ;  $T_2$ ,  $T_0$  — температуры внешней поверхности средней части горелки и внутренней поверхности внешней колбы;  $p_{xe}$  — давление ксенона в горелке при комнатной температуре, Па;  $\mu_{Na}$  — мольная доля содержания натрия в натриевой амальгаме;  $t_{x3}$  — температура холодной зоны в горелке,  $^\circ$ С;  $\eta_v$  и  $\eta_{vc}$  — световые отдачи лампы и ПС;  $\sigma_0$  — постоянная Стефана-Больцмана. Учитывая с позиций пары ИС-ЗО желательность получения ламп с большими  $d_2$  и меньшими  $l_3$ , уместно отметить следующее.

Так как всегда (из-за очень низких  $U_{ak}/P_{ak} \ll P_l$ , то  $\eta_{izl}/\eta_{vij} \approx (\eta_{vc}/\eta_{vcj})$  и вариации удельной мощностью ПС —  $P_1$  — позволяют менять на  $\eta_v$  10—20% (причем больший эффект имеет место при меньших мощностях ИС). Изменить в нужном направлении  $l_3/d_2$  можно варьируя  $t_{x3}$ , ибо увеличение  $t_{x3}$  на 1% приводит к уменьшению  $l_3$  на 4% при росте  $d_2$  примерно на те же 4% (т.е.  $l_3/d_2$  снижается на 8% при неизменных  $P_l$ ,  $U_l$ ,  $T_2$ ,  $\mu_{Na}$ ,  $p_{xe}$ ).

Переход, при  $P_l = \text{const}$ , к вариантам ИС с существенно пониженным значением  $U_l$  (по сравнению с традиционным  $U_l = 80 \div 100$  В) ведет, при неизменных  $T_2$ ,  $p_{xe}$ ,  $\mu_{Na}$  и  $t_{x3} = t_{x3, \text{opt}}$  к увеличению  $d_2$  и снижению  $l_3$  при росте (из-за перехода к большим  $P_l$ )  $\eta_{vc}$  и  $\eta_v$ ;  $L_r$  также возрастает.

Если  $P_l$  и  $U_l$  неизменные, то наметившаяся тенденция перехода к лампам с повышенным  $p_{xe}$  ведет к ИС ( $T_2$ ,  $p_{xe}$ ,  $\mu_{Na}$  — неизменные), у которых больший  $d_2$  и меньшее  $l_3$  (например, увеличение  $p_{xe}$  с 20 до 200 мм рт. ст ведет к снижению  $l_3$  на 30% при  $d_2 l_3 \approx \text{const}$ ; при этом из-за увеличения  $P_1$ , растут значения  $\eta_{vc}$  и  $\eta_v$ , а также  $L_r$ .

Если варьировать  $T_2$  (при неизменных  $P_l$ ,  $U_l$ ,  $\mu_{Na}$ ,  $t_{x3}$ ,  $p_{xe}$ ), то  $l_3 = \text{const}$ , а  $d_2$  возрастает в случае облегчения теплового режима стенок горелки; так как  $P_1 = \text{const}$ , то  $\eta_{vc}$  и  $\eta_v$  практически не меняются, а  $L_r$  снижается (для снижения  $T_2$  на 1% нужно  $d_2$  увеличить примерно на 3%).

Если варианты НЛВД ( $P_l = \text{var}$ ) располагать на различных "точках" нагрузочной вольт-амперной характеристики индуктивного балласта (варьируя  $d_2$ ,  $l_3$ ,  $t_{x3}$ ,  $U_l$  и иное), то [4, 6, 7] можно обеспечить изменение  $P_l$  примерно в 2—2,5 раза, а при  $U_l \sim 40 \div 50$  В и значительное увеличение отношения  $d_2/l_3$  при росте  $L_r$  ( $\eta_v$  увеличивается).

В случае ориентации во многом сложившиеся диаметры трубок из ПОА ( $d_2$ ,  $d_3$ ) переход к повышенному давлению Xe ( $I = \text{const}$ ,  $T_2 = \text{var}$ ,  $t_{x3} = t_{x3, \text{opt}}$ ,  $\mu_{Na} = \mu_{Na, \text{opt}}$ ) приведет, при  $P_l = \text{const}$  к росту соответствующих  $P_1$ , при снижении  $l_3$  и, следовательно, увеличении  $d_2/l_3$ .

Отметим также, что прибор с лампой должен: обеспечивать заданные  $I_{(\alpha, \beta)}$  и КПД; наименьшие отклонения  $I_{(\alpha, \beta)}$  при имеющих место разбросах параметров ИС; пониженные отклонения — за так или иначе установленные допуски  $I_{(\alpha, \beta)}$  и КПД — в  $I_{(\alpha, \beta)}$  и КПД при обследовании выборки ЗО одного типа с ИС, принятым за образцовый; давать пониженную реакцию на реальные расфокусировки светящего тела, считающегося образцовым. Разброс  $P_l$ ,  $d_2$ ,  $l_3$  и  $\Phi$  у ИС также должен находиться в разумных пределах, во многом задаваемых и ЗО.

Из изложенного видно, что большее согласование взаимных требований к ИС и ЗО; ЗО и МГЛ и НЛВД может привести к улучшению технико-экономических и светотехнических показателей комплекта разрядная лампа высокой интенсивности — зеркальный световой прибор (ЗО).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трембач В.В. Световые приборы, М.: Высшая школа. 1990.
2. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат. 1991.
3. Литвинов В.С., Прозорова М.С. Физика, техника и перспективы развития источника света массового применения / Итоги науки и техники. Серия Светотехника и инфракрасная техника. Т. 6 ВИНИТИ АН СССР. 1989.
4. Литвинов В.С. Оптимизация источников света массового применения, М.: Энергоатомиздат. 1990.
5. Григорян А.Н. Исследование и разработка натриевых ламп высокого давления с улучшенными спектральными характеристиками. Автореф. дис... канд. техн. наук М.: 1990.
6. Чумак Л.А. Моделирование предпробойных полей, возникновение разряда и оптимизация параметров маломощных натриевых ламп высокого давления. Автореф. дис... канд. техн. наук М.: 1995.