

Н вопросу об определении и оценке aberrации прожекторных параболоидальных отражателей

Н. А. КАРЯКИН и М. Г. МАЛЬГИН
Москва

(По материалам прожекторной лаборатории ВЭИ)

I. Общее

В отражателе строго параболоидальной формы (без-аберрационный отражатель) пучок световых лучей, направленных параллельно оптической оси отражателя, собирается после отражения в одной точке, лежащей на оптической оси и называемой фокусом данного отражателя. Практически отражатели имеют в различных точках поверхности то или иное отклонение от параболоидальной формы, вследствие чего отраженные лучи собираются не в одной точке, а на некоторой поверхности. Указанное явление носит название aberrации отражателей.

Соответствующий анализ показывает, что наличие aberrации у прожекторного отражателя, вообще говоря, влечет за собой увеличение рассеяния света в световом пучке прожектора, однако, характер указанного дополнительного рассеяния (помимо основного рассеяния, зависящего от параметров источника света и отражателя) будет неодинаков в различных случаях. Так, в некоторых случаях в зависимости от характеристик источника света мы будем иметь уменьшение осевой силы света прожектора при очень малой aberrации отражателя (прожекторы с дугой высокой интенсивности), в то время как в других случаях (прожекторы с проекционными лампами накаливания и др.) наличие сравнительно большой aberrации не будет снижать осевой силы света. В отношении полезного угла рассеяния прожектора может иметь место как увеличение, так и уменьшение указанного угла, причем определяющими факторами здесь будут: величина и характер aberrации, величина самого полезного угла рассеяния и яркостная характеристика прожекторного источника света. Однако одно явление будет общим для всех случаев наличия aberrации у отражателя—увеличение полного угла рассеяния прожекторного светового пучка (до нулевого значения силы света).

В зависимости от величины и характера aberrации влияние ее на световой пучок прожектора будет различным, поэтому для прожекторов различных типов в соответствии с назначением и условиями работы данного прожектора необходимо установить определенную степень оптической точности отражателя. С другой стороны, поскольку наличие определенной aberrации может повести к браковке отражателя для данных условий работы, необходимо, чтобы само определение aberrации отражателя было строго определенным и точным. По последнему вопросу в прожекторной практике настоящего времени не имеется достаточной ясности по причине неточного определения положения фокуса реального отражателя.

II. Действительный фокус отражателя и величина продольной aberrации

Испытание отражателей в отношении установления их aberrационных погрешностей может производиться различными способами, из которых одни дают только качественное определение aberrации (способ Чиколова), другие ее количественное выражение (способ Шуккера, станок Герца и др.). Наиболее распространенным и существенным способом характеристики отражателя в смысле оптической точности необходимо признать определение кривой его продольной aberrации.

Кривая продольной aberrации строится по замеренным (при помощи соответствующих приспособлений) фокусным расстояниям различных зон отражателя в прямоугольных координатах, где по оси абсцисс откладывают характеристику зоны (угол между радиусом-вектором к середине зоны и оптической осью отражателя или величину радиуса исследуемой точки), а по оси ординат—числовую величину aberrации данной зоны. Величина aberrации зоны определяется как разность между действительным фокусным расстоянием всего отражателя и фокусным расстоянием данной зоны ($OF_d - OF_i$, рис. 1).

При измеренных фокусных расстояниях всего отражателя, очевидно, величина aberrации отдельной зоны будет зависеть от положения фокусной точки всего отражателя, т. е. от величины действительного фокусного расстояния отражателя (OF_d). В вопросе об определении последней величины в практике настоящего времени наблюдается большая неясность и путаница.

Проф. Фролов в книге «Электрические прожекторы»,¹ под действительным фокусным расстоянием отражателя понимает «номинальный (средний) фокус» (§ 18, стр. 77) и, определяя «относительную aberrацию», считает продольную aberrацию как разность между фокусным расстоянием зоны и номинальным фокусным расстоянием.

Очевидно, что отождествление номинального фокусного расстояния с средним фокусным расстоянием, определяемым как «среднее значение всех измеренных фокусных расстояний разных зон», является неверным, о чем убедительно говорит кривая зональных фокусных расстояний (рис. 2), заимствованная нами из упомянутой книги. Здесь прямая с ординатой 420 мм характеризует номинальный фокус, а прямая, проведенная нами, с ординатой 413,4 мм характеризует среднее фокусное расстояние. Как правило, прямые номинального и среднего фокусов совпадать между собой не будут. Нам важно отметить, что в приведенном случае мы имеем определение продольной aberrации зон, как разности между зональным фокусным расстоянием и номинальным фокусным расстоянием отражателя.

В статье В. В. Антонова-Романовского и В. Л. Пульвера «Расчет луча прожектора по aberrационной характеристике отражателя»² авторы указывают, что «аберрации отсчитываются от произвольной точки с (номинального фокуса)».

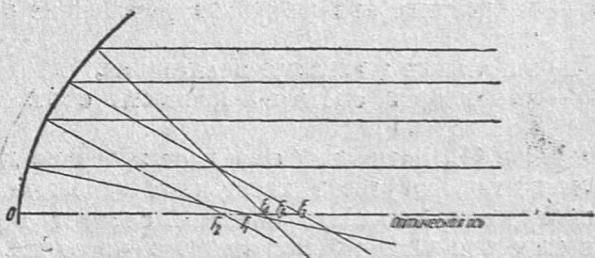


Рис. 1. Продольная aberrация параболоидального отражателя

Таким образом одно из определений фокусного расстояния реального отражателя, которое встречается в литературе и практике, будет номинальное фо-

¹ Проф. Фролов. «Электрические прожекторы». Энергоиздат, 1933.

² «Журнал технической физики», т. IV, вып. 3, 1934.

кусное расстояние³. Между тем номинальное фокусное расстояние является производственной характеристикой отражателя и дает лишь приблизительную величину фокусного расстояния, а потому использование его для целей определения aberrации отдельных зон отражателя абсолютно неправильно.

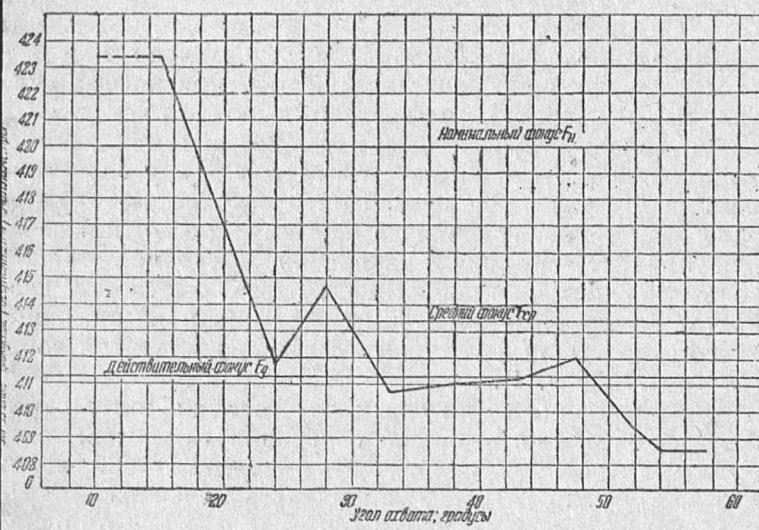


Рис. 2. Аберрационная характеристика отражателя диаметром $D = 90$ см фирмы Парсонс

Следующее встречающееся в практике определение фокусного расстояния реального отражателя будет среднее (арифметическое) фокусное расстояние. При наличии различных фокусных расстояний отдельных зон отражателя за величину фокусного расстояния всего отражателя можно принимать среднее (арифметическое) фокусное расстояние лишь в том случае, если все зоны одинаково ценные в световом отношении. Из условий определения зон отражателя (см. ниже) следует неодинаковая их световая ценность, поэтому среднее (арифметическое) фокусное расстояние не может являться действительным фокусным расстоянием всего отражателя.

Для случая неодинаковой ценности разных зон в световом отношении, для определения действительного фокусного расстояния всего отражателя в целом следует воспользоваться выражением для центра тяжести системы, в которое вместо величин масс нужно подставить значения коэффициента световой ценности отдельных зон.

В той же книге проф. Фролова, наряду с целым рядом других определений фокусного расстояния реального отражателя, мы имеем понятие «действительного или расчетного фокусного расстояния», определяемого по формуле

$$OF = \frac{\sum OF_i b_i}{\sum b_i}, \quad (1)$$

где OF — действительное фокусное расстояние отражателя,

OF_i — зональные фокусные расстояния,

b_i — коэффициент световой ценности соответствующей зоны.

Выражение (1), поскольку оно дает значение действительного фокусного расстояния отражателя, как координату центра тяжести системы, следует признать правильным при условии правильного определения величин коэффициента световой ценности зон.

III. Световая ценность отдельных зон отражателя

В литературе с вопросом о световой ценности зон отражателя мы встречаемся в упомянутой выше книге

³ Из нашего личного опыта мы можем констатировать значительную распространенность в практике указанного способа определения действительного фокуса и aberrации отражателя.

проф. Фролова, где световая ценность представлена в виде кривых⁴ коэффициента ценности зон для двух разных источников света. По данным указанных кривых положение наиболее ценной зоны изменяется в зависимости от кривой распределения силы света источника, и это объясняется в книге тем, что «различные точки отражателя прожектора обладают разной яркостью». Яркость различных точек поверхности отражателя зависит по данным книги от кривой распределения силы света источника и представлена в виде соответствующих кривых⁵ для случаев точечного и дугового источников света.

Нетрудно видеть, что данные о коэффициенте световой ценности зон, приведенные в книге проф. Фролова, являются неправильными, поскольку неверно основное положение книги о том, что «различные точки поверхности отражателя обладают разной яркостью». Именно различные точки светового отверстия отражателя, давая зеркальное изображение источника света, обладают одинаковой яркостью (при условии, что яркость источника света одинакова в направлениях к различным точкам отражателя), и это находит свое выражение в законе Манжена.

Рассматривая кривые относительной яркости отражателя, приведенные в книге, можно видеть, что они представляют в действительности не яркость отражателя⁶, а относительные величины выражения

$$E = \frac{I}{F^2} \cos^4 \frac{\varphi}{2}, \quad (2)$$

где I — сила света источника,

F — фокусное расстояние отражателя,

φ — угол между радиусом-вектором к данной точке поверхности отражателя с оптической осью последнего.

Величина E , определяемая из выражения (2), есть освещенность элемента отражателя в плоскости, перпендикулярной к направлению радиуса-вектора к данному элементу. Поскольку эта величина не дает представления о величине силы света зоны (не связана с величиной угла рассеяния), то она не может служить характеристикой световой ценности зон.

Как известно, осевая сила света прожектора I определяется по формуле Манжена.

$$I = mBS, \quad (3)$$

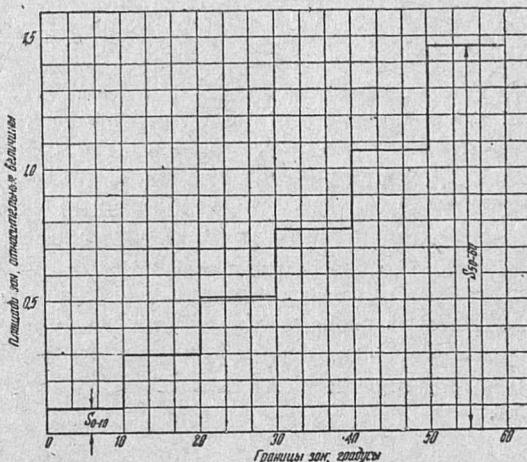


Рис. 3. Площади световых отверстий различных зон отражателя

где B — яркость источника света в сб,

S — площадь светового отверстия отражателя в см^2 ,

m — коэффициент, учитывающий потери света в проекционном аппарате.

⁴ Кривые фиг. 98 и 99, стр. 33.

⁵ Кривые фиг. 96 и 97, стр. 82.

⁶ При точечном источнике света понятие яркости вообще неприменимо ни к источнику света, ни к поверхности отражателя.

Зональная сила света может определяться по той же формуле (3), для чего необходимо вместо величины S поставить в формулу площадь светового отверстия зоны S_3 . Отсюда следует, что при постоянстве яркости B (источника света в направлении всех зон) и постоянстве коэффициента потерь t световая ценность зоны будет определяться величиной площади светового отверстия S_3 зоны. Что касается последней величины, то она прежде всего зависит от способа разбивки поверхности отражателя на отдельные зоны.

Под зоной прожекторного отражателя обычно понимается часть отражателя, вырезаемая двумя конусами, образованными радиусами-векторами, которые проведены из точки фокуса под различными углами к оптической оси отражателя. Величина плоского угла между радиусами-векторами к границам зоны определяет угловую размер $(\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1)$ зоны и в отражателях, работающих в прожекторах дальнего действия; обычно для целей расчетов и испытаний угловой размер зоны принимается равным 10° . Таким образом стандартные отражатели с полным углом охвата $2\varphi = 120^\circ$ разбиваются на шесть десятиградусных зон.

При указанном, принятом в практике, способе разбивки поверхности отражателя на отдельные зоны площади светового отверстия зон не будут одинаковы и будут выражаться в виде

$$S_3 = 4\pi F^2 \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_2}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi_1}{2} \right), \quad (4)$$

где F — фокусное расстояние отражателя, φ_2 и φ_1 — углы радиусов-векторов к границам зоны с оптической осью отражателя.

Из формулы (4) и кривой рис. 3, где зависимость (4) изображена графически, видно, что при равных угловых размерах ($\Delta\varphi$) зон площадь светового отверстия (S_3) любой внешней зоны всегда больше той же величины для смежной внутренней зоны и всегда наибольшую величину площади S_3 будет иметь крайняя (внешняя) зона отражателя.

Из формул (3) и (4) следует, что при постоянстве яркости источника света в направлении всех зон отражателя наибольшую зональную силу света получим от крайней зоны, которая, таким образом, будет наиболее ценной в световом отношении.

Выражая в относительных величинах площади светового отверстия отдельных зон отражателя с углом охвата $2\varphi = 120^\circ$, получим данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Площади светового отверстия отдельных зон 120° отражателя в относительных величинах (проценты от площади светового отверстия всего отражателя)

Границы зон, градусы	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60
Площадь светового отверстия зон S_3 в %	—	7,2	12,5	18,7	26,0	35,6

Примечание. Зона $0—10^\circ$ из расчета исключена, так как в прожекторах с дугой свет в направлении ее экранируется углеродом отрицательного угла.

На основании сказанного выше, величины ($S_3 \%$) можно принять в качестве коэффициентов световой ценности зон отражателя, работающего с источником света, имеющим одинаковую яркость в направлении к любой зоне отражателя.

Прожекторные источники света в виде ламп накаливания и простой угольной дуги имеют яркость, практически не зависящую от направления, в то время как дуга высокой интенсивности этим свойством не обладает. Очевидно, в последнем случае необходимо под

коэффициентом световой ценности зоны понимать величину относительной силы света зоны, т. е. относительную величину произведения ($B_3 \times S_3$). Отличие коэффициентов световой ценности в этом случае от данных, приведенных в табл. 1, будет определяться характером изменения яркости источника в зависимости от направления.

Данные о максимальных величинах яркости кратера дуги высокой интенсивности и относительные величины зональных сил света даны в табл. 2.

Таблица 2

Зональные силы света 120° отражателя с дугой высокой интенсивности

Границы зон, градусы	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60
Максимальные значения яркости B_3 кратера высокой интенсивности углей Националь, килостильбы	—	68,5	67,7	66,5	61,9	58,8
Сила света зоны I_3 , %	—	7,9	13,5	19,7	25,6	33,3

Из табл. 1 и 2 видно, что относительные значения величин $S_3 \%$ и $I_3 \%$ мало отличаются друг от друга, что объясняется сравнительно небольшим изменением яркости кратера дуги высокой интенсивности в зависимости от направления в пределах угла охвата отражателя. Так как приведенные примеры охватывают все случаи прожекторных источников света, применяемых в настоящее время, мы считаем возможным за коэффициенты световой ценности зон (Z_i) принять средние величины между значениями S_3 табл. 1 и I_3 табл. 2. Соответствующие данные (округленные) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты Z_i световой ценности зон 120° отражателей

Границы зон, градусы	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60
Коэффициент световой ценности зоны, Z_i	0	8	13	19	26	34

IV. Влияние аберрации на световой пучок прожектора

По данным фокусных расстояний различных зон OF_i и коэффициента световой ценности Z_i можно по формуле (1) определить величину действительного фокусного расстояния OF_d отражателя. Разность $OF_i - OF_d$ будет представлять собой действительную величину продольной (линейной) аберрации данной зоны отражателя.

На рис. 2 проведены линии действительного фокуса F_d , среднего фокуса F_{cp} и номинального фокуса F_n с ординатами, соответственно равными 411,3, 413,4 и 420 мм. Из этого практического случая непосредственно видно, что ошибка в определении аберрации данной зоны может быть очень велика, если линия фокуса (рис. 2), которая должна служить нулевой линией для отсчета величин продольной аберрации по замеренным фокусным расстояниям, будет определена неправильно. Между тем, неправильное определение величин аберрации отдельных зон не дает возможности правильно оценить оптических качеств данного отражателя.

Следует иметь в виду, что любое неправильное определение фокуса отражателя независимо от соотношения величин аберрации отдельных зон, получающихся при этом, всегда ведет к переоценке вредного влияния аберраций данного отражателя на световой пучок прожекто-

ра. Сказанное можно иллюстрировать кривыми рис. 4 — расчетными кривыми распределения силы света проектировщика с упомянутым отражателем фирмы Парсонс и дугой высокой интенсивности. Эти кривые просчитаны для трех случаев продольной аберрации отдельных зон в соответствии с тремя способами определения положения фокуса отражателя (действительный, средний и номинальный) по данным рис. 2. На том же рис. 4 дана расчетная кривая силы света при идеальном (безаберрационном) отражателе того же диаметра. Из указанных кривых видно, что при правильном определении фокуса и аберрации отражателя снижение осевой силы света данного прожектора за счет аберрации составит 12%, при фокусе как среднем арифметическом — 19% и при номинальном фокусе — 59%. Очевидно, в последнем случае определения фокуса данный отражатель пришлось бы признать явно негодным, между тем как по существу он является отражателем средней оптической точности.

Вредное влияние аберрации отражателя на световой пучок прожектора зависит от формы и яркостной характеристики источника света. На рис. 5 приведены рассчитанные нами кривые распределения силы света прожектора с 150-см отражателем фирмы ВВТ, кривая продольной аберрации которого приведена на рис. 6. Три пары кривых рис. 5 соответствуют случаям трех источников: шара, диска и дуги высокой интенсивности, причем каждая пара кривых представляет случай безаберрационного отражателя и отражателя с заданной аберрацией. Наибольшее значение яркости всех трех источников света принято одинаковым⁷ при одинаковом диаметре источника света $d = 16$ мм.

Как видно из кривых рис. 5, наличие аберрации у данного отражателя приводит к уменьшению осевой силы света на 15% при источнике света в виде дуги высокой интенсивности. При источниках света других форм наличие данной аберрации не снижает осевой силы света прожектора, но оказывается на уменьшении ширины гребня кривой светового пучка, причем с дисковым источником света имеем меньшую ширину гребня, чем с шаровым источником. Очевидно, дальнейшее увеличение аберрации у отражателя быстрее привело

бы к уменьшению осевой силы света при дисковом источнике.

Из кривых рис. 5 также видно, что влияние аберрации на величину полезного угла рассеяния будет различным в зависимости от величины последнего. Так например, в случае прожектора с дугой высокой интенсивности наличие данной аберрации вызвало увеличение 10% угла рассеяния и уменьшение 50% угла рассеяния.

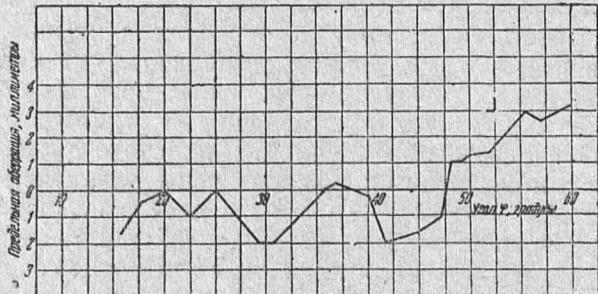


Рис. 6. Кривая продольной аберрации стеклянного отражателя ВВТ № 14707; $D = 150$ см

Из изложенного следует, что наиболее чувствительным к наличию аберрации у отражателя будет прожектор с дугой высокой интенсивности, где даже очень малая аберрация снижает осевую силу света прожектора. В этом случае правильное определение величин аберрации отдельных зон отражателя особенно важно. Заметим, однако, что величина осевой силы света не является достаточной характеристикой прожектора, необходимо принимать во внимание также величину силы света на границах полезного угла рассеяния, ход кривой и величину полного угла рассеяния. Исчерпывающий анализ указанных характеристик необходим при рассмотрении вопроса о нормировании аберраций отражателей, однако, обсуждение его в данной работе не предполагалось.

V. Выводы

1. Действительное фокусное расстояние должно определяться по формуле

$$OF_d = \frac{\sum OF_i Z_i}{\sum Z_i}, \quad (5)$$

где OF_d — действительное фокусное расстояние,

OF_i — измеренное, зональное фокусное расстояние,

Z_i — коэффициент световой ценности зоны, определяемый для случая 120° отражателей табл. 3.

2. Продольная аберрация должна определяться разностью между действительным и зональным фокусными расстояниями.

3. Определение действительного фокусного расстояния, как среднего арифметического или номинального фокусного расстояния является, безусловно, неверным.

4. Любое определение действительного фокусного расстояния, отличное от определения по формуле (1), влечет за собой ошибочную оценку оптической точности отражателя, причем эта ошибочность проявляется в преувеличении вредного влияния оптических погрешностей отражателя на световой пучок прожектора.

5. Наличие аберрации отражателя влечет за собой деформацию прожекторного пучка, которая проявляется в изменениях осевой силы света и угла рассеяния, причем в прожекторах с высоконапряженной дугой осевая сила света снижается при всякой аберрации, а поэтому точное определение аберрации отражателей указанных прожекторов особо важно. В прожекторах с источниками света равномерной яркости осевую силу света снижает не всякая аберрация, но уменьшение ширины гребня происходит при аберрации любой величины.

⁷ Кривые распределения яркости по кратеру высоконапряженной дуги см. в статье Карякина «Бюллетень ВЭИ», № 7, 1934.

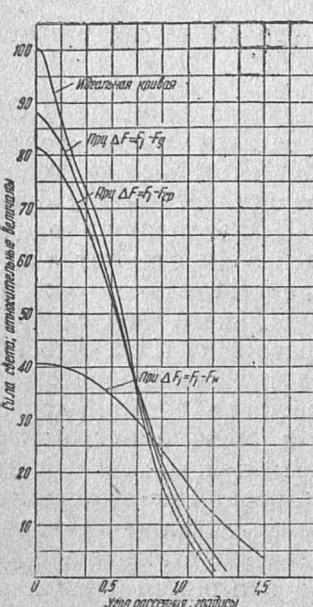


Рис. 4. Кривые светораспределения прожектора с отражателем Парсонса диаметром $D = 90$ см с высоконапряженной дугой при разных способах определения аберрации

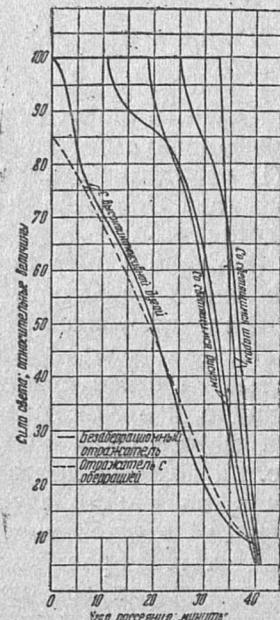


Рис. 5. Деформация прожекторного пучка по причине аберрации отражателя при различных типах источников света