

Гудинов К.К., Тарасов Б.Н.

## **«МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЭЛЛИпсоИДНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ДЛЯ ОСВЕТИТЕЛЬНО – ПРОЕКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ КСЕНОНОВОЙ ЛАМПЫ»**

В современной кинопроекционной аппаратуре широкое применение нашли осветительно - проекционные системы (ОПС) с горизонтальным расположением ксеноновой лампы. Такая ОПС более эффективна. Рациональная форма светового пятна, обеспечивающая необходимую степень равномерности освещённости при отсутствии контротражателя, использование «глубокого» эллипсоидного отражателя - с увеличенным углом охвата (до  $270^0$ ) обеспечивают получение большего светового потока, чем в системе с вертикальным расположением лампы, при той же мощности источника света.

Однако и для этих ОПС коэффициент полезного действия редко достигает 12 – 15%.

Данная статья направлена на дальнейшее повышение эффективности использования светового потока горизонтально расположенной ксеноновой лампы путем комплексного подхода к осветительно – проекционной системе, рассматривая её как взаимосвязанную согласованную совокупность источника света, отражателя, кадрового окна и проекционного объектива. Изложение методики сопровождается примером расчёта отражателя применительно к 35-мм кинематографическим системам.

Потери светового потока в осветительно – проекционной системе происходят по ряду причин:

- ♦ за счёт ограничений, вызываемых конструкцией лампы, затемнением её колбы, конструкции отражателя (ограниченного угла охвата) и способов их крепления;
- ♦ за счёт пропускания части светового потока (до 15 %) поверхностью отражателя, имеющего интерференционное покрытие;
- ♦ за счёт применения обтюратора (потери до 40 – 50 %);
- ♦ за счёт несоответствия формы поперечного сечения пучка лучей в плоскости кадрового окна форме кадрового окна;
- ♦ за счёт потерь при прохождении света через объектив из – за отражения от поверхностей линз, поглощения в толще стекла и виньетирования оправой объектива.

Выбрав оптико - осветительную систему с горизонтально расположенной ксеноновой лампой и эллипсоидным отражателем для согласования размеров лампы и кадрового окна определим линейное увеличение осветительной системы  $\beta_{осв}$ , которое рассчитывается исходя из необходимости перекрытия изображением светящегося тела всей площади кадрового окна кинопроекционного аппарата.

$$\beta_{\text{осв}} = \left| \frac{\ell}{D_{\text{ст}}} \right|$$

где  $\ell$  - максимальный размер освещаемой поверхности,  $D_{\text{ст}}$  - размер светящегося тела.

Определим размер светящегося тела. Для ксеноновых ламп мощностью от 1 до 5 кВт, используемых в 35 - мм кинопроекторных аппаратах, длина дуги разряда составляет соответственно от 3 до 5,5 мм. Примерная форма разряда показана на рис. 1а. В плоскости светового центра разряд горизонтально расположенной ксеноновой лампы имеет форму круга с достаточной равномерностью яркости. Высокая равномерность яркости светового центра позволяет построить осветительно - проекционную систему с изображением разряда источника света в кадровом окне кинопроектора. При этом разряд ксеноновой лампы плоскостью светового центра сопрягается с первым фокусом эллипсоидного отражателя, а плоскость кадрового окна – со вторым его фокусом (рис. 2).

Для горизонтально расположенной лампы размер светящегося тела соответствует диаметру светового центра  $D_{\text{сц}}$ , который, с учетом допустимой неравномерности освещенности экрана, может быть принят равным длине дуги разряда. Например, для дуговой ксеноновой шарообразной лампы ДКсШ - 2000 длина дуги разряда находится в пределах от 3,5 до 4,2 мм, поэтому диаметр светового центра  $D_{\text{сц}}$  может быть принят равным 4 мм.

Среди различных видов 35-мм кинематографа наибольшую величину имеет диагональ  $f$  кадрового окна анаморфированного кинематографа, где ширина кадрового окна  $b_k$  и высота  $h_k$  кадрового окна соответственно составляют 21,1 и 18,1 мм. Диагональ без учета закруглений углов будет равна

$$f = \sqrt{b_k^2 + h_k^2} = \sqrt{21,1^2 + 18,1^2} \cong 28 \text{ мм}$$

В этом случае для принятых значений требуемое увеличение осветительной системы составит

$$\beta_{\text{осв}} = \frac{28}{4} = 7^x$$

Для конечных размеров светящегося тела линейное увеличение оптико - осветительной системы будет различным для разных кольцевых зон эллипсоидного отражателя в пределах угла охвата  $0 < \sigma < u$ . Увеличение максимально для параксиальной области при  $\sigma = 0^0$  (вдоль оси лампы) и будет уменьшаться по мере приближения к углу  $\sigma = 90^0$  и далее. Линейное увеличение  $\beta_\sigma$  зоной под углом к оптической оси связано с параксиальным увеличением  $\beta_0$  зависимостью

$$\beta_{\sigma} = \frac{1}{2\beta_0} [1 + \beta_0^2 - (1 - \beta_0^2) \cdot \cos \sigma]$$

Для упрощения расчетов (с небольшой ошибкой) будем считать, что минимальное увеличение соответствует углу  $\sigma = 90^\circ$ , тогда

$$\beta_{\sigma} = \frac{1}{2\beta_0} (1 + \beta_0^2)$$

отсюда

$$\beta_0 = \beta_{\sigma} \pm \sqrt{\beta_{\sigma}^2 - 1}$$

Так как  $\beta_{\sigma}$  не может быть меньше  $\beta_{\text{осв}}$ , то

$$\beta_0 = 7 \pm \sqrt{7^2 - 1} = 14^x$$

Зная увеличение отражателя в параксиальной области можно рассчитать его характеристики, согласовав их с параметрами лампы и проекционного объектива. Расстояния  $S$  и  $S'$  соответственно от вершины отражателя до первого и второго фокусов, показанные на рис.2, связаны между собой зависимостью

$$S' = S * \beta_0$$

Определим расстояние  $S$ . Удаление центра светящегося тела от вершины отражателя увеличивает габариты оптико - осветительной системы. Уменьшение этого расстояния приводит к перегреву и возможному повреждению отражателя и, кроме того, при наличии центрального отверстия в нём, к возможному снижению светового потока, направленного к вершине отражателя. На практике для ламп мощностью 2 – 3 кВт эта величина  $S = L_{\min} = 90 \div 100$  мм.

Отверстие в вершине отражателя делается для необходимости установки и регулировки лампы, для её охлаждения, и по диаметру обычно несколько превышает диаметр колбы лампы. Однако для рационального использования светового потока лампы отверстие в отражателе не должно превышать диаметр, соответствующий угловому размеру, в пределах которого излучение света горизонтальной лампой в сторону катода отсутствует. Этот угол определяется характеристикой распределения силы света для конкретной ксеноновой лампы. В качестве примера одна из характеристик приведена на рис. 1б, где показано распределение силы света в пространстве между анодом и катодом. Из этого рисунка видно, что угол  $\alpha$ , соответствующий вершинному отверстию отражателя не должен превышать

15 ÷ 20°.

При отсутствии такой характеристики, угол  $\alpha$  (и далее угол  $\beta$ ) могут быть примерно определены по чертежу соответствующей лампы. Для этого можно условно считать положение светящегося центра на середине межэлектродного расстояния и тогда, с учётом диаметра цилиндрической части лампы, угол  $\alpha$  определится «затемнением», создаваемым телом катода, а угол  $\beta$  диаметром тела анода. Например, в осветительно – проекционной системе с ксеноновой лампой с наружным диаметром колбы 52 мм, диаметр отверстия отражателя  $D_{0TB}$  может быть принят равным 56 ÷ 60 мм. Минимальное расстояние  $L_{min}$  от центра лампы до ближайшей точки отражателя может быть определено из рис.3. Здесь пунктиром показаны габариты лампы. Для предварительных расчётов, приняв угол  $\alpha$  равным 20°, оно составит

$$L_{min} = \frac{0,5 \cdot D_{отв}}{\sin 20^0} = 82 \div 88 \text{ мм}$$

Полученное расстояние меньше допустимого и должно быть несколько увеличено. Учитывая, что для эллипсоидного отражателя  $S < L_{min}$ , примем  $S = 88$  мм, тогда  $L_{min}$  будет близко к 90 мм. Такой расчёт позволяет рационально использовать световой поток, направленный в сторону отражателя.

Проведём расчёт характеристик эллипса, для чего вначале определим величину  $S'$  и межфокусное расстояние эллипса  $2c$

$$S' = 88 * 14 = 1232 \text{ мм}$$

$$2c = S' - S = 1232 - 88 = 1144 \text{ мм}$$

Отсюда  $c = 572$  мм

Дальнейший расчёт проводится по известным в математике для эллипса формулам с использованием обозначений, соответствующих рис. 2: большая полуось равна

$$a = S + c = 88 + 572 = 660 \text{ мм}$$

малая полуось равна

$$b = \sqrt{a^2 - c^2} = \sqrt{660^2 - 572^2} = 329,3 \text{ мм}$$

параметр эллипса равен

$$p = \frac{b^2}{a} = \frac{329,3^2}{660} = 164,3 \text{ мм}$$

тогда уравнение эллипса будет иметь вид:

$$\frac{X^2}{660^2} + \frac{Y^2}{329^2} = 1$$

Вид эллипсоидного отражателя и его характеристики представлены на рис. 4 в масштабе, близком к 1:20. Анализируя распределение света лампы в сторону кадрового окна (рис. 1 б) можно сказать, что глубина использования расчётного эллипса, по возможности, должна быть максимальной, ограничиваемой лишь углом распределения силы света лампы, равным  $180^\circ - \beta$ . Однако при проектировании эллипсоидных отражателей их размер должен быть согласован с применяемым проекционным объективом, точнее с его апертурным углом. При больших глубинах эллипса наклонные пучки света, падающие на край кадрового окна виньетируются оправой объектива, если они выходят за пределы апертурного угла и, наоборот, при малых глубинах отражателя входной зрачок проекционного объектива недостаточно заполняется светом. На рис. 4, справа, показано кадровое окно кинопроекторного аппарата и апертурный угол объектива  $U'$ . Апертурные углы применяемых на практике кинопроекторных объективов невелики и составляют  $14 - 20^\circ$ . Луч апертурного угла, выходящий из второго фокуса эллипса пересекает его поверхность в точке А; эта точка определяет максимальный диаметр отражателя  $D_0$ . Определение положения этой точки пересечения (координаты «Y») можно выполнить аналитически из двух уравнений: ранее полученного уравнения эллипса и уравнения прямой линии  $Y = kX + b_1$ , соответствующей лучу апертурного угла проекционного объектива, где

$$k = \operatorname{tg} U'$$

$$b_1 = c * \operatorname{tg} U'$$

Уравнение прямой линии имеет вид

$$Y = \operatorname{tg} U' * X + c * \operatorname{tg} U'$$

$$\text{или } Y = \operatorname{tg} U' * (X + c)$$

При расчёте следует обратить внимание на отрицательные значения координаты «X» и величины «с», так как они отложены влево от оси ординат. В этом примере расчёта, приняв апертурный угол равным  $14^\circ$ , уравнение линии имеет вид

$$Y = - 0,25 * X + 143$$

Возведя это уравнение в квадрат и приравняв значения « $Y^2$ » из

формулы эллипса и формулы линии, получим квадратное уравнение вида

$$0,3114 * X^2 - 71,5 X - 87989,5 = 0$$

Решив это уравнение, определим отрицательное значение «X»

$$X = - 528,9 \text{ мм}$$

Возвращаясь к уравнению прямой линии можно определить величину «Y», равную половине максимального диаметра отражателя  $D_0$

$$\frac{D_0}{2} = Y = - 0,25 (- 528,9 - 572) = 275 \text{ мм}$$

Отсюда

$$D_0 = 550 \text{ мм}$$

Глубину отражателя  $\Gamma_{\text{отр}}$  можно определить как разность модулей фокусного расстояния и полученной координаты «X»

$$\Gamma_{\text{отр}} = |a| - |X| = 660 - 528,9 = 131,1$$

Апертурный угол отражателя  $U$  определяется из отношения величины  $Y$  к разности  $c-X$ . В нашем расчёте он равен

$$U = \pi - \arctg \frac{D_0 / 2}{c - X} = 180^0 - \arctg \frac{275}{572 - 528,9} = 99^0$$

Из приведённого расчёта видно, что даже при согласовании элементов оптико - осветительной системы, определённая часть светового потока лампы, направленного в сторону кадрового окна кинопроектора из-за небольших апертурных углов оптических проекционных систем не используется. Повысить эффективность светового потока лампы в этом направлении возможно при приближении лампы к отражателю (при условии усиления охлаждения), так как в этом случае уменьшатся малая и большая полуоси, то есть габариты отражателя, и увеличится его угол охвата  $U$ . Увеличить эффективность этой части светового потока возможно также при установке сферического контротражателя, изображенного на рис. 4. Угловые размеры применяемого контротражателя определяются с одной стороны лучом, выходящим из светового центра лампы к краю отражателя (через точку А), а с другой стороны лучом соответствующим апертурному углу проекционного объектива и проходящему через второй фокус отражателя. Радиус сферы контротражателя выбирается из конструктивных соображений.

Приведенная методика расчёта эллипсоидного отражателя обеспечивает рациональное использование светового потока источника света путём согласования параметров отражателя с параметрами лампы, размерами кадрового окна и другими элементами осветительно – проекционной системы.