

В.И. КОХАНОВСКИЙ, канд. техн. наук, НПО „Свет шахтера”,
О.В. КОХАНОВСКАЯ, НТУ „ХПИ”

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ШАХТНОГО СВЕТИЛЬНИКА

У статті наведені результати оптимізації оптичної системи головного шахтового світильника, у якому застосовуються над'яскраві світлодіоди

The results of optimization of the optical system of head mine lamp with using of extra-bright light-emitting diodes are presented in the article.

1. Состояние проблемы. С появлением мощных сверхярких светодиодов открылись новые возможности по совершенствованию светильников, в частности, головных светильников шахтного назначения.

Светодиод – это полупроводниковый прибор, действие которого основано на явлении испускания фотонов, возникающем при рекомбинации носителей разноименных зарядов в области контакта полупроводниковых материалов (так называемый p-n переход). Основу светодиода (Light Emitting Diode или LED) составляет искусственный полупроводниковый кристалл размером 0,3×0,3 мм, в котором реализован p-n переход. Цвет свечения зависит от материала кристалла. Кристалл помещают в отражатель, который также является и катодом (-). К кристаллу „приваривают” золотую нить – анод (+). Затем всю конструкцию заливают прозрачным компаундом, которому придают определенную форму (полусферическую, коническую и др.), назовем ее колбой. От нее зависит угол излучения света, испускаемого кристаллом. Если верх колбы плоский (рис. 1), свет выходит широким лучом (угол составляет 120-160°). Если верх выпуклый, получается линза, фокусирующая луч в узкий пучок (угол 8-60°).



Рис. 1

Массовым видом продукции светодиоды стали в последние 2-3 года, выпускаемой производителями Европы, Юго-Восточной Азии, США и России. Выпускаются светодиоды разных цветов: красного, желтого, синего, синезеленого и белого, причем белый бывает нескольких оттенков (холодного, теплого, „солнечного” и т.д.). Наибольшее распространение получили све-

одиоды в виде колбы диаметром 3мм или 5мм мощностью 0,2-0,3 Вт. Многие фирмы в настоящее время сообщают об изготовлении опытных образцов мощных светодиодов с фантастическими характеристиками (например, компания NeoPac сообщила об изготовлении 80-ваттного светодиодного модуля NeoBulbCombo со световым потоком свыше 2000 лм), но до массового выпуска они еще не дошли.

Среди мощных светодиодов наибольшее применение получили светодиоды мощностью 1 и 3 Вт со световым потоком от 30 до 120 лм. Производством этих светодиодов занимается много фирм. Среди них ведущими являются: Lumileds Lighting, Osram Opto Semiconductors, UPEC Electronics Corporation. Сравнительные характеристики выпускаемых ими светодиодов приведены в [1]. Именно эти светодиоды с белым цветом стали применять в головных шахтных светильниках.

В настоящее время на шахтах уже начали использовать светильники со светодиодами (табл. 1).

Таблица 1

Наименование светильника	Фирма	Страна, город
Луч - P	НПП „ХИТ”	Украина, Киев
СГО-1	Завод „Парус”	Украина, Севастополь
НГР 06-4-003-0Ю5-3	НПО „Развитие”, Прокопьевский завод	Россия, Прокопьевск
СГГ-10	ЭКОТОН-4	Россия, Великий Новгород
СГГ-9СМ	— ” —	Россия, Великий Новгород
ЭКОТОН-16	— ” —	— ” —
ФСВ-1	Транском	— ” —
ЭКОТОН	— ” —	— ” —
ELM 01-P	Electrometal	Польша
Smartlight-05	— ” —	— ” —
LN-10	FASER	— ” —
KL5M	WISDOM	Китай

Применение светодиодов в светильниках обусловлено двумя факторами:

- 1) ресурс работы светодиода составляет от 50000 до 100000 часов;
- 2) для энергопотребления светодиода мощностью 1 Вт достаточно использовать батарею емкостью 3,5 Ач, которая обеспечит непрерывную работу светильника в течение не менее 10 часов.

Таким образом, светодиод не нужно менять в течение 10 лет работы светильника. Поскольку шахтный светильник, как правило, столько лет не эксплуатируется, то одного светодиода достаточно на весь жизненный срок светильника.

2. Постановка задачи

- 1) В соответствии с ГОСТ P52066-2003 [2,3] освещенность от основного источника света на участке оценки должна быть не ниже следующих значений:

$$E_{\text{макс}}=1500 \text{ лк}, E_{\text{ср}}= 750 \text{ лк}, E_{\text{мин}}=150 \text{ лк},$$

где $E_{\text{макс}}$ – наибольшее измеренное значение освещенности в пределах участка оценки; $E_{\text{ср}}$ – среднее значение освещенности участка оценки; $E_{\text{мин}}$ – наименьшее измеренное значение освещенности в пределах участка оценки.

Участок оценки – это окружность диаметром (100 ± 2) мм на плоскости, параллельной защитному светопропускающему элементу (защитному стеклу) фары, расположенная на расстоянии (1000 ± 5) мм от этой плоскости с центром в точке максимальной освещенности.

2) Кроме того, сила света от основного источника света на участке цепи должна быть не менее 1 кд в телесном угле 120° .

3) Продолжительность непрерывной работы головного светильника должна быть не менее 10 часов, в течение которых минимальная освещенность от основного источника света удовлетворяет п.1.

4) И последнее требование стандарта: основной источник света должен быть сфокусирован или должен быть способен к фокусировке для исключения искажения оптического изображения.

5) В стандартах нет требований к спектральному составу света. Это объясняется тем, что светодиоды получили широкое применение только в последние три года, а стандарты были сформулированы для ламп с нитью накала, к спектру излучения которых пользователи привыкли и он достаточно близок к спектру естественного света. В то же время вопрос этот весьма актуален, т.к. шахтеры будут работать при этом освещении в течение 10-12 часов непрерывно. Остановимся на этом вопросе более подробно.

Одна и та же мощность излучения в различных интервалах длин волн вызывает совершенно различные зрительные ощущения яркости источника. Если длины волн лежат вне видимой части спектра, то источник остается невидимым независимо от его мощности. Наиболее ярким при фиксированной мощности он представляется при излучении на длине волны 555 нм. Если ставится вопрос об освещении предмета, то нельзя ограничиваться только обсуждением энергетической стороны дела. Надо принять во внимание спектральный состав излучения источников света и связь истинной мощности излучения в различных интервалах длин волн с субъективным зрительным ощущением мощности.

Световой поток оценивается по зрительному ощущению мощности излучения в люменах, а спектральная мощность выражается в ваттах. Спектральные световые эффекты зависят от длины волны λ . Они равны нулю для длины волн вне видимой части спектра. Ее значение в видимом диапазоне несущественно изменяется для различных индивидуумов. Обозначим через $V(\lambda)$ спектральную мощность светового потока. В результате измерений, проведенных с привлечением большого количества людей с нормальным зрением, получена некоторая среднестатистическая кривая $V(\lambda)$, которая принята в качестве стандартной. Для длины волны 555 нм $V(\lambda)$ достигает максимального значения. Вместо $V(\lambda)$ удобно пользоваться безразмерной величи-

ной, называемой спектральной световой эффективностью и равной $K(\lambda) = V(\lambda)/V(555\text{нм})$ (рис. 2 [4]).

Исходя из вышесказанного о спектральном составе излучаемого света, можно сделать вывод, что максимальное значение спектральной кривой светодиода должно быть максимально приближено к длине волны 555 нм. В большинстве же светодиодов это максимальное значение равно 440 нм.

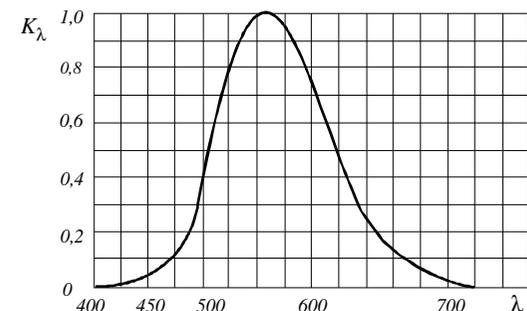


Рис. 2

Таким образом, оптическая система светильника, с одной стороны, должна формировать узконаправленный луч, который обеспечит на участке оценки освещенность со значениями $E_{\text{макс}}$, $E_{\text{ср}}$, $E_{\text{мин}}$, с максимальным значением кривой спектра в области длины волны 555 нм. С другой стороны, эта система должна обеспечить достаточно хорошее периферийное освещение – не менее 1 кд в телесном угле 120° .

Из недостатков светодиодов мы упомянули только о спектре излучаемого света. Еще один существенный недостаток применения светодиодов – необходимость обеспечения адекватного отвода тепла от кристалла светодиода. Высокая рабочая температура р-п-перехода со временем приводит к деградации световых характеристик светодиодной лампы: снижается светоотдача кристалла, изменяются характеристики люминофора, у приборов ряда производителей дополнительно падает показатель светопропускания оптической системы. В результате уменьшается долговечность светодиодной лампы – один из основных показателей, выгодно отличающий ее от традиционных источников света. Таким образом, при разработке оптической системы светодиодного светильника необходимо обеспечить требуемый тепловой режим светодиодной лампы.

Задачу поиска оптимальной оптической системы светодиодного шахтного светильника разделим на две основные задачи:

- а) обеспечение необходимых значений освещенности;
- б) обеспечение требуемого теплового режима функционирования светодиода.

Рассмотрим возможные варианты решения задачи/

а). Различные формы колб светодиодов не удовлетворяют вышеперечисленные требования стандартов 1-4. Поэтому ряд фирм (LUXEON STAR LEDS, Cree XLamp LEDs, L₂Optics и др.) разработали линзы, которые размещают над колбой светодиода с применением специальных держателей (рис. 3). Эти линзы позволяют сфокусировать луч от 60° до 3° .

Линзы, как известно, фокусируют лучи излучаемого света в точке фокуса линзы, но затем эти лучи расходятся по мере удаления от этой точки. Не-

которые линзы изготовлены в форме параболического отражателя, что позволяет сфокусировать направленный пучок лучей света аналогично параболическому отражателю.

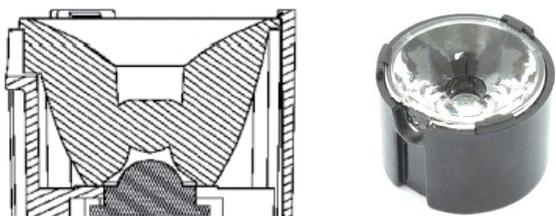


Рис. 3

Из закона сохранения энергии следует, что полный световой поток, посылаемый источником, не может быть увеличен никакими отражающими и преломляющими устройствами, по крайней мере, пока они остаются неподвижными. Такие устройства могут только перераспределять световые потоки по различным направлениям, что и осуществляется, например, светильниками. Кроме того, световой поток в пределах любого телесного угла от точечного источника, который помещен в прозрачную однородную среду, остается постоянным на любом расстоянии от источника и в какой-либо момент времени.

Следовательно, чтобы усилить световой поток от светодиода в определенном направлении, необходимо часть лучей перераспределить из других направлений в требуемое. С этой задачей справляются параболические отражатели.



Рис. 4

Фирма LUXEON STAR LEDS изготавливает отражатель из пластмассы с алюминиевым покрытием на параболической отражающей поверхности (рис. 4).

Отражатель также устанавливается над светодиодом. Светодиод позиционируется в отражателе таким образом, чтобы его кристалл расположился в фокусе отражателя. Чтобы получить мощный сфокусированный световой поток, необходимо использовать светодиод с большим углом излучения (не менее 160°). Тогда лучи от кристалла попадают на параболическую отражающую поверхность отражателя и отражаются от нее в виде потока параллельных лучей. Формируемое световое пятно соответствует максимальному диаметру отражателя.

Вышеуказанные линзы и отражатель позволяют либо получить узкий сфокусированный поток лучей, но при этом плохое периферийное освещение, либо слабый световой поток в сфокусированном луче и хорошее освещение в угле 120° .

Кроме эффективного решения вопросов освещенности, необходимо также стремиться к минимизации габаритов отражателя. Чем меньше габарит отражателя – тем меньше размеры фары и, соответственно, ее вес. Фара крепится на каске горнорабочего, поэтому уменьшение ее веса является актуальной задачей.

Таким образом, задача а) сводится к расчету параметров отражателя, который позволит получить освещенность в соответствии с пунктами 1-4 и уменьшить вес фары. Для решения задачи б) применяются различной конфигурации радиаторы, которые обеспечивают отвод тепла от светодиода.

Оптимальным, с конструктивной точки зрения, является подход в совмещении функции отражателя с функцией радиатора. Это позволяет максимально использовать ограниченное пространство фары светильника для моделирования отражателя.

3. Метод решения. На рис. 5 схематически представлено сечение параболоида отражателя со светодиодом, который расположен в фокусе F параболы $y = x^2 / 4F$.

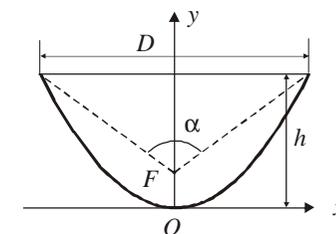


Рис. 5

Нам необходимо определить оптимальные значения двух параметров параболы F и α , которые позволяют выполнить условия 1-4. Здесь F – фокус, α – угол сектора лучей светодиода, которые не отражаются от параболоида.

Начнем с параметра α . От значения этого угла зависит периферийное освещение. Согласно условию 2) в секторе 120° сила света должна быть не менее 1 кд. Предположим $\alpha < 120^\circ$ (рис. 6).

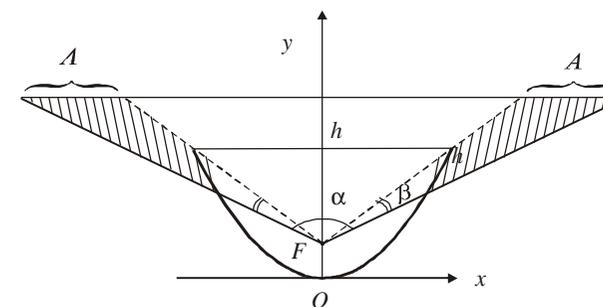


Рис. 6

Тогда в заштрихованных зонах секторов β не будет прямых лучей от светодиода. Соответственно в кольце A на плоскости, удаленной на 1 м от отражателя, будет освещенность только от переотраженных лучей. Естественно, значение этой освещенности меньше 1 кд. Теперь предположим, что $\alpha > 120^\circ$ (рис. 7).

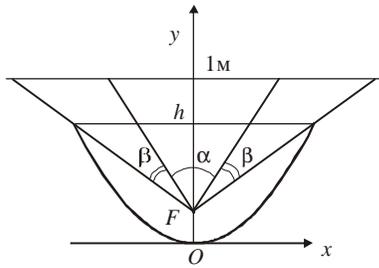


Рис. 7

В данном случае область, освещаемая прямыми лучами от светодиода, больше области, которая образуется сектором 120° . Следовательно, условие 2) будет выполнено.

Рассмотрим, что будет происходить с отражателем, если мы начнем увеличивать угол α от 120° . На рис. 8 мы видим, что увеличение угла α приводит к уменьшению отражающей

поверхности параболоида, что влечет за собой уменьшение мощности светового потока, отраженного от параболоида. Кроме того, сам светодиод своими габаритами заслоняет часть центральной области отражателя. Таким образом, нам нужно стремиться к сохранению наибольшей отражающей площади поверхности параболы. Максимальная отражающая площадь достигается при значении $\alpha = 120^\circ$.

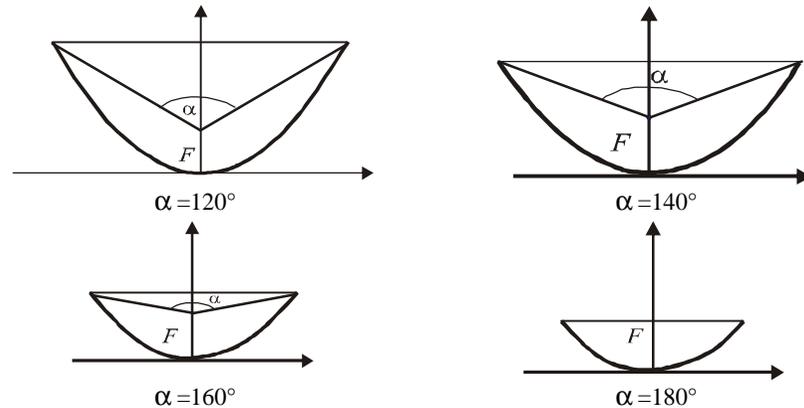


Рис. 8

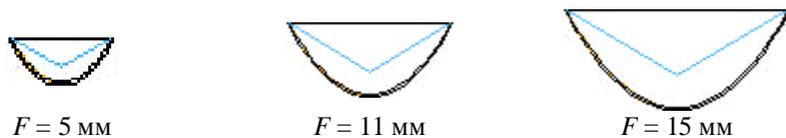


Рис. 9

Теперь попытаемся оптимизировать параметр F – фокусное расстояние. На рис. 9 представлены отражатели с тремя разными фокусами $F = 5, 11, 15$ (мм).

Из рисунков видно, что габаритные размеры отражателя (высота h , диаметр D – см. рис. 5) увеличиваются пропорционально увеличению значе-

ния фокуса. Нетрудно показать, что $h = 3F, D = 4\sqrt{3}F$ для $\alpha = 120^\circ$. В большинстве шахтных головных светильников в фарах посадочный диаметр для отражателя равен 50 мм. Тогда согласно приведенным формулам $F = 7,2$ мм. Действительно, для шахтных светильников с галогеновыми лампами применяется фокус $F = 7$ мм. Если увеличить диаметр фары ($D > 50$ мм), то соответственно увеличатся габариты фары и, как следствие, ее вес, что неприемлемо.

Таким образом, в своих поисках оптимального значения фокуса имеем ограничение сверху на область определения фокуса: $F < 7$ мм.

С другой стороны, с увеличением габаритных размеров увеличивается площадь отражающей поверхности, а, следовательно, растет мощность светового потока в центральной области излучения. Соответственно увеличивается значение освещенности на участке оценки. Заметим, что для отражателя с толщиной 1 мм и диаметром $D = 49$ мм фокус $F = 6,9$ мм.

В то же время нам нужно уменьшить габариты отражателя, чтобы минимизировать вес фары. Формализуем вышеуказанную задачу. В терминах теории оптимизации нам необходимо найти минимум функционала Q с ограничением:

$$\begin{cases} Q = \min(P_{omp} + 1/S_{omp}), \\ S_{omp} \geq S_{omp}^*, \\ F \leq 7. \end{cases} \quad (1)$$

где P_{omp} – вес отражателя; S_{omp} – площадь поверхности отражателя, включая внешнюю; S_{omp}^* – значение S_{omp} , которое обеспечивает необходимый тепловой режим функционирования светодиода.

Площадь поверхности S и объем V параболоида вращения с фокусом F определяются следующими выражениями:

$$S = \frac{56}{3}\pi F^2; V = 18\pi F^3.$$

Предположим, что толщина отражателя равна 1 мм и он изготавливается из алюминия с плотностью $0,27 \cdot 10^5$ кг/мм³. Тогда

$$S_{omp} = \frac{4}{3}\pi(28F^2 + 46F + 23); P_{omp} = \pi \cdot 0,486 \cdot 10^{-4}(3F^2 + 3F + 1).$$

На рис. 10 и 11 представлены графики поверхности и веса отражателя соответственно.

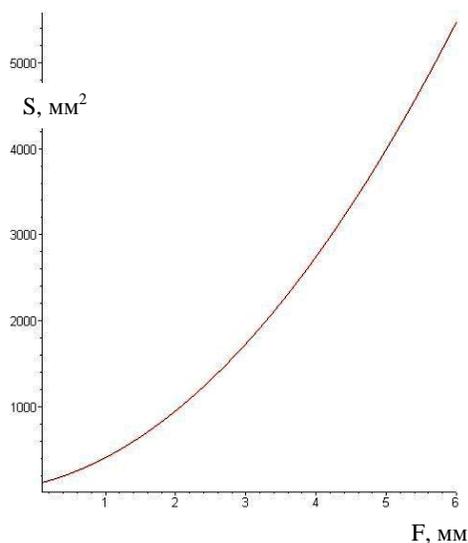


Рис. 10

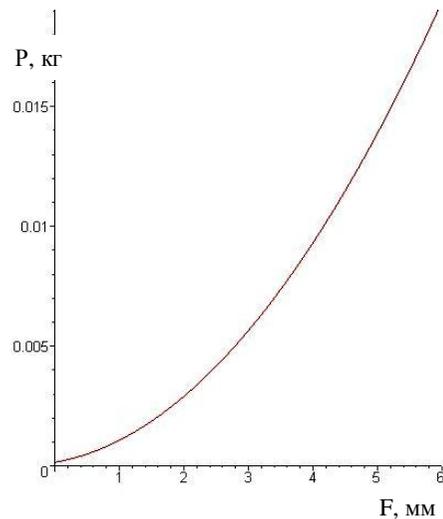


Рис. 11

Оптимизация функционала Q выполняется по параметру F – фокусу отражателя. Чтобы найти минимум Q , нам необходимо предварительно определить ограничение $S_{оп}^*$. Последовательность теплового расчета для различных светодиодных ламп подробно описана в статьях [5, 6]. Используем эти расчеты применительно к нашему конструктиву: „светодиодная лампа – отражатель – радиатор”.

По заданным значениям температуры р-п перехода T_{j_max} и окружающей среды T_{a_max} определяется максимально допустимое результирующее тепловое сопротивление р-п переход – окружающая среда:

$$R\theta_{j-a} = \frac{T_{j_max} - T_{a_max}}{P_d}, \quad (2)$$

где P_d – мощность, рассеиваемая светодиодной лампой (ее значение можно определить по формуле:

$$P_d = I_f U_f,$$

где I_f, U_f – номинальный прямой ток и прямое напряжение на светодиодной лампе, соответственно).

Тепловое сопротивление радиатора $R\theta_{h-a}$ вычисляется по формуле:

$$R\theta_{h-a} = R\theta_{j-a} - R\theta_{p-h} - R\theta_{h-f}, \quad (3)$$

где $R\theta_{j-p}$ – тепловое сопротивление между р-п переходом и теплопроводящим основанием корпуса светодиода (задается в технической документации светодиода); $R\theta_{p-h}$ – тепловое сопротивление между светодиодом и радиатором (берется из справочников или определяется экспериментально); $R\theta_{h-f}$ – тепловое сопротивление между радиатором и воздухом фары.

На рис. 12 представлена тепловая модель светодиодной лампы с радиатором. Отличительной особенностью этой схемы является наличие еще одного теплового перехода – $R\theta_{h-f}$. В соответствии с последними требованиями по безопасности работ в шахтах (вид взрывозащиты – РО, требования к оболочке – IP67) фара должна быть пыле- и водонепроницаемой. Поскольку фара герметична, то нет воздухообмена с внешней средой фары. Таким образом, теплопередача в фаре осуществляется через ее пластмассовую оболочку.

Теплопроводность пластмассы низкая, однако, как показали результаты проведенных авторами экспериментов (рис. 13), ее достаточно для обеспечения необходимого теплового режима светодиода.

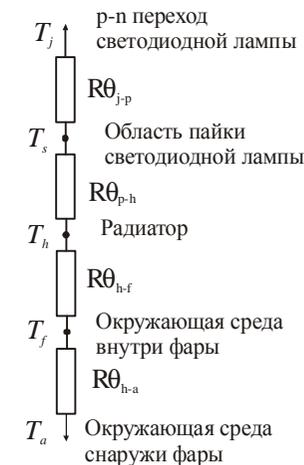


Рис. 12

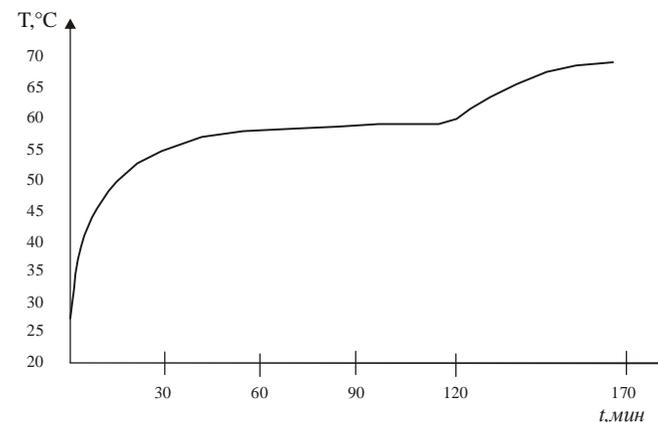


Рис. 13

Эти эксперименты были выполнены для светодиодной лампы LUXEON LXHL-PW09 (3 Вт, $I_p = 700$ мА, $U_f = 3,43$ В, цвет белый). Температура измерялась с помощью термозонда, закрепленного на радиаторе в замкнутом про-

странстве фары. Площадь поверхности радиатора 1400 мм². Радиатор изготовлен из латуни. Температура окружающей среды вокруг фары в интервале времени от 0 до 120 мин. составляла 21°C, от 120 до 170 мин – 43°C.

Как видно из рисунка, в первые 30 мин температура радиатора растет довольно быстро – до 55°C. В последующие 30 мин температура увеличивается только на 3°C – до 58°C. Затем температура стабилизируется и колеблется в интервале 58-59°C. Если увеличить температуру окружающей среды до 43°C, то температура радиатора пропорционально начнет возрастать с течением времени работы светодиодной лампы и стабилизируется в области 69°C через 50 мин. На рисунке этому интервалу соответствует время измерений: от 120 до 170 мин.

Таким образом, можно сделать вывод, что возрастание температуры окружающей среды светильника приводит к пропорциональному росту температуры внутри фары.

Расчеты тепловых сопротивлений выполним для светодиода LUXEON LXHL-BW02 (1 Вт, $I_p = 350$ mA, $U_f = 3,43$ В, цвет белый). Для других светодиодов расчеты выполняются аналогично.

Итак, согласно формуле (2)

$$R\theta_{j-a} = \frac{125 - 30}{0,35 \cdot 3,43} = 79,2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт},$$

из технических данных на светодиодную лампу: $R\theta_{j-p} = 17^\circ\text{C/Вт}$, из данных графика на рис. 13:

$$R\theta_{p-h} + R\theta_{h-f} = \frac{58 - 21}{0,7 \cdot 3,43} = 15,4 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}.$$

Тогда $R\theta_{h-a} = 79,2 - 17 - 15,4 = 46,8 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$.

На рис. 14 [6] представлены графики экспериментальных данных теплового сопротивления для

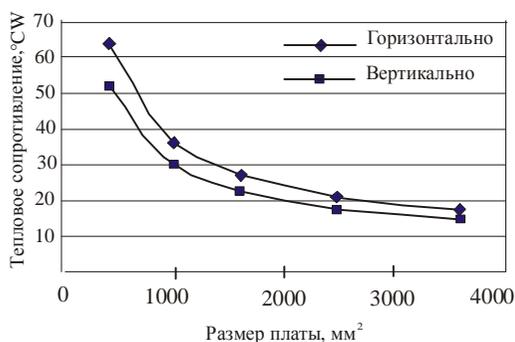


Рис. 14

вого сопротивления для платы из фольгированного алюминия толщиной 2 мм, на которую установлена светодиодная лампа (вертикальное и горизонтальное положение платы в устройстве). Значение $R\theta_{h-a} = 46,8 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$ соответствует размеру платы площадью 800 мм². Тогда ее площадь (с учетом всех сторон) равна 1840 мм². Таким образом,

$$S_{omp}^* = 1840 \text{ мм}^2.$$

Минимум функционала (1) можно определить одним из стандартных методов оптимизации. При помощи программы Maple 10 получен минимум функционала, который равен 0,006586814364 и достигается он при значении фокуса $F = 3,120835555$ мм. Тогда вес отражателя-радиатора $P_{omp} = 6$ г, а площадь его поверхности $S_{omp} = 1840 \text{ мм}^2$.

Теперь вычислим освещенность участка оценки в соответствии с п.1 постановки задачи. Измерения освещенности осуществляются, как правило, люксометром, например, Ю116. Фоточувствительный элемент люксометра имеет определенную светочувствительную площадь. Чем меньше эта площадь, тем точнее значение освещенности в измеряемой области участка оценки. Для вышеуказанного люксометра эта площадь является окружностью с диаметром 60 мм. Приведем расчеты освещенности для данного люксометра. Для другого люксометра вычисления будут аналогичными.

Определим освещенность в следующих точках: $E_v(0^\circ)$ – в центре участка оценки; $E_v(25\text{мм})$ – на расстоянии 25 мм от центра участка оценки в плоскости этого участка; $E_v(50\text{мм})$ – на расстоянии 50 мм от центра участка оценки в плоскости этого участка; $E_v(30^\circ)$, $E_v(60^\circ)$ – аналогично $E_v(0^\circ)$, но под углом 30° и 60° соответственно на расстоянии 1 м.

Освещенность вычисляется по формуле [7]:

$$E_v = \left(\int_{360}^{830} K(\lambda) dI_\lambda d\lambda \right) \cos \theta / r^2, \quad (4)$$

где $K(\lambda)$ – функция, представленная на рис. 2; I_λ – функция волнового распределения светодиода (рис. 15 [8]), которая задается в технических данных каждого светодиода; θ – угол с осью, которая перпендикулярна поверхности излучения светодиода и проходит через центр участка оценки, и прямой, соединяющей точку измерения освещенности и точку излучения; r – расстояние от отражателя до точки измерения освещенности.

Формула (4) справедлива для ламбертовских поверхностей, когда излучение не зависит от направления. В нашем

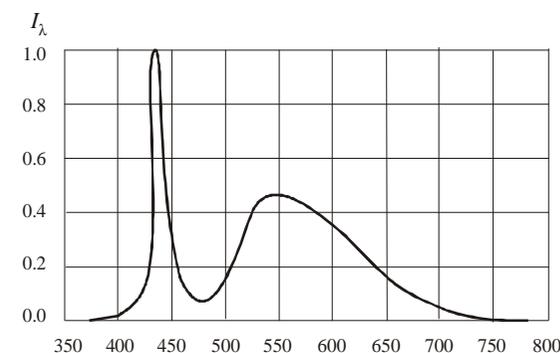


Рис. 15

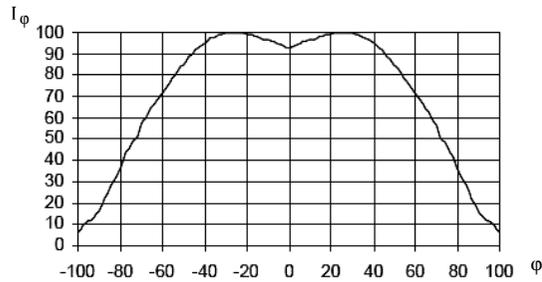


Рис. 16

$$E_v = \left(\int_{360}^{830} K(\lambda) dI_\lambda d\lambda \right) I_\phi(\theta) / r^2. \quad (5)$$

В табл. 2 представлены результаты расчетов освещенности E_v в лк для вышеуказанных пяти точек с использованием различных светодиодов, расположенных в фокусе отражателя-радиатора мм: $F = 3,1$ мм; $D = 21,5$ мм; $H = 9,3$ мм, $\alpha = 120^\circ$.

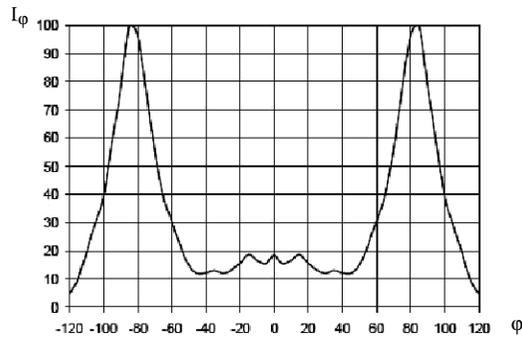


Рис. 17

случае излучение кристалла светодиода описывается диаграммой направленности. На рис. 16 [8] представлена диаграмма типа Lambertian, а на рис. 17 [8] – типа Side Emitting (функция I_ϕ) для светодиодной лампы LUXEON LXHL-BW02. Тогда формула (4) примет вид:

В табл. 3 приведены аналогичные расчеты для отражателя-радиатора, мм: $F=3,1$, $D=40,5$, $H=33$, $\alpha=68^\circ$.

Расчеты выполнялись по формуле (5). В вычислении $E_v(0^\circ)$ кроме освещенности (E_v^1) от направленного луча, непосредственно от кристалла к точке

измерения, добавлена освещенность (E_v^2) и от лучей, которые отразились от параболической поверхности отражателя-радиатора и попали в точку измерения, т.е.

$$E_v(0^\circ) = (E_v^1 + E_v^2) K_p. \quad (6)$$

Как уже было отмечено выше, теоретически энергия луча не изменяется после отражения. Однако из-за погрешностей обработки поверхности отражателя-радиатора происходит частичное рассеивание энергии луча. Чем выше чистота обработки поверхности, тем меньшее рассеивание. Поэтому в расчетах значение освещенности, полученное по формуле (5), умножалось на коэффици-

ент рассеивания $K_p = 0,8$, который зависит от чистоты обработки отражателя.

Таблица 2

$E_v(0^\circ)$ $\theta = 0^\circ$	$E_v(25 \text{ мм})$ $\theta = 0,6^\circ$	$E_v(50 \text{ мм})$ $\theta = 2,9^\circ$	$E_v(30^\circ)$ $\theta = 30^\circ$	$E_v(60^\circ)$ $\theta = 60^\circ$
LUXEON LXHL-BW02 Lambertian, 350 mA, 25 lm				
379	284	0,44	0,44	0,35
LUXEON LXHL-BW02 Side Emitting, 350 mA, 22 lm				
690	517	0,07	0,05	0,12
Cree XLamp 7090 LEDs Lambertian, 350 mA, 52 lm				
788	590	0,92	0,92	0,74
LUXEON LXHL-LW3C Lambertian, 700 mA, 65 lm				
984	738	1,15	1,15	0,92
LUXEON LXHL-LW3C Side Emitting, 700 mA, 65 lm				
2038	1363	0,18	0,12	0,21
Cree XLamp 3 7090 LEDs Lambertian, 700 mA, 76 lm				
1151	863	1,34	1,34	1,09

Таблица 3

$E_v(0^\circ)$ $\theta = 0^\circ$	$E_v(25 \text{ мм})$ $\theta = 0,6^\circ$	$E_v(50 \text{ мм})$ $\theta = 2,9^\circ$	$E_v(30^\circ)$ $\theta = 30^\circ$	$E_v(60^\circ)$ $\theta = 60^\circ$
LUXEON LXHL-BW02 Lambertian, 350 mA, 25 lm				
708	400	0,44	0,37	0
LUXEON LXHL-BW02 Side Emitting, 350 mA, 22 lm				
755	438	0,07	0,04	0
Cree XLamp 7090 LEDs Lambertian, 350 mA, 52 lm				
1472	818	0,92	0,75	0
LUXEON LXHL-LW3C Lambertian, 700 mA, 65 lm				
1840	1041	1,15	1,1	0
LUXEON LXHL-LW3C Side Emitting, 700 mA, 65 lm				
1991	1155	0,18	0,94	0
Cree XLamp 3 7090 LEDs Lambertian, 700 mA, 76 lm				
2051	1216	1,34	0,1	1

Как видно из данных табл. 2, 3, одноваттные светодиоды (350 mA) не по-

зволяют получить необходимую (в соответствии с ГОСТ) освещенность на участке оценки. Из представленных трехваттных светодиодов (700 mA) только светодиод LUXEON LXHL-LW3C с диаграммой направленности Side Emitting обеспечивает необходимую освещенность на участке оценки. Однако в угле 120° у этого светодиода сила света ниже 1 кд (см. п. 2). Для решения этой проблемы необходимо применить диаграмму направленности светового потока типа Side Emitting, у которой в центральной части диаграммы для углов от -60° до $+60^\circ$ световой поток составляет не менее 0.5 световой энергии светодиода.

Применение отражателя-радиатора с углом $\alpha < 120^\circ$, а именно: $\alpha = 68^\circ$ (табл. 3), и с тем же фокусом увеличивает освещенность на участке оценки и в угле 68° примерно в два раза, но за пределами этого угла освещенность равна 0.

4. Выводы. Авторами получены оптимальные параметры оптической системы головного шахтного светодиодного светильника, а именно:

- 1) фокусное расстояние параболического отражателя $F = 3,1$ мм;
- 2) максимальный угол выхода прямых лучей от светодиода из отражателя $\alpha = 120^\circ$;
- 3) площадь поверхности полученного отражателя обеспечивает оптимальный тепловой режим работы светодиода;
- 4) для светодиода LUXEON LXHL-LW3C с диаграммой направленности Side Emitting значения освещенности на участке оценки (см. табл. 2) удовлетворяют требованиям ГОСТ P52066-2003 (см. п. 1). Для получения силы света в 1 кд в угле 120° необходимо применить диаграмму направленности Side Emitting, у которой для $-60^\circ \leq \alpha \leq +60^\circ$ световой поток составляет не менее 0.5 световой энергии светодиода;
- 5) размещение кристалла светодиода в фокус параболического отражателя обеспечивает хорошую фокусировку лампы;
- 6) для применения трехваттного светодиода с использованием батареи Li-In необходима емкость батареи 9 А·ч, которая обеспечит непрерывное свечение лампы не менее 10 ч с учетом 20% падения емкости батареи в течение ее жизненного срока работы;
- 7) спектр излучения (5500К) светодиодной лампы LUXEON LXHL-LW3C White, для которого выполнены расчеты освещенности, близок к спектру „теплого” солнечного света.

Список литературы: 1. Бурняшев А. Современные мощные светодиоды и их оптика // Современная электроника. – 2006. - № 1. – С.24-27. 2. ГОСТ 24471 „Приборы световые рудничные нормальные. Общие технические условия”. – 24 с. 3. ГОСТ P52066-2003 „Светильники головные рудничные взрывозащищенные. Часть 2. Эксплуатационные требования”. – 2003. – 8 с. 4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980. – 752 с. 5. Полищук А. Обеспечение теплового режима мощных светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С.52-57. 6. Винокуров А. Тепловые режимы мощных светодиодов DORADO // Компоненты и технологии. – 2006. – №5. – С.68-71. 7. Матвеев А.Н. Оптика. – М.: Высшая школа, 1985. – 351 с. 8. <http://www.luxeon.com>.

Поступила в редколлегию 20.04.2007

А.Ю. ЛАРИН, А.В. МАРТЫНЕНКО, НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИНЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В УСТРОЙСТВЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ПОМОЩИ ПАКЕТА ANSYS/EMAG

Запропоновано нову методику розробки систем електродинамічного захисту. Вона полягає в тому, що за допомогою узагальненого параметричного підходу проводиться моделювання електромагнітних явищ, виникаючих у процесі взаємодії бійка та елементів захисту, за допомогою сучасних САПР. Отримані чисельні результати порівняні з експериментальними дослідженнями, проведеними раніше. Зроблено висновки.

The new method of the electrodynamic defence systems development is offered. Generalized parametric approach for modeling of the electromagnetic phenomena in modern CAD/CAE systems is used. Numerical results are done and compared with the experimental researches taken earlier. Conclusions are done.

Введение. Повышение бронестойкости является одной из наиболее важных задач как при создании, так и при модернизации боевых машин. При этом конструкторы вынуждены удовлетворять еще целому набору ограничений, из которых наиболее серьезным является минимизация веса конструкции. Поэтому наряду с изготовлением корпуса из «легких» металлов и сплавов широко применяются дополнительные защитные системы. Среди дополнительных защитных систем одной из самых перспективных является электродинамическая защита (ЭДЗ), откуда следует, что исследование возможности ее применения является актуальной задачей.

1. Состояние вопроса. В настоящее время достаточно тщательно исследовано и теоретически обосновано взаимодействие элементов ЭДЗ с кумулятивными боеприпасами [1, 2, 3]. Имеющиеся данные относительно снижения бронепробивной способности этих средств поражения свидетельствуют о том, что ЭДЗ по своим возможностям не уступает системам активной и динамической защиты. С ее помощью представляется возможным разрешить проблему дальнейшего повышения уровня защиты бронетехники без значительного увеличения веса.

В соответствии с приведенными в работах [1, 2] зависимостями, эффективность электродинамического воздействия (ЭДВ) на кумулятивную струю (КС) определяется следующими электротехническими параметрами установки ЭДЗ: начальным напряжением U_0 ; емкостью C конденсаторной батареи; индуктивностью L_S и активным сопротивлением R_S разрядного контура.

К числу конструктивных параметров элемента ЭДЗ, определяющих эффективность воздействия на КС, относятся (рис. 1): ширина δ межэлектродного промежутка; удаление h электродной системы от кумулятивного заряда.

Благодаря особенностям КС, а именно: ее высокой электропроводности и наличием градиентности в движении частей струи, т.е. эффекту растягивания