

В.И. КОХАНОВСКИЙ, канд. техн. наук, начальник КБ НПО „Свет шахтера”,
О.В. КОХАНОВСКАЯ, науч. сотр. каф. ТММиСАПР, НТУ „ХПИ”

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ГОЛОВНОГО ШАХТНОГО СВЕТИЛЬНИКА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Статья посвящена підвищенню ефективності параметрів світлодіодового головного шахтового світильника на основі використання оригінальної оптичної системи.

The paper is devoted the increase of efficiency of f LED head mine lamp's parameters on the basis of the use of original optical system.

1. Состояние вопроса и постановка задачи. Стремительное развитие технологий изготовления аккумуляторов нового поколения и светодиодов предоставляет разработчикам шахтных взрывобезопасных головных светильников новые возможности в совершенствовании их конструкций и улучшению функциональных возможностей.

В течение последних 50 лет шахтные головные светильники функционально не меняли свою конструкцию. Светильники различных фирм-разработчиков состояли из трех основных частей: 1) блока батареи аккумуляторов; 2) фары с оптической системой; 3) шнура, соединяющего блок батареи с фарой. Постоянное совершенствование аккумуляторов и оптической системы позволили сократить вес светильника от 2,5 до 0,35 кг. Дальнейшее уменьшение веса блока батареи логично приводит нас к конструктиву, в кото-

ром исключается шнур, а блок батареи объединяется с фарой. Таким образом, весь светильник можно разместить на каске горнорабочего (рис. 1), т.к. вес такого светильника становится соизмеримым с весом фары светильника традиционной конструкции.

В последние 4 года ряд фирм начали серийный выпуск бытовых светодиодных светильников-моноблоков, в которых батарея размещена в фаре [1, 2]. Однако эти светильники не удовлетворяют требованиям,

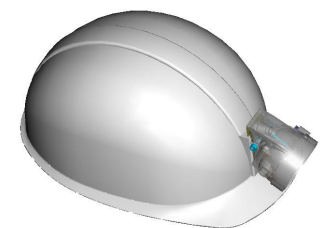


Рис. 1. Размещение светильника-моноблока на каске шахтера

которые предъявляются к шахтным светильникам. Одними из основных требований являются следующие:

1) освещенность от основного источника света на участке оценки должна быть не ниже следующих значений:

$$E_{\max}=1500 \text{ лк}, E_{\text{ср}}=750 \text{ лк}, E_{\min}=150 \text{ лк},$$

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



Рис. 2. Светильник-моноблок фирмы Golden Future Electronic Ltd

2) сила света от основного источника света на участке оценки должна быть не менее 1 кд в телесном угле 120° [3, 4]. Участок оценки – это окружность диаметром 100 ± 2 мм;

3) продолжительность непрерывного свечения основного источника света светильника должна быть не менее 10 часов, в течение которых минимальная освещенность удовлетворяет п.1 [3, 4].

Остальные требования к шахтным светильникам приведены в работе [5] авторов статьи и в

стандартах [3, 4].

В России первый и пока единственный шахтный светильник-моноблок был предложен в 2006 г. ПО „Электроточприбор” (светильник СГТ-10) [6]. На самом деле этот светильник разработан и изготовлен китайской фирмой Golden Future Electronic Ltd, модель KL4.5LM [1] (рис. 2). Российская фирма только сертифицировала этот светильник в России для продажи. Для светильника приведены следующие характеристики: вес 215 г, батарея Li-Ion, продолжительность непрерывного свечения 15 часов, освещенность на расстоянии 1 м в начале – 2000лк, через 11 часов непрерывной работы – 1200лк, количество циклов заряда/разряда – 1000, основной светодиод – 1W.



Рис. 3. Австралийские шахтные светильники

Австралийская фирма Kinyun Australia разработала и производит три типа шахтных светильников-моноблоков (рис. 3). В табл. 1 приведены их технические характеристики [1].

Однако заявленные характеристики этих светильников вызывают сомнения, т.к. теоретически с емкостью батареи 2,8 Ah и одноваттным основным светодиодом получить освещенность, указанную в требовании 1), и сохранять ее в течении 10 часов непрерывной работы не представляется возможным. Кроме того, в течение года непрерывной эксплуатации КПД светильника падает на 30% вследствие постепенного уменьшения емкости батареи (минимум на 20%), па-

дения напряжения в блоке искрозащиты светильника, потери световой энергии в оптической системе (до 10%).

Таблица 1

Технические характеристики светильников-моноблоков фирмы Kinyun Australia

	KL2.4LM(A)	KL2LM(A)	KL2LM(B)
Время работы	≥14 часов		
Время заряда	6 часов		
Ток	≤180 мА	≤160 мА	
Батарея	3,7 В, 2,4 Ah	3,7 В, 2 Ah	
Время жизни батареи	Обычно 2 года, 80% мощности после 500 полных циклов заряда		
Время жизни светодиода	≥10 000 часов		
Вес	160 г	130 г	115 г
Гарантия	1 год		
IS-сертификат	IECE ia I IECEEx ia IIC T4	N/A	

Таким образом, задача создания шахтного светильника-моноблока (далее – моноблока), который отвечает требованиям 1) – 3) и другим украинским, российским и европейским стандартам, предъявляемым к шахтным светильникам, остается актуальной.

2. Вес и габариты моноблока. Эффективная работа моноблока зависит от оптимального взаимодействия батареи аккумуляторов (далее – батареи) и светодиодной оптической системы. Размеры и вес этих основных узлов моноблока определяют соответственно габариты и вес моноблока в целом. Фара традиционного шахтного светильника весит от 200 до 250 г, а габариты находятся в пределах, мм: Н=76, D=68. Таким образом, в определении батареи моноблока нам придется исходить из уже заданных ограничений на габариты моноблока и, соответственно, на габариты батареи.

3. Определение параметров батарей моноблока. История развития индустрии батарей насчитывает уже более 100 лет. Практически все созданные типы батарей применялись и применяются в шахтных светильниках. В табл. 2 приведены краткая история развития, основные данные и сравнительные характеристики батарей, которые используются сегодня в шахтных светильниках. Одни из них (Ni-Cd) постепенно снимают с производства, а другие – Li-Pol – делают первые шаги на пути к широкому внедрению в шахтном оборудовании.

Основными параметрами батарей являются: емкость (в Ah), продолжительность жизненного цикла (количество циклов заряда/разряда), выходное напряжение и габариты. Определим емкость батареи, которая необходима для энергообеспечения моноблока. В качестве основного источника света будем рассматривать 1 w белый светодиод с током 0,35 А. Возможности применения 1 w светодиода, который обеспечит выполнение требований 1) – 3), рассмот-

рены ниже.

Минимальная емкость $E_{\min}$ батареи моноблока с 1 w светодиодом вычисляется из простого уравнения:

$$E_{\min} / I_f \cdot k_1 \cdot k_2 = t_{\min}, \quad (1)$$

где I_f – постоянный ток светодиода (для 1 w светодиода $I_f=0,35$ А); k_1 – коэффициент, который соответствует падению емкости батареи в течение ее жизненного цикла (как правило, $k_1=0,8$); k_2 – коэффициент, который равен КПД моноблока в целом (в зависимости от свойств разряда батареи, падения напряжения на светодиоде и на блоке искрозащиты $0,92 \leq k_2 \leq 0,96$, положим $k_2=0,92$); $t_{\min}$ – минимальное количество часов, которое должен высветить моноблок в течение его непрерывной работы (в соответствии с требованием 3) $t_{\min}=10$).

Таблица 2

Сравнительные характеристики Ni-Cd, Ni-MH, Li-Ion, Li-Pol аккумуляторов

Ni-Cd	Вальдемар Янгер в 1899 запатентовал первый никель-кадмиевый аккумулятор (Ni-Cd). В 1932 в Англии велись бурные исследования в области введения внутрь пористого пластинчатого никелевого электрода третьих активных металлов, которые должны были обеспечить лучшее движение зарядов. Эксперименты увенчались успехом. Но только в 1947 разработчики пришли к почти современной схеме герметичных Ni-Cd аккумуляторов, в которых внутренние газы, выделяющиеся во время заряда, рекомбинировали внутри, а не выпускались наружу как в предыдущих вариантах. Батареи этого типа имеют никелевый анод и кадмиевый катод. Эти усовершенствования привели к современному герметичному Ni-Cd аккумулятору, который и используется сегодня. Свыше 50% всех аккумуляторов для переносного оборудования – Ni-Cd. Для этих аккумуляторов вредно нахождение в зарядном устройстве в течение нескольких дней, т.к. для них важен периодический полный разряд, и если он не производится, то Ni-Cd аккумуляторы постепенно теряют эффективность из-за формирования больших кристаллов на пластинах элемента (явление, называемое эффектом памяти). Аккумулятор содержит кадмий и требует специальной утилизации, поэтому в ряде скандинавских стран он уже запрещен к использованию. Из-за больших габаритов и проблем с утилизацией Ni-CD аккумулятор постепенно покидает рынок сотовых телефонов. При правильной эксплуатации Ni-Cd батареи можно перезарядить 1000 раз. Аккумулятор теряет около 10 % своей емкости в течение первых 24 часов, после чего саморазряд укладывается примерно в 10 % в месяц. Ni-Cd аккумулятор может эксплуатироваться и заряжаться при низких температурах. Батареи этого типа легко восстанавливаются после понижения емкости и длительного хранения. Аккумулятор обладает самым низким внутренним сопротивлением по сравнению с аккумуляторами других видов. Типичное значение его составляет 100 - 200 мОм в пересчете на напряжение 3.6 В. Эти аккумуляторы предназначены прежде всего для работы в приборах с высоким током потребления и там, где могут возникать пиковые нагрузки.
-------	---

Ni-MH	В конце 60-х годов 20 века ученые открыли ряд сплавов, способных связывать атомарный водород в объеме, в 1000 раз превышающем их собственный. Они получили название гидриды. Химически они представляют собой соединения таких металлов, как цинк, литий и никель. При грамотном использовании с помощью гидридов можно хранить достаточно водорода, чтобы использовать его в обратимых реакциях внутри аккумуляторов. Они имеют гидридный катод и никелевый анод. Исследования в области технологии изготовления Ni-MH аккумуляторов начались в семидесятые годы и были предприняты как попытка преодоления недостатков Ni-Cd аккумуляторов. Новые металл-гидридные соединения, достаточно устойчивые для применения в аккумуляторах, были разработаны в 1980 г. Они имеют меньшую склонность к эффекту памяти, чем Ni-Cd. Периодические циклы восстановления должны выполняться реже, предпочтительнее скорее поверхностный, чем глубокий разряд. Долговечность аккумуляторов непосредственно связана с глубиной разряда, их емкость на 30-50 % больше по сравнению со стандартными Ni-Cd аккумуляторами того же размера. Из-за меньшей токсичности Ni-MH-технология считается экологически чистой. Число циклов заряда/разряда для этих аккумуляторов примерно равно 500. Сейчас в продаже можно встретить никель-металлогидридные аккумуляторы, для которых этот показатель составляет 1000. Ni-MH аккумулятор по сравнению с Ni-Cd выделяет значительно большее количество тепла во время заряда; должен быть ограничен максимальный ток заряда и разряда и должна контролироваться температура элемента. Ni-MH аккумулятор не может заряжаться так быстро, как Ni-Cd; время заряда у него обычно вдвое больше. Саморазряд этих аккумуляторов в 1,5-2 раза выше, чем у Ni-Cd, а цена - приблизительно на 30 % выше. Рекомендуемый ток разряда для них значительно меньше, чем для Ni-Cd. Так, изготовители рекомендуют ток нагрузки от 0.2C до 0.5C (от одной пятой до половины номинальной емкости).
Li-Ion	Первые работы по литиевым аккумуляторам были осуществлены Г.Н. Льюисом (G.N. Lewis) в 1912 г. Однако, только в 1970 г. появились первые коммерческие экземпляры первичных литиевых источников тока. Попытки разработать перезаряжаемые литиевые источники тока предпринимались еще в 80-е гг., но были неудачными из-за невозможности обеспечения приемлемого уровня безопасности при обращении с ними. Килограмм лития способен хранить 3860 Ah. Для сравнения, показатель цинка 820Ah, свинца - 260Ah. В зависимости от типа анода, литиевые элементы могут создавать напряжение от полутора до 3,7 в, что выше, чем у любых других элементов. В 1991 г. фирма Sony начала коммерческое производство Li-Ion аккумуляторов и в настоящее время является их самым крупным поставщиком. По материалу отрицательного электрода Li-Ion аккумуляторы можно разделить на два основных типа: 1) с отрицательным электродом на основе кокса (фирма Sony); 2) на основе графита (большинство других изготовителей). Согласно данным Fujifilm, разработанный этой фирмой аморфный композиционный окисный материал на основе олова для отрицательного электрода способен обеспечить в 1,5 раза более высокую электрическую емкость по сравнению с аккумуляторами со стандартным углеродным электродом.

Li-Ion	Дополнительные возможные преимущества аккумуляторов с этим материалом заключаются в большей безопасности, более быстром заряде, хороших разрядных характеристиках и высокой эффективности при низкой температуре. После достижения полного заряда не требуется тонкоструйный заряд, и Li-Ion аккумулятор может оставаться в зарядном устройстве, пока не используется. Не подвержен «эффекту памяти». Срок службы такой батареи составляет около 2 лет и не зависит от количества циклов заряда-разряда. Соответственно, не нужно полностью разряжать аккумулятор для того, чтобы зарядить его. При сравнимых размерах с Ni-MH и Ni-Cd аккумуляторами Li-Ion батареи могут запастись в два раза больше энергии. Должен быть ограничен максимальный ток заряда и разряда и должна контролироваться температура элемента. Хорошо характеризуют себя при работе на больших токах, что необходимо, например, при использовании их в сотовых телефонах и портативных компьютерах. Li-Ion аккумуляторы являются наиболее дорогими из доступных сегодня на рынке. Было установлено, что в ходе заряда и разряда первых литиевых батарей на поверхности лития формируются дендриты. Прорастание дендрита до положительного электрода и возникновение короткого замыкания внутри литиевого источника тока является причиной выхода элемента из строя. При этом температура внутри аккумулятора может достигать температуры плавления лития, в результате бурного химического взаимодействия лития с электролитом происходит взрыв. В Li-Ion элементах ионы лития связаны молекулами других материалов. Наиболее популярными материалами для создания Li-Ion аккумуляторов в настоящее время являются графит и литийкобальтоксид (LiCoO_2). Сейчас применяются материалы: LiMn_2O_4, LiFePO_4. Li-Ion аккумулятор не может быть восстановлен с использованием циклов заряда – разряда в отличие от других типов аккумуляторов. Хранить эти аккумуляторы нужно в заряженном состоянии. Саморазряд у Li-Ion аккумуляторов самый незначительный (2-5% в месяц). Заряженный аккумулятор может пролежать в коробке около года.
Li-Pol	Это последняя новинка в литиевой технологии. Анод отделен от катода полимерной перегородкой, композитным материалом, таким как полиакрилонитрил, который содержит литиевую соль. В результате становится возможной упрощение конструкции элемента, поскольку любая утечка гелеобразного электролита невозможна. При одинаковой удельной плотности, Li-Pol батареи оптимальной формы могут хранить на 22% больше энергии, чем аналогичные Li-Ion. Это достигается за счет заполнения «мертвых» объемов в углах отсека, которые остались бы неиспользованными в случае применения цилиндрической батареи. Кроме этих очевидных преимуществ, Li-Pol элементы являются экологически безопасными и более легкими, за счет отсутствия внешнего металлического корпуса. Li-Pol аккумуляторы при одинаковом весе превосходят по энергоемкости Ni-Cd в 4-5 раз, Ni-MH – в 3-4 раза. Можно выделить две основные группы Li-Pol аккумуляторов – быстроразрядные и обычные. Отличаются они между собой максимальным разрядным током.

Подставив значения констант в уравнение, получим $E_{\min}=4,8 \text{ Ah}$.

Теперь необходимо подобрать такой тип батареи, который с вычисленной емкостью $E_{\min}$ позволит получить: минимальные габариты; минимальный вес; достаточно гибкую конфигурацию батареи для конструктива внутри моноблока.

Проанализируем данные по батареям в табл. 2. Следуя исторической цепочке развития батарей: Ni-Cd→Ni-MH→Li-Ion→Li-Pol, мы видим, что емкость батареи на единицу объема растет, соответственно, вес уменьшается. Характеристики Li-Pol - батарей показывают, что они являются наиболее подходящими для применения в любом моноблоке.

Литий-полимерные аккумуляторы при одинаковом весе превосходят по энергоемкости Ni-Cd в 4-5 раз, Ni-MH – в 3-4 раза. Действительно, они обладают наибольшей емкостью на единицу объема, а также наименьшим весом не только за счет большей емкости, но и вследствие применения пластмассового корпуса (либо вовсе без корпуса) вместо металлического. Применение пластмассового корпуса позволяет также сделать более гибкой технологию перехода на необходимую конфигурацию батареи.

На рис. 4 показан график потребности в аккумуляторах в настоящее время и прогноз на ближайшие годы [7]. Из графика видно, что потребность растет пропорционально времени. На рис. 5 отображен сравнительный график применения аккумуляторов разных типов (Ni-Cd, Ni-MH, Li-Ion) за прошедшее, текущее и будущее время [8]. График показывает существенный рост спроса на литиевые аккумуляторы и спад спроса на Ni-Cd и Ni-MH аккумуляторы на ближайшие 4 года.

Однако батареи нового поколения имеют существенный недостаток, разрушительный эффект которого усиливается по мере роста емкости. Требования к соблюдению режимов заряда и разряда этих батарей существенно выше в сравнении, например, с Ni-Cd батареями. Поэтому в современных шахтных светильниках блок искрозащиты выполняет не только его основную функцию – защиту от

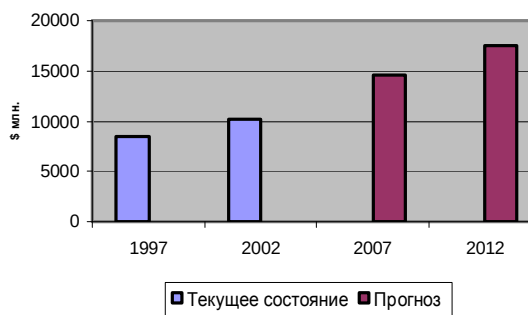


Рис. 4. Потребность в аккумуляторах в настоящее время и прогноз на ближайшие годы

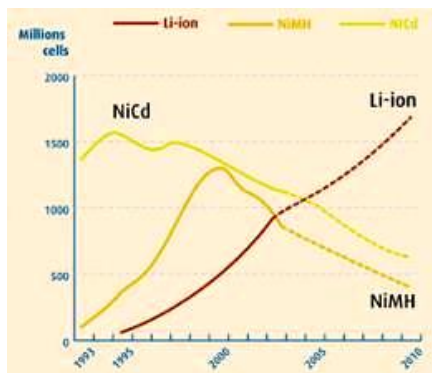


Рис. 5. Применение аккумуляторов разных типов в настоящее время и прогноз на ближайшие годы

Таблица 3

Перечень белых светодиодов 1 W

№	Обозначение	Сила света, лм	Угол, град	Габариты, мм	Температура, К	Фирма-производитель
1.	LXHL-PW01	30-45	140	14,5, 8,0, 5,37, D=8,0	4500-10000 cool white	Philips
2.	GPP-H1LBGNB-1400	40-55	140	14,5,8,0,5,37 D=8,0	3500 warm white	Armi Enterprise Co., Ltd.
3.	RSLE-080NW4G-DC31W- EV	70-130	120	14,6,8,0,5,7 D=7,5	4500-10000 cool white	Rico Electronics Co., Ltd
4.	KAD1-909 DQB9ZC-STAR	8-13	100	19,75,19,75,8,3 (со звездой)	464 нм	Kingbright
5.	Cree Xlamp 7090	52	100	7, 9, 4,3	4500-8000	CREE LED light
6.	CAD1-9090W9ZC	28-42	100	8, 8, 6,6	white	Kingbright
7.	RSE-080NW4G-DC31W-EV	27-52	130	8, 14, 5,7	4500-10000	Rico Electronics Co. Ltd
8.	1W Z-Power	54-70	120	8, 9, 9	3500-10000	Seoul SemiConductor
9.	LL-HP60HWXX	17,9-39,4	140	7, 7, 3,7	white	Lucky Light Electronics Co., Ltd
10.	LL-HP60HW6XX	17,9-39,4	140	7, 7, 3,7	White warm	Lucky Light Electronics Co., Ltd

Продолжение табл. 3

№	Обозначение	Сила света, лм	Угол, град	Габариты, мм	Температура, К	Фирма- производитель
11.	W10190	52	110	8, 14, 5,7	6300	Seoul SemiConductor
12.	N10190	35	110	8, 14, 5,7	3000	Seoul SemiConductor
13.	TW1-PG1N-1LWE	30-40	140	14,5,8,0,5,37 D=8,0	4500-10000	Welantech International Co., Ltd.
14.	X10190	32-52	110	14,6, 9,8, 4	6500	Seoul SemiConductor
15.	W42180	65-85	125	14,5, 8, 5,08	6500	Seoul SemiConductor
16.	EHP-AX08LS	27-52	130	14,6, 8, 5,7	4500-1000	Everlight Electronic Co., Ltd.
17.	PO-H1Lc/K2A/ X/W0401	15-30	60	17,3,8,6,2	2500-10000	Rico Electronics Co., Ltd.
18.	HPL-H77LW1BA	57-70	120 (25, 45, 50,100)	7,7,1	Neutral (Cool, Warm) White	High Power Lighting Co., Ltd
19.	L-SHP01WC-EL	32-52	130	14,6,8,5,7	6500	Lenoo Electronocs Co., Ltd.

возникновения искры – но и контролирует процесс заряда и разряда батареи.

Таким образом, в отношении выбора типа батареи можно сделать вывод, что для применения в моноблоке наиболее приемлемой среди существующих является Li-Pol батарея.

Однако использовать ее необходимо только при наличии электронного управления процессами заряда и разряда батареи.

Авторы также провели исследования работы шахтных головных светодиодных светильников с литиевыми аккумуляторами в различных режимах функционирования. На рис. 6 показан график постоянного заряда светильника с краткими периодами отключения от заряда. Из графика можно сделать вывод о возможности постоянного хранения светильника с литиевой батареей в положении заряда на зарядной станции или зарядном устройстве. На рис. 7 показан график измерений напряжений 4-х светильников в состоянии хранения. Первый и четвертый светильники с Li-Ion батареями 9 Ah, второй и третий – с Li-Ion батареями 5 Ah. Данные графика позволяют сделать вывод: светильники с Li-Ion батареями 9 Ah нужно заряжать через 3 недели хранения, с 5 Ah – через 2 недели.

4. Оптическая система моноблока. Оптическая система должна удовлетворять требованиям 1)-3). Как было показано авторами в работе [5], вы-

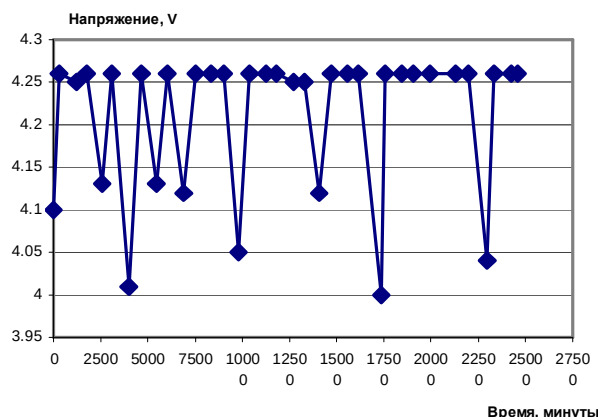


Рис. 6. График постоянного заряда светильника с краткими периодами отключения от заряда

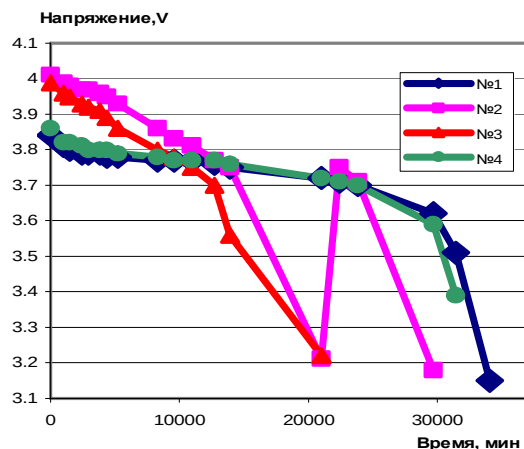


Рис. 7. График изменения напряжения у светильников с батареями разной емкости в состоянии хранения

полнить эти требования в случае применения традиционной оптической системы „параболический отражатель – радиатор” возможно только с применением: 1) трехваттного светодиода с диаграммой направленности Side Emitting; 2) Li-Ion батареи емкостью 9 Ah.

В п.3 данной статьи для моноблока определена минимальная емкость батареи $E_{\min} = 4,8 \text{ Ah}$ для случая применения в оптической системе одноваттного светодиода. За последний год развитие технологии производства светодиодов позволило существенно увеличить светоотдачу одно-ваттных светодиодов. Действительно, если раньше светоотдача одноваттного светодиода находилась в пределах 30 ÷ 50 лм, то сейчас она доходит до 85 лм при том же энергопотреблении. В табл. 3 приведены характеристики одноваттных светодиодов, с которыми авторы проводили оптические измерения. Тем не менее полученный рост светоотдачи светодиодов еще не позволяет обеспечить освещенность, указанную в требовании 1). Остается один путь к решению задачи – изменить оптическую систему.

Авторы предлагают принципиально новый подход в конструкции оптической системы светильника. Данный подход широко применяется в радиолокации. На рис. 8 показана общая схема этой системы. Принцип системы довольно простой, но эффективный. Предлагается направить весь световой поток одноваттного светодиода на фрагмент параболоида. После отражения от параболоида вся световая энергия светодиода концентрируется в пучке параллельных лучей, который находится в пределах участка оценки, указанного в требовании 1). В других оптических системах светильников часть лучей светодиода, которые не попадают на отражатель, рассеиваются вне сфокусированного пучка лучей. Эти лучи форми-

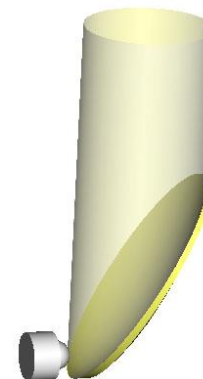


Рис. 8. Новая схема оптической системы

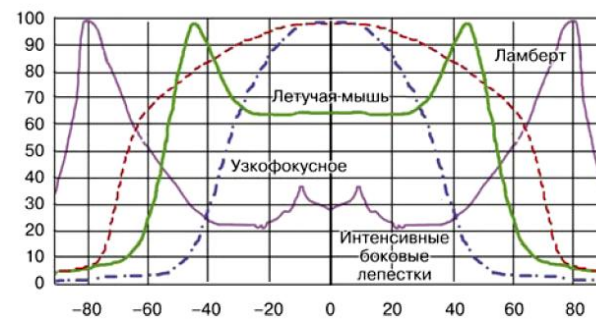


Рис. 9. Типовые диаграммы распределения светового потока

руют периферийное освещение, которое также необходимо в соответствии с требованием 2). Доля световой энергии этих лучей для светильников с диаграммой распределения Ламберт (рис. 9) составляет примерно

76% энергии светодиода [9]. В новой оптической системе эта доля световой энергии добавлена в сфокусированный световой поток. Для обеспечения периферийного освещения в угле 120° в новой системе применен второй светодиод малой мощности.

Перейдем к численным расчетам предлагаемой оптической системы. Первоначально определим параметры фрагмента отражающего параболоида, которые удовлетворяют следующей системе неравенств:

$$\begin{cases} 30 \leq H \leq 40, \\ q \geq 3.4, \\ D \leq 52, \\ 60^\circ \leq \alpha \leq 140^\circ, \\ x = y^2 / (4F), \end{cases} \quad (2)$$

где H – высота параболоида (мм), q – высота линзы светодиода (мм), D – диаметр параболоида на высоте H (мм), α – видимый угол излучения светодиода, F – фокус параболоида (мм). Границы параметров заданы из определенных ограничений на габариты моноблока и технических данных светодиодов из табл. 3.

Как известно, данные любого светодиода по светоизлучению гарантируются при условии обеспечения необходимого теплового режима его функционирования. В работе [5] было предложено совместить функции отражателя и радиатора в одной детали „отражатель – радиатор”, изготовленной из алюминия. Таким образом, чем больше площадь поверхности отражателя-радиатора, тем лучше условия работы светодиода. Исходя из этого, положим в системе (2) $H = 40$, $D = 52$. Большинство светодиодов из табл. 3 имеют

линзы, у которых $q=3.4$. Поэтому с целью уменьшения области поиска решения применим это значение. Тогда система (2) примет вид:

$$\begin{cases} H = 40, \\ q = 3.4, \\ D = 52, \\ 60^\circ \leq \alpha \leq 140^\circ, \\ x = y^2 / (4F). \end{cases} \quad (3)$$

Нетрудно показать, что при заданных значениях параметров в (3) $F = 4.2$, $\alpha = 92^\circ$.

На основе вычисленных параметров достаточно просто построить модель фрагмента параболического отражателя:

а) построим параболоид с параметрами: $F = 4.2$, $H = 40$;

б) построим коническую поверхность, вершина которого расположена в фокусе F , ось параллельна оси Y и направлена к параболоиду (рис. 10), угол у вершины $\alpha = 2^\circ$;

в) коническая поверхность вырезает на параболоиде искомый фрагмент для отражения лучей параболоида.

Площадь поверхности полученного фрагмента параболоида (с толщиной 1 мм) равна 1142 мм^2 , что составляет 13% от поверхности всего параболоида. С одной стороны, это позволяет экономить место внутри фары. С другой стороны, площади поверхности может оказаться недостаточно для получения оптимального теплового режима функционирования светодиода.

В работе [5] вычислена необходимая минимальная площадь поверхности отражателя-радиатора для одноваттного светодиода (Luxeon LXHL-BW02) – 1840 мм^2 , которая нужна для обеспечения теплового режима работы светодиода. Следовательно, необходимо увеличивать площадь поверхности полученного отражателя-радиатора до необходимого минимума.

В то же время существует еще одна техническая проблема – необходима конструкция, которая позволит позиционировать светодиод в фокусе фрагмента отражателя-радиатора, изготовленного из алюминия.

В 2007 году в серийном производстве появились пластмассы с высоким коэффициентом теплопроводности. Фирма Edison Opto выпустила в продажу отражатели-радиаторы из этих пластмасс (рис. 11) [10].



Рис. 11. Отражатель фирмы Edison Opto

Таким образом, если мы применим эти пластмассы для изготовления фрагмента отражателя-радиатора совместно с конструктивом для крепления светодиода, то это позволит решить вышеуказанные проблемы. Действительно, литье под давлением пластмасс в пресс-форме обеспечит изготовление пластмассовой детали, которая совмещает и отражатель, и крепежные элементы как для светодиода, так и для крепления всего оптического модуля в фаре. Технология пластмассового литья позволяет также увеличить площадь поверхности отражателя за счет размещения на отражателе технологических тонких ребер (см. рис. 11).

Перейдем к расчету освещенности поверхности S_1 (рис. 12), которая является участком оценки. Вышеизложенная оптическая система будет эффективной, если, в соответствии со стандартами [3,4], измерения освещенности в 10 точках поверхности S_1 будут удовлетворять требованию 1). Расчет освещенности в точке участка оценки в статье [5] выполнялся по формуле:

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

где $K(\lambda)$ – функция спектральной световой эффективности; I_λ – функция вол-

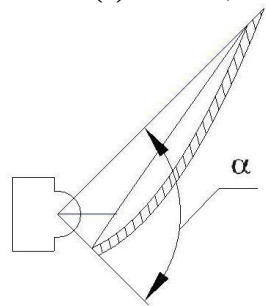
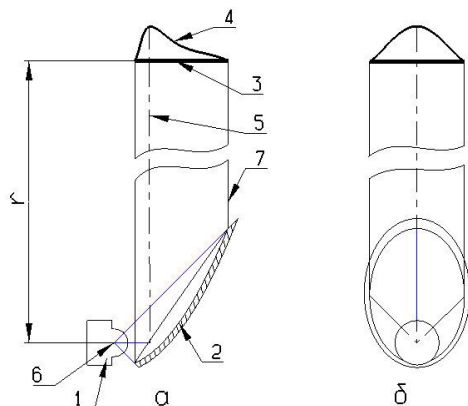


Рис. 10. Модель фрагмента параболического отражателя с светодиодом

нового распределения светодиода, которая задается в технических данных каждого светодиода; $I_\phi(\theta)$ – диаграмма направленности (типа Ламберт) излучения кристалла (см. рис. 9), θ – угол между 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.

Рис. 12. Схема оптической системы:
 a – главный вид, b – вид слева
 1 – светодиод, 2 – отражатель,
 3 – участок оценки S_1 ,
 4 – поверхность функции $I_j^*(q)$, 5 – центральная ось светового потока светодиода,
 6 – фокус светодиода,
 7 – поверхность цилиндра отраженного светового потока



Для большей наглядности заменим произведение двух подынтегральных функций в (4) на одну – $G(\lambda)$. На рис. 13 изображена функция $G(\lambda)$ для белого светодиода PO-H1Lc/K2A/X/W040 с диаграммой направленности типа Ламберт (см. табл. 3). Пусть F – световой поток (в лм) светодиода. Пределы значений F , которые позволяют выполнить требование 1), получим в нижеследующих вычислениях.

Так как в новой оптической системе весь световой поток светодиода отражается от фрагмента отражателя в виде параллельного пучка лучей, то через поверхность S_1 проходит световой поток в F лм. Практически измерение освещенности выполняется люксметром. Поскольку фотометрический элемент люксметра имеет определенные размеры (для каждого типа люкс-

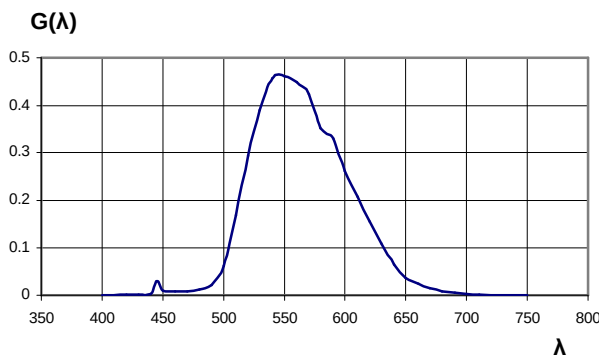


Рис.13. График функции $G(\lambda)$

метра свои), то, на самом деле, измерение освещенности осуществляется не в точке на поверхности, а на участке поверхности. Этот участок совпадает с размерами фотометрического элемента. Обозначим площадь этого элемента через S_2 . Чтобы сравнить расчетные результаты освещенности поверхности S_1 с измерениями, полученными посредством люксметра, выполним расчеты для элемента S_2 на участке оценки. В результате отражения лучей кристалла светодиода от фрагмента отражателя функция $I_\phi(\theta)$ преобразуется в функцию $I_\phi^*(\theta)$ (рис. 14) в соответствии со свойствами параболического отражателя.

После отражения от сегмента параболоида изменилась также и направленность светового потока. Теперь световые лучи распространяются не в телесном угле, а в цилиндре светового потока, состоящего из совокупности параллельных лучей. Плотность этих лучей соответствует функции I_j^* . Поскольку световой поток параллельных лучей, который помещен в прозрачную однородную среду, остается постоянным на любом расстоянии от источника излучения (отражения) и в любой момент времени, то освещенность с удалением от отражателя не будет уменьшаться. Тогда в формуле (4) для вычисления освещенности нужно исключить деление на расстояние r^2 . Действительно, измерение освещенности, в соответствии с требованием 1), выполняются именно в такой среде. Однако в реальных условиях шахты, особенно на участке добычи угля, в окружающей светильник среде постоянно перемещаются частицы угольной пыли. В этой среде сфокусированный луч света проникает всего лишь на расстояние от 2 до 10 метров.

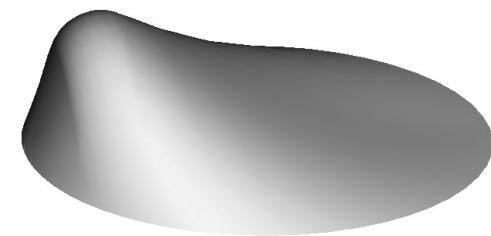


Рис. 14. Поверхность $I_\phi^*(\theta)$

Падение освещенности с течением времени работы светодиодного светильника вызвано еще тремя причинами: из-за нестабильного температурного режима работы светодиода в замкнутом пространстве фары; падение напряжения V_F светодиода должно быть меньше 3,4V (если применяются Li-Ion или Li-Pol аккумуляторы), что не всегда выполняется; вследствие постепенного падения емкости батареи как в процессе 10 часов непрерывной работы, так и в течение жизненного цикла работы батареи (от 500 до 1000 циклов).

Тогда с учетом вышеизложенного, формула (4) для вычисления значения $E_{\max}$ освещенности S_1 в области S_2 с центром в точке максимума функции I_j^* примет вид:

$$E_{\max} = \int_{360}^{830} G(\lambda) d\lambda \cdot I_{\Phi}^*(S_2) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5, \quad (5)$$

где k_1 – погрешность обработки поверхности отражателя-радиатора, положим $k_1 = 0,8$; k_2 – коэффициент, который учитывает неоднородность среды распространения луча, положим $k_2 = 0,9$; k_3 отвечает за нестабильность температурного режима функционирования светодиода, положим $k_3 = 0,8$; k_4 соответствует значению падения напряжения V_F светодиода, если $3.3V \leq V_F \leq 3.4V$, то положим $k_4 = 0,9$; k_5 зависит от падения емкости батареи в процессе эксплуатации, положим $k_5 = 0,8$.

Значения коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 введены исходя из данных экспериментов, которые проводили авторы с различными светодиодами и светильниками. Они могут уточняться в зависимости от конкретного светодиода, условий его функционирования, точности изготовления оптической системы, параметров аккумулятора и среды измерений.

Подставив значения констант в уравнение (5), получим:

$$E_{\max} = F \cdot 363,4. \quad (6)$$

Исходя из условия 1) $E_{\max} = 500$ лк, применим это значение в уравнении (6). Тогда $F = 4,1$ лм. Выполним аналогичные вычисления, получим $F = 3,2$ лм для $E_{\text{ср}} = 750$ лк и $F = 1,0$ лм для $E_{\min} = 150$ лк. Таким образом, если мы используем светодиод со световым потоком $F \geq 4$ лм в вышеописанной оптической системе, то условие 1) будет выполнено.

Полученное столь малое значение светового потока предоставляет нам возможность уменьшить необходимую емкость батареи за счет уменьшения постоянного тока на светодиоде. Существуют две возможности применения светодиодов с $F = 4$ лм:

- 1) использовать светодиоды с $F = 4$ лм и соответствующим током I_F ;
- 2) применить одноваттные светодиоды с меньшим током, чем 350 мА.

В соответствии с рис. 15 [11] зависимость светового потока от постоянного тока практически линейная. Рассмотрим, например, светодиод RO-N1Lc/K2A/ X/W040 из табл. 3. Видимый угол этого светодиода равен 60° (меньше 92°) и, следовательно, он подходит для применения в нашей оптической системе. Используем в нижеследующих вычислениях нижние значения светового потока $F = 15$ лм этого светодиода. В

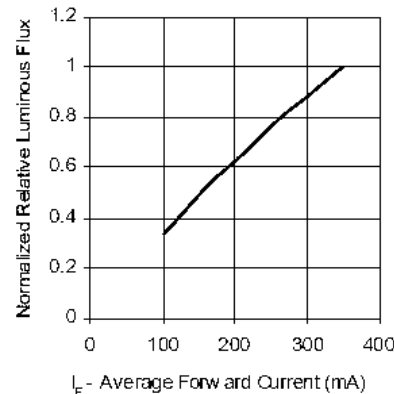


Рис. 15. Зависимость светового потока от прямого тока на светодиоде

соответствии с графиком на рис. 15 для получения $F \geq 4$ лм достаточно использовать прямой ток $I_F = 0,1$ А. Подставим это значение в уравнение (1) и получим $E_{\min} = 0,74$ Ач. Округлим это значение до $E_{\min} = 0,8$ Ач. Таким образом, для обеспечения непрерывной работы светильника с предлагаемой оптической системой в течение 10 часов (требование 3) достаточно применить батарею с емкостью 0,8 Ач и напряжением 3,7 В.

Данное решение позволяет выполнить требования 1) и 3), а для выполнения требования 2) необходима дополнительная емкость батареи. Для достижения на участке оценки силы света не менее 1 кд в телесном угле 120° (периферийное освещение) в предлагаемой оптической системе применим второй маломощный светодиод. Нужно определить параметры этого светодиода: световой поток F_2 , видимый угол α_2 , постоянный ток I_{F2} . Преобразуем силу света в канделах $I_v = 1$ кд в люмены в соответствии с формулами [9]: $\Omega = 2\pi(1 - \cos(\theta/2))$, $F_2 = I_v \Omega$, где $\theta = 120^\circ$. Получим $F_2 = 3,14$ лм. Видимый угол, естественно, должен быть не менее 120° .

Таким образом, для обеспечения периферийного освещения необходим светодиод с силой света не менее 1 кд либо со световым потоком 3,14 лм во всем угле 120° . Такие светодиоды существуют, например, светодиоды: NJSW107 (46 лм, 140° , 50 мА), NS2W095A (15 лм, 140° , 60 мА) фирмы „NICHIA Co., Ltd”. Заметим, что для их функционирования достаточно постоянного тока 50-60 мА без применения вспомогательного радиатора.

Для резервного освещения можно применить светодиоды периферийного освещения. Это уже будет третий светодиод в оптической системе светильника-моноблока.

Вычислим минимальную емкость $E_{\min}$ батареи с учетом данных, полученных для основного ($I_f = 0,1$ А) и вспомогательного ($I_f = 0,05$ А) светодиодов. Подставим необходимые данные в формулу (1). Получим $E_{\min} = 2$ Ач. Следовательно, нужно подобрать батарею с емкостью не менее 2 Ач и размерами, которые позволят ее разместить в определенных габаритах светильника-моноблока. Из известных авторам батарей существует несколько с емкостью не менее 2 Ач, например: HZTT555275 Polymer Li-Ion (3.7 В, 2.2 Ач, 42 г) фирмы „HI-CHIPCOM ELECTRONICS CO., Ltd” (с двумя аккумуляторами стандарта AA), LIR18650 Li-Ion (3.7 В, 2 Ач, 44,5 г) фирмы „Power Tech International Co., Ltd” (с одним аккумулятором стандарта AA). Более предпочтительным является вариант применения батареи с одним аккумулятором, т.к. тогда отпадают проблемы подбора аккумуляторов в батарее по емкости.

Выводы. 1. Впервые применена оригинальная оптическая система в шахтном головном светильнике. Данная система позволяет получить освещенность, которая удовлетворяет требованиям стандартов 1) – 3). В оптической системе используется в качестве основного освещения: белый светодиод с параметрами: $I_f = 0,1$ А, 3,7 В, $\alpha \leq 92^\circ$ (освещение участка оценки); белый светодиод с параметрами: $I_f = 0,05$ А, 3,7 В, $\alpha = 120^\circ$ (периферийное освещение); в качестве резервного освеще-

щения – белый светодиод с параметрами: $I_f = 0,05\text{A}$, $3,7\text{ V}$, $\alpha \leq 120^\circ$.

2. Для энергообеспечения разработанной оптической системы достаточно батареи емкостью 2 Ah. Конструктивно батарея может быть моноблоком – Li-Pol аккумулятором призматической формы, или литиевым аккумулятором цилиндрической формы, либо состоять из двух Li-Ion аккумуляторов стандарта AA.

3. Светильник с литиевыми батареями необходимо хранить в заряженном состоянии. В состоянии хранения дозаряд выполнять через 2-3 недели. Светильник можно хранить в состоянии постоянного заряда на зарядной станции.

4. Малый вес, а также габариты созданной оптической системы и литиевой батареи позволяют разместить весь светильник в фаре, вес которой не превысит 200 г.

Список литературы: 1. www.kinyun.com. 2. www.goldenfuturecn.com. 3. ГОСТ 24471 „Приборы световые рудничные нормальные. Общие технические условия”. – 24 с. 4. ГОСТ P52066-2003 „Светильники головные рудничные взрывозащищенные. Часть 2. Эксплуатационные требования”. – 2003. – 8 с. 5. Кохановский В.И., Кохановская О.В. К вопросу оптимизации параметров оптической системы светодиодного шахтного светильника // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: Машинобудування та САПР. – 2007. - №23. - С. 52-66. 6. www.rbs.ru/etp. 7. www.li-ion.net. 8. www.batteryrecycling.umicore.com. 9. Майорова О.В., Майоров Е.Е., Туркбоев Б.А. Светотехника. – СПб.: ИТМО, 2005. – 86 с. 10. www.edison-opto.com.tw. 11. www.luxeon.com.

Поступила в редколлегию 21.05.2008