

* *
*

УДК 535.015

DOI: 10.17223/00213411/64/4/157

Я.В. АНЦУПОВ¹, А.Т. ОВЧАРОВ², В.Я. УШАКОВ¹

УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЕРЕДАЧИ СВЕТА ПО СВЕТОВОДУ ГИБРИДНОГО ОСВЕТИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Представлены результаты исследования оптического тракта гибридного осветительного комплекса и сформулированы условия эффективной передачи светового излучения светодиодного модуля по протяженному полному трубчатому световоду. Модель оптического тракта с КПД передачи света более 99% построена по каскадной схеме, в которой для каждой ступени каскада целесообразно применение световодов трубчатой формы, завершающихся коллиматором. Обоснован выбор вторичной оптики светодиодного блока гибридного осветительного комплекса и определено наилучшее соотношение оптических характеристик световода и вторичной оптики светодиодного модуля. Наилучшие параметры для передачи света по протяженному полному световоду достигаются применением вторичной оптики с углом расходимости светового пучка светодиодных модулей в диапазоне 30–60°.

Ключевые слова: гибридный осветительный комплекс, светодиодный блок искусственного света, протяженный полный трубчатый световод, эффективность передачи светового излучения, вторичная оптика, коэффициент отражения, оптические потери.

Введение

Полые трубчатые световоды как оптические системы эффективны для использования в устройствах естественного и искусственного освещения. Достижения в области создания материалов с высокими значениями коэффициента зеркального отражения, близкими к 1 (0.997) в пределах всего видимого диапазона оптического излучения, открывают перспективы создания оптических систем передачи света с малыми потерями по протяженному световоду [1]. Важность исследования оптических свойств полых световодов значительно возросла в связи с индустриализацией подземного пространства, успех которой в значительной степени определяется достижениями в совершенствовании оптических систем и эффективной передаче света для целей общего освещения и для охраны здоровья человека [2].

Ревolutionary этапом в решении задач повышения энергетической эффективности осветительных систем и качества световой среды на объектах различного назначения явилась интеграция полых световодов с источником искусственного света и создание гибридных оптических комплексов (далее по тексту – комплексы) (рис. 1) [3]. Широкое внедрение комплексов в технику и технологию освещения снимает многие ограничения в использовании совмещенного освещения на объектах с высокими гигиеническими требованиями к световой среде и повышает энергетическую эффективность систем освещения [4].

Проблемы повышения эффективности комплекса предусматривают решения задач оптимизации профиля канала оптического тракта, принципиально исключающего обратные отражения как причину снижения КПД оптической системы, и уменьшения количества отражений при транспорте света по протяженному световоду за счет конструктивных решений световода и обоснованного выбора оптимальной вторичной оптики для светодиодных модулей [5].

Цель данной работы – на основании исследований оптических свойств гибридных комплексов методом компьютерного моделирования в программной среде LightTools сформулировать требования к оптическим

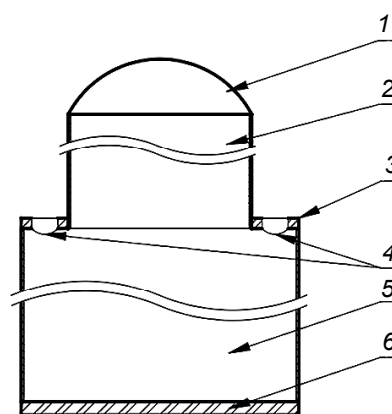


Рис. 1. Оптическая схема гибридного комплекса: 1 – светоприемный купол; 2 – световод верхней ступени оптического каскада; 3 – кольцеобразная монтажная панель со встроенными светодиодными модулями; 4 – светодиодные модули; 5 – световод нижней ступени оптического каскада; 6 – рассеиватель

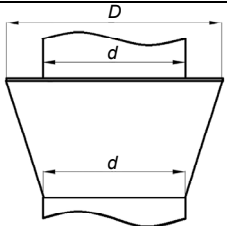
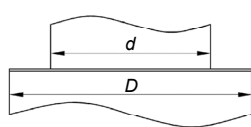
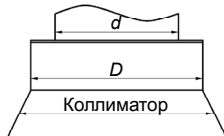
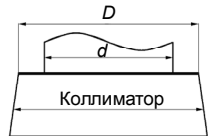
элементам, излучателям и конструкции устройства, определить граничные условия эффективности и технологические параметры комплексов, обладающих максимальным КПД передачи светового излучения по протяженному световоду.

Применяемые методы и приближения

Исследования оптических свойств гибридных комплексов выполнены методом компьютерного моделирования в программной среде LightTools, позволяющей получить данные о характере распространения светового потока в цилиндрической трубе в результате многократных зеркальных отражений от внутренней поверхности при варьировании в широких пределах геометрическими параметрами и оптическими свойствами световодов.

При изучении эффекта обратного отражения выполнены измерения на действующих системах с помощью люксметра ТКА-ПКМ, на модели комплекса труба – панель – усеченный конус («воронка») с помощью гониофотометра двухкоординатного с фотометрической головкой ГФ-6-1. Критерием сравнительной оценки вариантов оптической схемы был принят КПД передачи светового потока системой. Исходные условия для моделирования: угол расходимости светового пучка светодиодных модулей $\alpha = 120^\circ$; длина нижней ступени оптического тракта $L = 600$ мм; входной световой поток $\Phi_{\text{вх}} = 12000$ лм (суммарный световой поток четырех светодиодных модулей мощностью по 24 Вт каждый); коэффициент отражения внутренней поверхности световода 0.997; регистрация выходного светового потока $\Phi_{\text{вых}}$ на уровне плоскости внутренней поверхности рассеивателя; КПД передачи светового потока оценивался как отношение $\eta = \frac{\Phi_{\text{вых}}}{\Phi_{\text{вх}}} \cdot 100\%$. Результаты приведены в таблице.

Варианты гибридного осветительного комплекса

Параметры оптического тракта						
	Схемы оптического тракта гибридного комплекса					
	Труба – панель – усеченный конус («воронка»)	Труба – панель – труба			Труба – панель – труба – коллиматор	Труба – панель – коллиматор
D , мм	530	530	740	945	740	740
d , мм	350	350	530	740	530	530
КПД	53.0	99.5	99.5	99.6	99.6	99.8
№ варианта	1	2	3	4	5	6

Пр и м е ч а н и е. d – диаметр трубы световода верхней ступени оптического каскада, мм; D – диаметр трубы световода нижней ступени оптического каскада, мм; панель – монтажная панель для размещения светодиодных блоков, одновременно являющаяся переходным и связующим элементом между верхней и нижней ступенями оптического каскада комплекса.

Разнообразие решений предполагает применение гибридных комплексов с различной протяженностью световодов нижнего оптического каскада (вплоть до 20 м). Однако возможны световые потери, обусловленные как характером распространения света по световоду, так и многократными отражениями, задаваемыми углом расходимости светового пучка светодиодного модуля. Световые потери ограничивают максимальное расстояние передачи света по протяженному световоду. В практике применения световодов принято, что передача светового потока излучателей по световоду эффективна при уровне потерь в пределах 10%.

Для оценки возможных потерь и определения расстояний эффективной передачи излучения светодиодного модуля по протяженному световоду выполнены исследования зависимости световых потерь от угла расходимости светового пучка в диапазоне $30\text{--}120^\circ$ с целью оптимизации параметров вторичной оптики светодиодных модулей. Исследования проводились с использованием

программы LightTools для нижних ступеней оптических каскадов для диаметров световодов 530, 740 и 945 мм. Указанный диапазон световодов широко применяется на практике. Граничным критерием сравнения результатов моделирования принята протяженность световода, соответствующая расстоянию эффективной передачи света, при которой потери светового потока находятся на уровне 5%. Это соответствует КПД передачи $\eta \geq 95\%$. Результаты исследований представлены на рис. 2.

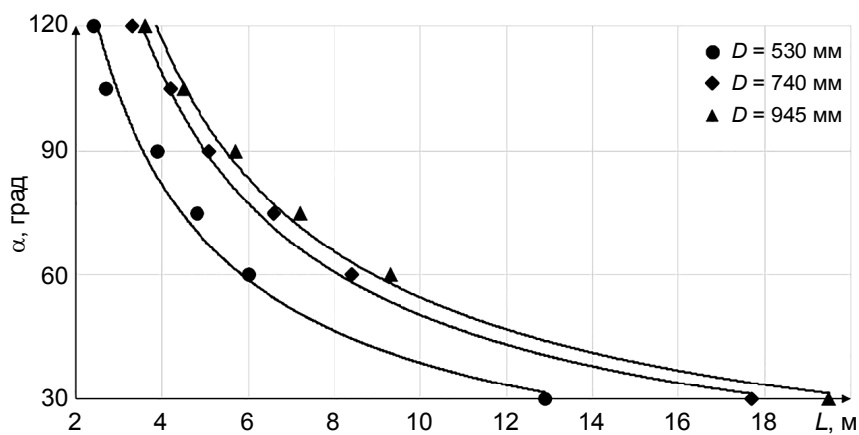


Рис. 2. Зависимость максимальной длины L трубы нижней ступени оптического каскада комплекса от угла α расходимости светового пучка светодиодного модуля для световодов диаметром D . Максимальная длина оптического тракта соответствует КПД передачи света $\eta \geq 95\%$

Для световодных систем представляют интерес материалы с высокими значениями коэффициента отражения, 95% и выше. В реальных проектах длина световода может составлять от 0.6 до 20 м. Для корректного выбора материала полого трубчатого световода важно определить соотношение длина световода – показатель отражения, поскольку стоимость материала в зависимости от коэффициента отражения покрытия (качество материала) в области его высоких значений возрастает практически в геометрической пропорции. В этой связи целесообразно определить граничные требования к значению показателя отражения в зависимости от проектной длины световода и, таким образом, оптимизировать финансовые показатели продукции. На рис. 3 показано семейство кривых зависимости световых потерь от длины оптического тракта при различных значениях коэффициента отражения покрытия внутренней поверхности полого трубчатого световода ρ . Исследование проводилось в пределах протяженности трубы световода нижней ступени оптического каскада, при которой световые потери превышали 50%.

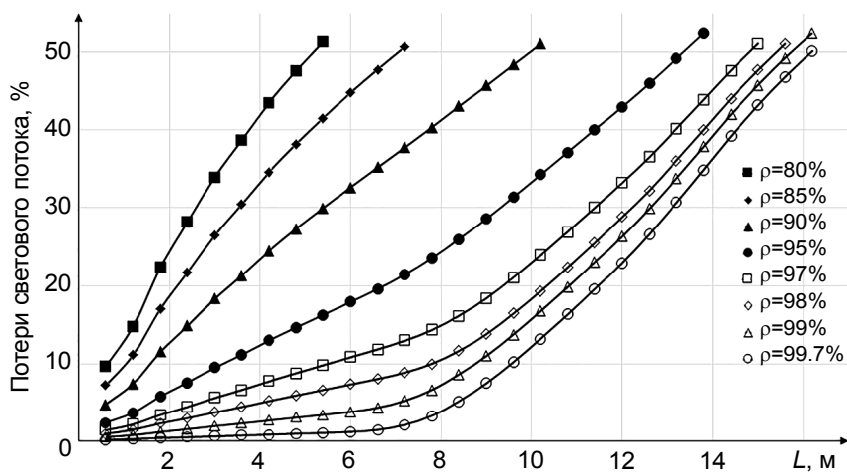


Рис. 3. Зависимость световых потерь от длины канала передачи света по пологому световоду при различных значениях коэффициента отражения покрытия

Проектирование осветительных сетей на базе полых световодов для объектов, лишенных естественного света, как правило, предусматривает наличие магистральных участков для подачи света на удаленный уровень и последующее распределение светового потока по локальным сетям освещения помещений. Удаленность объекта освещения и деление светового потока на части по локальным каналам сопровождается заметными потерями и снижением КПД системы в целом. Для протяженных световодных каналов ощутимы даже малые потери светового потока и здесь важен рациональный выбор конструкции световодов для каждого участка осветительной системы. С этой целью выполнено моделирование хода лучей и их рассеяния как источника потерь для двух

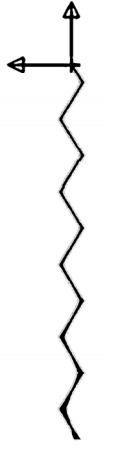
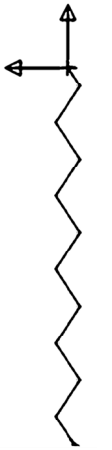
Полая труба		Полый параллелепипед	
Ось $x-z$	Ось $y-z$	Ось $x-z$	Ось $y-z$
			
<i>а</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>

Рис. 4. Ход лучей в световоде второй ступени оптического каскада: *а, б* – полая труба, *в, г* – полый параллелепипед

вариантов полого световода: зеркализированной трубы (цилиндра) как прототипа магистральной части световодной системы и зеркализированного параллелепипеда как прототипа локальной части световодной системы. Поскольку работа посвящена исследованию гибридных комплексов, моделирование проведено для наиболее протяженной нижней ступени оптического каскада. Параметры нижней ступени световода: протяженность 16 м; 1-й вариант – труба диаметром 900 мм; 2-й вариант – полый параллелепипед квадратного сечения 900×900 мм; источник света точечный, излучающий узкий пучок света под углом 60° (имитация пучка с углом расходимости 120°) к отражающей поверхности световода; коэффициент отражения поверхности – 0.997. Характер хода пучка лучей света и его рассеяние для цилиндра и параллелепипеда показаны на рис. 4.

Результаты и их обсуждение

Исследование факторов, определяющих КПД оптического тракта комплекса

В оптических системах передачи света по световоду в результате многократных зеркальных отражений возможны потери за счет обратного отражения. Измерения на действующей модели комплекса, в которой светодиодные модули встраиваются в боковую поверхность коллиматора световода, показали уровень световых потерь более 22% светового потока светодиодных модулей [6]. В модели гибридного комплекса, в которой нижняя ступень каскада имеет конусообразную форму, уровень потерь за счет обратного отражения составляет более 45%. Зависимость эффекта обратных отражений от геометрии оптического канала нижней ступени, полученная методом компьютерного моделирования в программной среде LightTools, демонстрируют данные таблицы.

Приведенные данные измерений и моделирования показывают резкое уменьшение потерь при переходе нижней ступени комплекса к форме цилиндра или коллиматора. Эти результаты исследований положены в основу концепции построения оптического канала гибридного комплекса по каскадному принципу (см. рис. 1) [3], в котором принципиально устраняется сама причина эффекта обратного отражения при распространении света по световоду в результате многократных отражений. Каскадный оптический тракт функционально содержит верхнюю и нижнюю ступени. Верхняя входная ступень объединена со светоприемным куполом и предназначена для передачи естественного света. Нижняя ступень совмещена с монтажной панелью и предназначена для передачи смешанного (совмещенного) света: естественного, поступающего через световод верхней ступени, и искусственного, излучаемого светодиодными модулями.

Главное условие в построении оптической схемы передачи света с малыми потерями заключается в соблюдении на всей протяженности канала углов падения лучей на отражающую боковую поверхность трубы световода больше 90°. В этой связи плоскость монтажной панели для светодиодных модулей располагается перпендикулярно оси полости световода, а оптические оси све-

тодиодных излучателей и трубы нижней ступени и ориентация отражающей цилиндрической поверхности световода параллельны (рис. 1). При соблюдении таких условий положительный эффект сохраняется при предельных углах расходимости потока излучения светодиодных кластеров 120° (безлинзовые кластеры). Реализация такой оптической схемы комплекса устраняет сами условия для обратного отражения практически на всей протяженности канала передачи света, по крайней мере, до плоскости рассеивателя.

Прохождение световым потоком конусообразного перехода от верхней к нижней ступени трубы (таблица, вариант 1) сопровождается большими потерями вследствие эффекта обратного отражения. Существенно улучшенным вариантом является использование нижней ступени в форме цилиндра (таблица, варианты 2–4). Наибольшие значения КПД достигаются для нижней ступени каскада в форме коллиматора (варианты 5, 6). Коллиматор на финальном участке каскада повышает КПД передачи и фокусирует световой поток на выходе из системы, выступая в роли «усилителя» и задавая тип кривой силы света (КСС). Для гибридного комплекса с протяженной нижней ступенью оптического тракта оптимальны системы типа труба – панель – труба – коллиматор (вариант 5).

Оптимизация свойств и геометрии гибридных комплексов

Разнообразие решений объясняет применение комплексов с различной протяженностью световодов нижнего оптического каскада. В этой связи возможны световые потери, обусловленные как характером распространения света по световоду, так и многократными отражениями, задаваемыми углом расходимости светового потока светодиодного модуля. Результаты исследований представлены на рис. 2. Именно световые потери ограничивают максимальное расстояние передачи света с малыми потерями по протяженному световоду. В практике применения световодов принято, что передача светового потока излучателей по световоду эффективна при уровне потерь в пределах 10%.

На рис. 2 представлены результаты для безлинзовых (без вторичной оптики) светодиодных модулей ($\alpha = 120^\circ$) при длине нижней ступени оптического тракта не более 4 м. В этом случае КПД системы составит более 95%. В остальных случаях целесообразно использовать вторичную оптику. Зависимость световых потерь от угла расходимости светового пучка светодиодного модуля показывает связь потерь с характером многократных отражений и обеспечивает выбор предпочтительной вторичной оптики для светодиодных излучателей в различных вариантах протяженных световодов. Как следует из полученных результатов, наилучшие параметры оптической системы протяженных световодов (более 4 м) достигаются при угле расходимости светового пучка излучателя менее 60° (рис. 2). При таких параметрах излучателей комплекса отмечается высокая эффективность передачи света. Эффект снижения потерь при переходе к световодам большего диаметра (увеличение максимальной длины передачи света с высоким КПД) обусловлен снижением числа отражений при распространении света по оптическому каналу. С другой стороны, оптимальный выбор вторичной оптики для световодов нижних оптических ступеней различной протяженности предоставляет возможности управлять светораспределением в плоскости рассеивателя и формировать КСС комплекса.

Зависимость световых потерь от коэффициента отражения покрытия имеет классический вид (рис. 3) в соответствии с законом экспоненциального ослабления при распространении в поглощающей среде и демонстрирует динамику затухания светового потока во время его передачи по полному протяженному световоду при заданном коэффициенте отражения [7]. Для протяженных полых трубчатых световодов удовлетворительные показатели имеют покрытия с коэффициентом отражения 99% и более. Согласно данным рис. 3, экономически целесообразны световодные системы, имеющие отражающее покрытие с коэффициентом отражения более 97% в соответствии с зависимостью потерь от длины оптического канала.

Исследование характера распространения лучей в условиях зеркального отражения от поверхностей различной формы (цилиндр и плоская поверхность) выявило характер рассеяния пучка и соответственно уровень потерь (рис. 4).

В трубе из-за кривизны отражающих поверхностей дополнительно к зеркальному отражению луча в направлении распространения (рис. 4, а) происходит отклонение (рассеяние) светового пучка (луча) в перпендикулярной (горизонтальной) плоскости (рис. 4, б), что является причиной увеличения числа отражений (подобно рассеивающей линзе) и, как следствие, возрастают потери,

КПД оптического тракта снижается. Например, при угле расходимости 120° в конце оптического тракта (16 м) в форме цилиндра КПД передачи света падает до 33.6%.

В полой параллелепипеде ход лучей при зеркальном отражении от поверхности имеет строго ориентированную зигзагообразную линию без дополнительного рассеяния (рис. 4, в). Соответственно, в плоскости $y-z$ лучи образуют линию, параллельную продольной оси световода (рис. 4, г). Благодаря отсутствию эффекта рассеяния в полой параллелепипеде при угле расходимости 120° в конце тракта (16 м) КПД передачи достигает 78%.

Результаты исследования оптических свойств световодов позволяют заключить, что при создании магистральных каналов передачи света предпочтительнее использовать полые трубчатые световоды больших диаметров. При решении задач деления магистрального потока на части и направления их в локальные пространства (горизонтальное перераспределение магистрального светового потока) целесообразно применять световоды с плоской отражающей поверхностью, например, щелевые [8].

Выводы

По результатам выполненных исследований сформулированы условия эффективной передачи светового излучения светодиодного модуля на большие расстояния. Для этих целей целесообразно применять световоды трубчатой формы, завершающиеся коллиматором, и вторичную оптику с углом расходимости светового пучка светодиодных модулей в диапазоне $30-60^\circ$. При таких параметрах излучателей гибридный осветительный комплекс обеспечивает высокую эффективность передачи света для большинства конструктивных вариантов систем совмещенного освещения. Оптимальный выбор вторичной оптики для световодов нижних оптических ступеней различной протяженности предоставляет возможность управлять светораспределением в плоскости рассеивателя и формировать КСС комплекса.

Для протяженных полых трубчатых световодов удовлетворительные показатели передачи света имеют покрытия с коэффициентом отражения более 99.0%.

При создании магистральных каналов передачи света предпочтительны трубчатые световоды. При решении задач деления магистрального потока на части и направления их на освещение локальных пространств (горизонтальное перераспределение магистрального светового потока) эффективны световоды с плоской отражающей поверхностью, например, щелевые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коржнева Т.Г., Овчаров А.Т., Яковлев А.Н. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 6/2. – С. 252–256.
2. Belyaev V.P. // Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019). E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 135. – P. 03061. – Режим доступа: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/61/e3sconf_ite18_03061.pdf.
3. Овчаров А.Т., Селянин Ю.Н., Анцупов Я.В. Ресурсосберегающий гибридный светильник // Патент на полезную модель № 180084. Заявка № 2018103794, приоритет ПМ 31.01.2018 г. Дата гос. регистрации в Государственном реестре ПМ РФ 04.06.2018 г. Бюл. № 16.
4. Айзенберг Ю.Б. // Иллюминатор. – 2003. – № 4–5.
5. Линзы для светодиодов. [Сайт компании]. URL: <https://www.prosoft.ru/products/brands/xlight/vtorichnaia-optika/> (дата обращения: 25.11.2020).
6. Ovcharov A.T., Selyanin Y.N., and Antsupov Y.V. // Light Eng. – 2018. – V. 26. – No. 4. – P. 122–129.
7. Ahmed S., Zain-Ahmed A., Abdul Rahman S., and Sharif M.H. // Int. J. Low-carbon Technol. – October 2006. – V. 1. – Iss. 4. – P. 315–328.
8. Aizenberg J.B. Hollow Light Guides. – Moscow: Znack Publishing House, 2009. – 208 p.

Поступила в редакцию 06.04.2020,
после доработки – 30.11.2020.

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

² Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия