

# Несколько нереализованных конструктивных решений оптических схем и осветительных систем с полыми световодами\*

Ю.Б. АЙЗЕНБЕРГ<sup>1</sup>, Г.Б. БУХМАН<sup>1</sup>, А.А. КОРОБКО<sup>1</sup>, В.М. ПЯТИГОРСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «ВНИСИ», Москва  
E-mail: journal.svetotekhnika@mail.ru

## Аннотация

В статье приведены варианты использования полых световодов для освещения различных объектов: арочных надувных сооружений, зданий, бассейнов, тоннелей, шахт лифтов, помещений с карнизами и др., а также ряд конструктивных решений систем освещения с полыми световодами.

**Ключевые слова:** световод, полый световод, щелевой световод, интегральная система освещения.

## 1. Введение

Все материалы, представленные в этой статье, были опубликованы на английском языке в книге Ю.Б. Айзенберга «*Hollow Light Guides*» [1]. Большая часть конструктивных решений запатентована в России и в некоторых западноевропейских странах. В основу некоторых из приведённых ниже схем были положены результаты светотехнических расчётов, продемонстрировавших их эффективность.

## 2. Арочные надувные световоды

В последнее время надувные конструкции нашли широкое применение при сооружении спортивных залов, производственных помещений, магазинов, полевых госпиталей и т.д. Эластичная оболочка надувного здания сохраняет свою форму благодаря избыточному давлению внутри неё. Внутреннее освещение этих сооружений превращается в настоящую проблему, так как внутри оболочки довольно трудно и небезопасно прокладывать электропроводку и подвешивать светильники. В этом случае

можно воспользоваться арочными надувными щелевыми световодами (встроенными в оболочку), выступающими в роли несущих и формообразующих конструкций [2]. Эта система обладает следующими достоинствами: световоды играют роль несущей конструкции сооружения; электрические провода прокладываются не внутри оболочки (их можно прокладывать в земле); вводные устройства расположены внизу, что облегчает техническое обслуживание и замену ламп. Световод может быть частью оболочки.

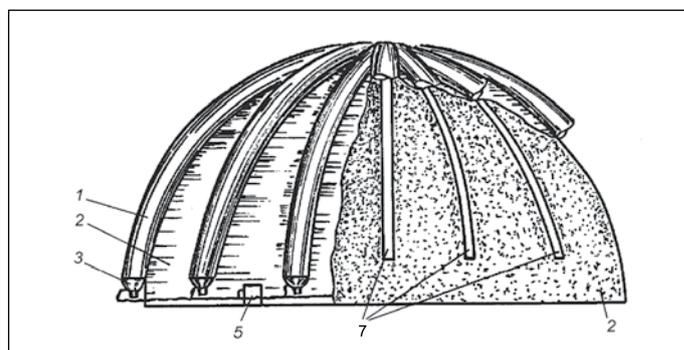


Рис. 2. Полусферическое сооружение с арочными надувными световодами

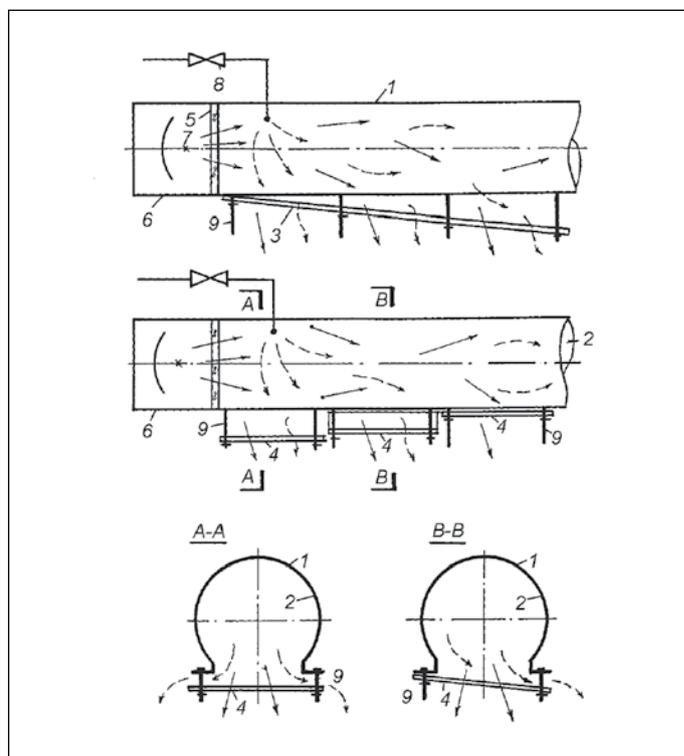


Рис. 3. Световод-воздуховод

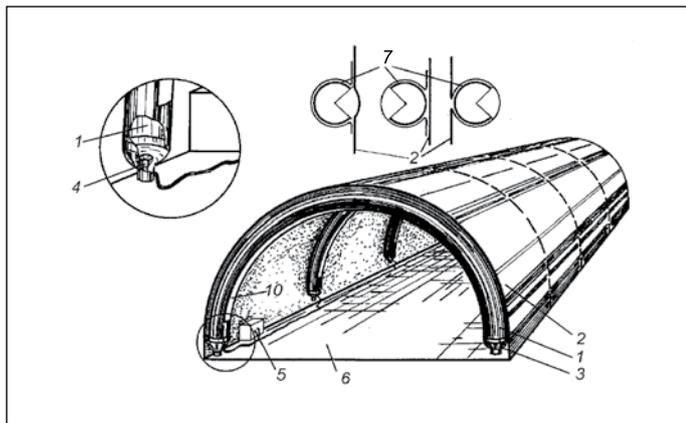


Рис. 1. Цилиндрический арочный надувной световод

\* Перевод с англ. Е.И. Розовского

Примеры конструкций цилиндрической и полусферической формы приведены на рис. 1 и 2, где 1 – щелевой световод; 2 – оболочка сооружения; 3 – вводное устройство; 4 – источник света; 5 – электрический блок; 6 – освещаемая поверхность; 7 – оптическая щель. При использовании световодов необязательно сооружать шлюз с компрессором, который создавал бы избыточное давление во всём помещении.

### 3. Световод-воздуховод

Так как полый световод – это, в принципе, трубка довольно большого диаметра (до 1 м), то его можно использовать и для подвода очищенного воздуха, то есть в качестве и световода, и воздуховода. Экспериментальная установка была создана на одном из подмосковных заводов. Эта совмещённая инженерная система может найти очень интересное и перспективное применение. Она состоит из следующих элементов (рис. 3): 1 – оболочка жёсткого щелевого световода; 2 – световод; 3 – оптическая щель; 4 – часть оптической щели с регулируемым зазором для формирования струи воздуха; 5 – прозрачное защитное стекло; 6 – отсек вводного устройства; 7 – источник света; 8 – воздухоочиститель; 9 – винты для регулирования положения оптической щели.

### 4. Ввод дневного света в здание

Ниже предложены интегральные системы освещения для следующих трёх объектов: высокое одноэтажное здание, подземное помещение и свободное помещение (глубокое помещение без перегородок) в остеклённом по периметру здании. При этом должны быть удовлетворены следующие требования:

- следует использовать простейший герметизированный гелиостат;
- для переноса и перераспределения естественного и искусственного света следует использовать одни и те же устройства;
- количество «узлов», в которых осуществляется оптическое преобразование света, должно быть сведено к минимуму;
- нуждающиеся в техническом обслуживании электрические устройства должны быть вынесены за пределы помещения;
- следует исключить нагрев, вызываемый солнечным светом или электрическими лампами;
- размеры отверстий, через которые свет попадает в помещение, должны быть сведены к минимуму.

На рис. 4 и 5 приведены оптические схемы предлагаемых установок. На рис. 4 показана интегральная система освещения для высокого одноэтажного здания. Эта система включает в себя гелиостаты, проходящие сквозь стены переносящие свет устройства (с источниками света) и полые световоды с распределяющими свет устройствами, имеющими форму светящихся дисков, прямоугольников или полос. Результаты расчётов подтверждают, что в случае зданий высотой 8–10 м, расположенных в климатической зоне Центральной Европы, эта система способна обеспечить освещённость 340–400 лк на участке размером 150–250 м<sup>2</sup> (в зависимости от размеров гелиостата и количества источников света).

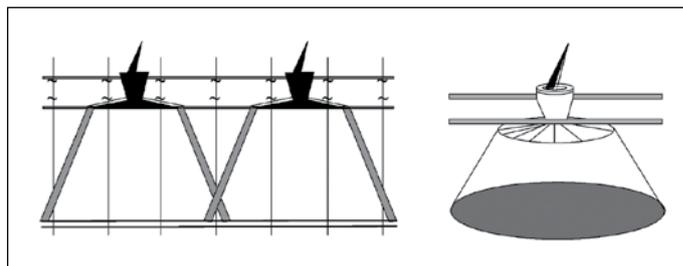


Рис. 4. Интегральная система освещения высокого одноэтажного здания

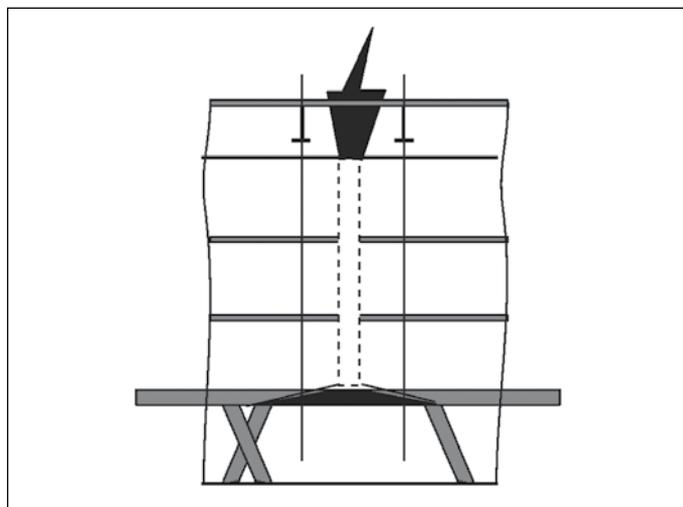


Рис. 5. Интегральная система освещения подземного помещения

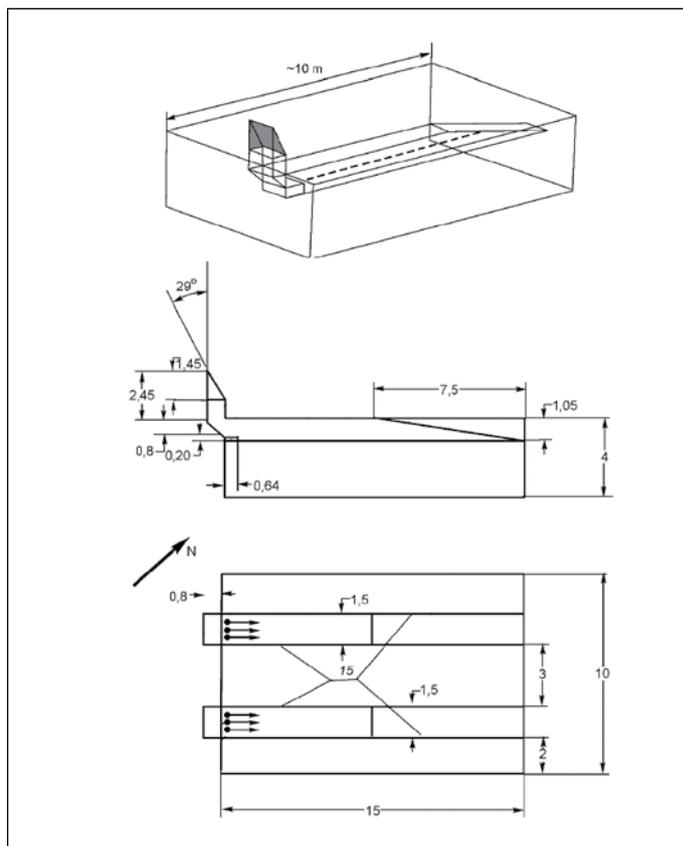


Рис. 6. Интегральная система освещения открытого помещения (с задними стенами, расположенными на расстоянии 10 м от окон). Все размеры приведены в метрах

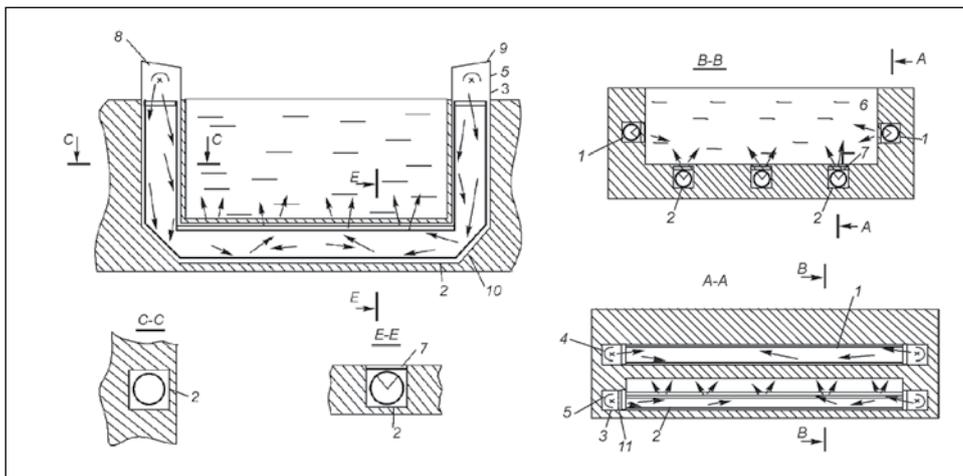


Рис. 7. Подводное освещение ванны бассейна: 1 – ниша в стенке ванны бассейна; 2 – целевой световод; 3 – полость для вводного устройства; 4 – вводное устройство; 5 – отражатель; 6, 7 – защитные стёкла; 8, 9 – стартовые тумбы; 10 – угловое зеркало; 11 – цветной светофильтр

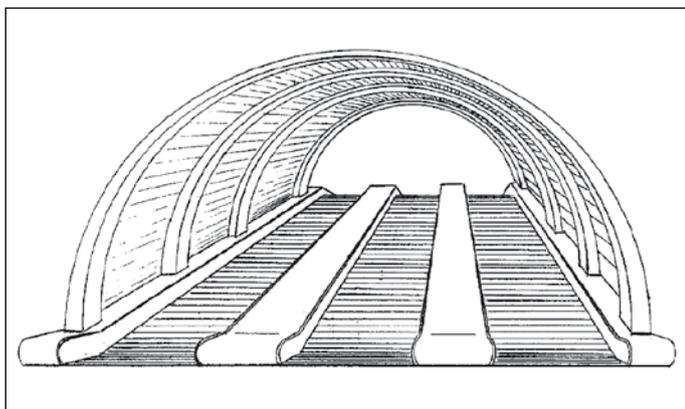


Рис. 8. Арочный световод в тоннеле эскалатора

В случае подземных помещений эта система освещения должна быть дополнена вертикальным световодом, имеющим нужные высоту и диаметр (рис. 5, пунктирная линия).

На рис. 6 изображена система, предназначенная для освещения свободных помещений, у которых задняя стена расположена на расстоянии 10–20 м от окон. Расчёты показывают, что в офисе глубиной 17 м с низким потолком система с полым световодом обеспечивает уровень освещённости 300 лк [3].

## 5. Освещение бассейнов

Обычно светильники размещаются над ванной бассейна, но иногда система освещения включает в себя ещё и подводные светильники, утопленные в боковые стенки для подсветки воды изнутри. Эти светильники трудно обслуживать. Чтобы добраться до светильника при замене ламп необходимо осушить ванну бассейна. Кроме того, герметичные светильники для подводного освещения имеют сложную конструкцию.

Мы предлагаем систему освещения, позволяющую:

- обеспечить динамическое изменение подводного освещения;
- с лёгкостью производить техническое обслуживание светильников;

• по-новому посмотреть на системы освещения бассейнов.

Вводные устройства 3 и 4 (см. рис. 7 и 8) можно поместить за торцевыми стенками ванны бассейна в прилегающих помещениях или в стартовых тумбах 8, 9. В последнем случае используются соединённые под углом световоды 10. Свет может иметь постоянный или переменный цвет. Это можно обеспечить при помощи системы управления, цветных ламп, цветного корпуса световода, цветных стёкол в нишах боковых стенок или цветных светофильтров 11 между вводными устройствами и входными отверстиями световода. Свет, подаваемый в противоположные концы световода, также

может иметь разный цвет. В некоторых случаях внутренний объём световода можно наполнить прозрачной жидкостью например, водой. При этом имеет место важный и интересный оптический эффект: при движении в одном направлении пловец видит светящуюся полосу одного цвета, а при движении в противоположном направлении – светящуюся полосу другого цвета.

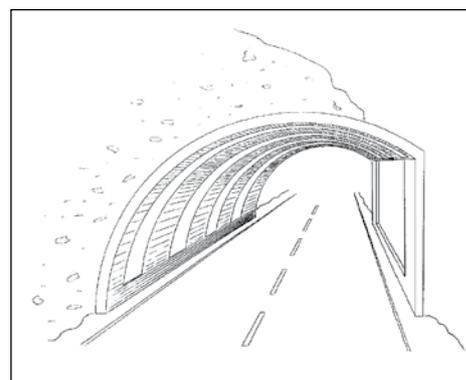
## 6. Освещение тоннелей

Система освещения может включать в себя клиновидные световоды, формирующие в тоннеле светящиеся арки (рис. 8, 9). Для покрытия внутренней поверхности световода можно использовать призматическую плёнку.

## 7. Системы освещения для наклонных тоннелей эскалаторов метро

Цилиндрические полые световоды можно установить над балюстрадами эскалатора и сформировать непрерывные светящиеся линии, имеющие такой же угол наклона, как и сам наклонный тоннель. Эти линии, а также вводные устройства, поддерживаются вертикальными опорами, установленными на балюстрадах. Эти опоры должны иметь достаточную высоту, позволяющую обеспечить равномерное освещение ступеней эскалатора. Они также могут представлять собой полые световоды с источниками света, расположенными в основаниях этих опор (рис. 10).

Рис. 9. Арочный световод в открытом тоннеле



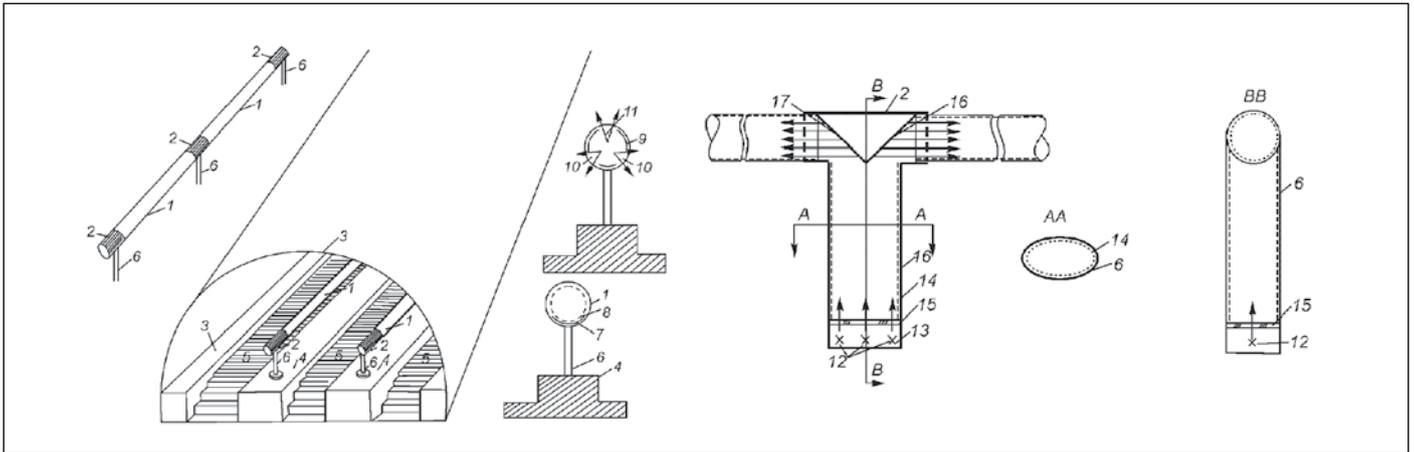


Рис. 10. а) Система освещения наклонного тоннеля эскалатора. б) Световедущая опора для световода: 1 – полый световод; 2 – вводное устройство; 3,4 – боковые балюстрады эскалатора; 5 – ступень эскалатора; 6 – опора световода; 7 – рассеивающий свет корпус световода; 8 – плёнка SOLF\*; 9 – внутренние отражатели; 10 – боковое выходное отверстие; 11 – верхнее выходное отверстие; 12 – источник света; 13 – лампа для аварийного освещения; 14 – входной световод (металлическая опора); 15 – защитное стекло; 16 – плёнка SOLF; 17 –распределяющее свет зеркало

\* Призматическая плёнка SOLF (Scotch Optical Lighting Film) производится компанией 3M, США.

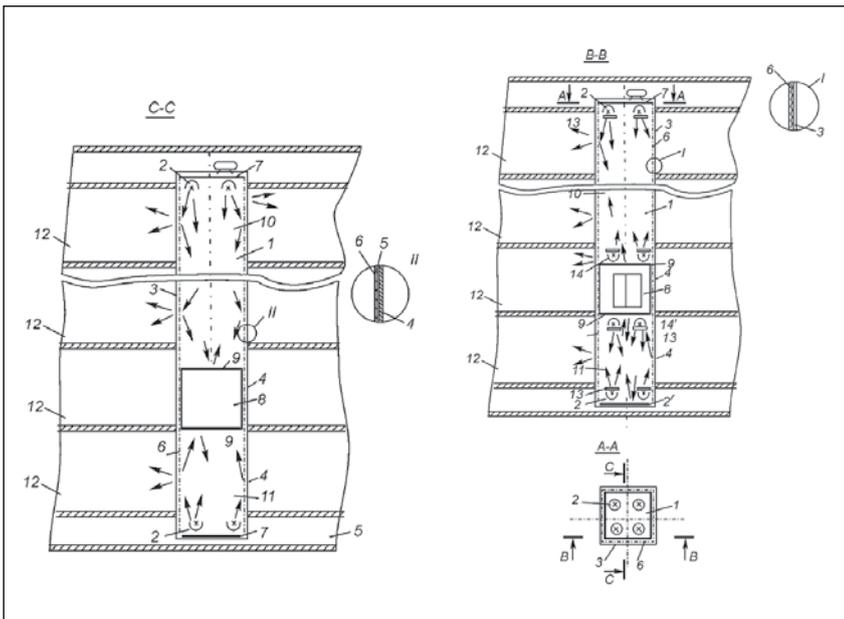


Рис. 11. Декоративное освещение шахты лифта: 1 – шахта лифта; 2 – светильники с узкими световыми лучами; 3 – защитная сетка; 4 – прозрачное акриловое стекло; 5 – подвал; 6 – плёнка SOLF; 7 – зеркало; 8 – кабина лифта; 9 – зеркало; 10, 11 – верхняя и нижняя части шахты лифта; 12 – полы лестничных клеток; 13 – цветные светофильтры

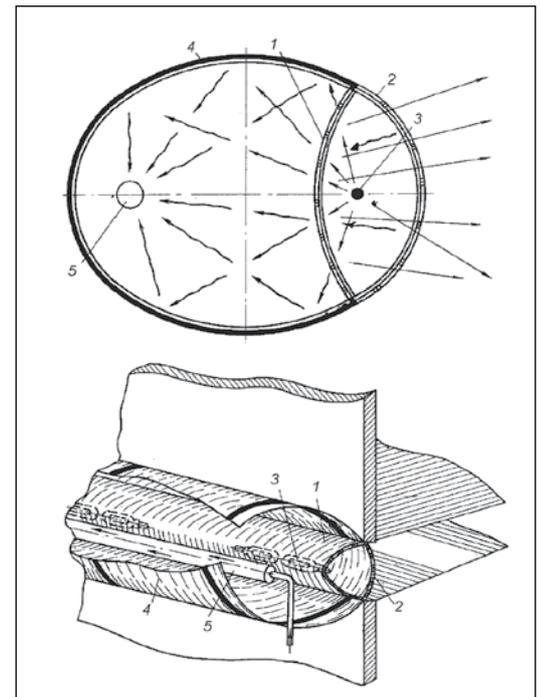


Рис. 12. Вводное устройство для ввода в световод «холодного» света и использования тепла

## 8. Освещение шахты лифта

Задача состоит в том, чтобы обеспечить динамическое освещение, связанное с движением кабины лифта (рис. 11). Кабина лифта играет роль «поршня» для света. Когда кабина приближается к какому-то участку прозрачной стенки шахты лифта, яркость последней возрастает. И наоборот, когда кабина удаляется от этого участка, яркость последнего уменьшается. Находящийся в кабине лифта или на лестнице наблюдатель получает информацию о том, что кабина лифта приближается или удаляется.

Для усиления производимого освещением эффекта можно использовать разные цвета для освещения верхней

и нижней секций шахты. Для этого можно воспользоваться имеющими разные спектры излучения источниками света или цветными светофильтрами, перекрывающими выходные отверстия светофильтров. Например, если красный свет выбирается для освещения верхней части шахты, а зелёный – для освещения её нижней части, то расположенная выше кабины часть шахты и соответствующие лифтовые холлы и лестница будут красными, тогда как холлы и лестница, расположенные ниже кабины, будут зелёными. Если кабина минует какой-то этаж, двигаясь, например, вниз, то при приближении кабины лифтовой холл на этом этаже будет освещаться постепенно усиливающимся зелёным светом, а при удалении

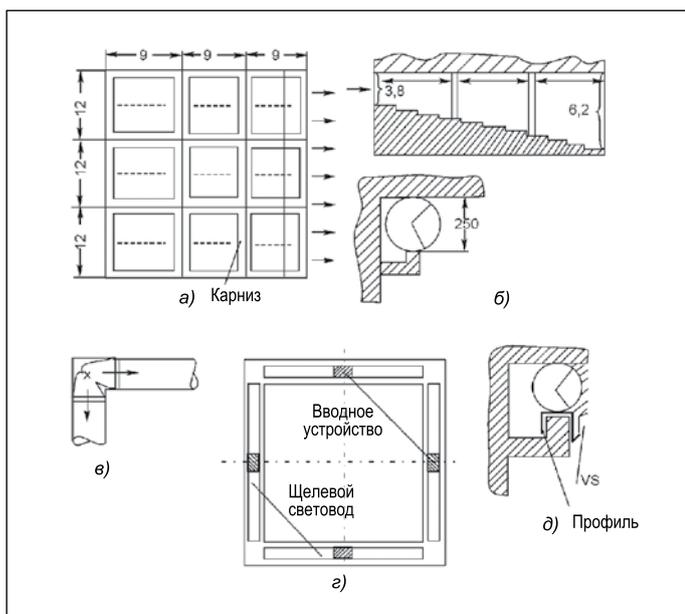


Рис. 13. Карнизное освещение с полым световодом

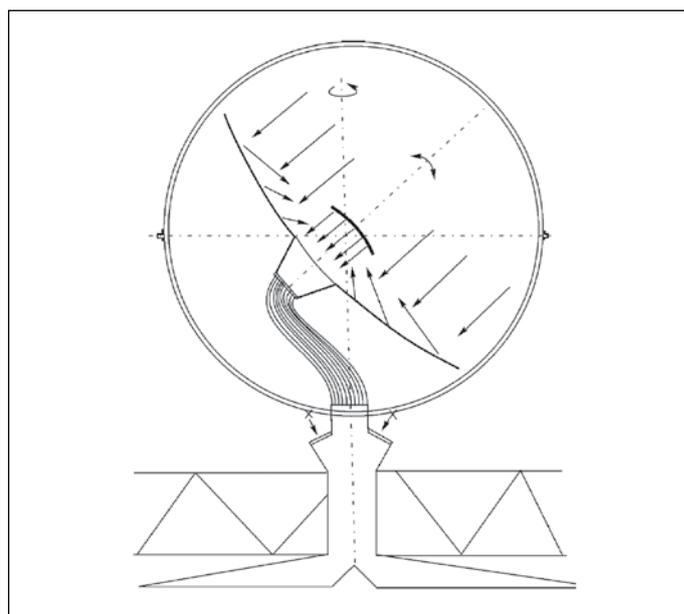


Рис. 16. Гелиостат с оптической системой Кассегрена (вариант 1)

Рис. 14. Оптическая схема ввода световых потоков нескольких источников света в световод относительно малого диаметра (с использованием глубокого параболического отражателя)

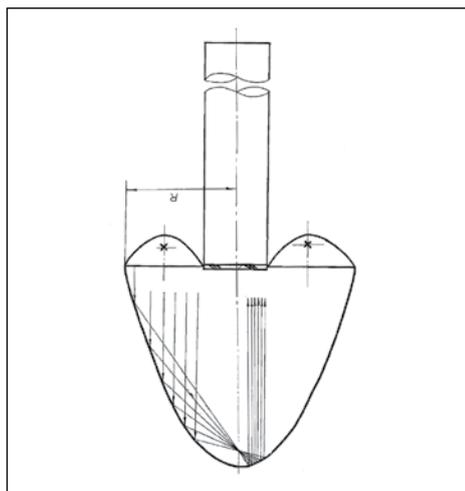


Рис. 15. Оптическая схема ввода световых потоков нескольких источников света в световод относительно малого диаметра (с использованием неглубокого параболического отражателя)

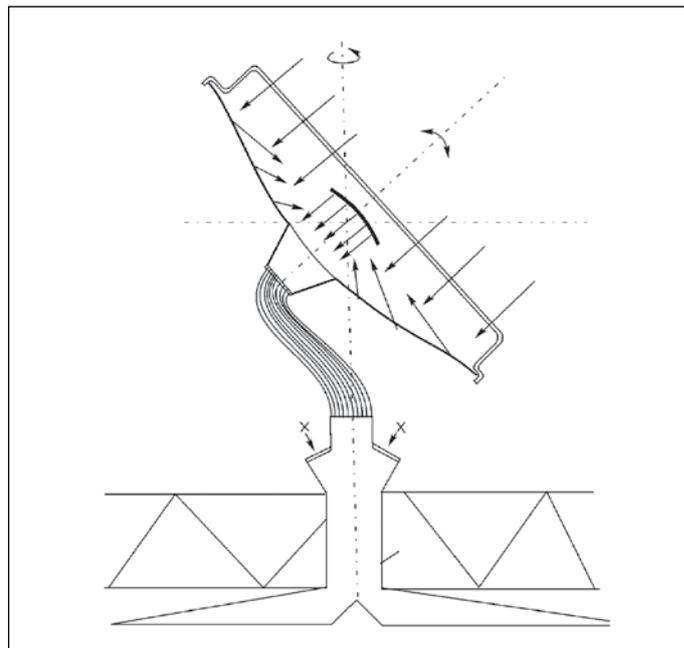
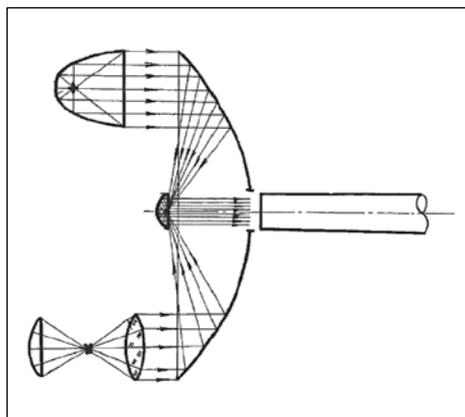


Рис. 17. Гелиостат с оптической системой Кассегрена (вариант 2)

## 9. Ввод в световод «холодного» света и использование тепла

Для ввода в плоский световод «холодного» света и использования тепла, выделяемого мощными источниками света, предлагается система, показанная на рис. 12. Эта система включает в себя: зеркальный отражатель 4, имеющий форму эллиптического цилиндра [4]; линейные газоразрядные лампы 3, расположенные вдоль первой фокальной оси отражателя; теплообменник 5, расположенный вдоль второй фокальной оси отражателя; куполообразное выходное отверстие 2, закрытое стеклом с многослойным интерференционным покрытием, которое пропускает «холодный» свет и отражает назад ИК излучение; стеклянную перегородку 1 с многослойным интерференционным

кабины он будет освещаться постепенно ослабевающим красным светом.

Для увеличения интенсивности света в шахте над кабиной и под ней можно установить дополнительные источники света. В этом случае при использовании цветных эффектов источники света во всех секциях шахты должны иметь одинаковые спектры излучения.

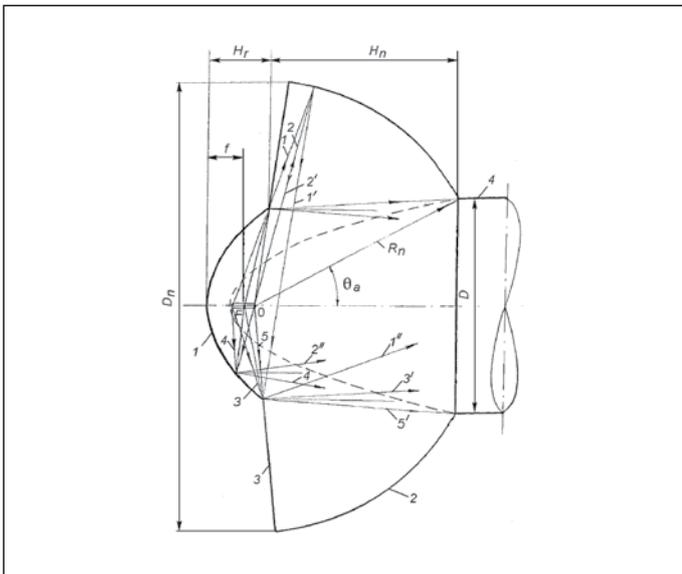


Рис. 18. Оптическая система с параболическим отражателем и сферической приставкой

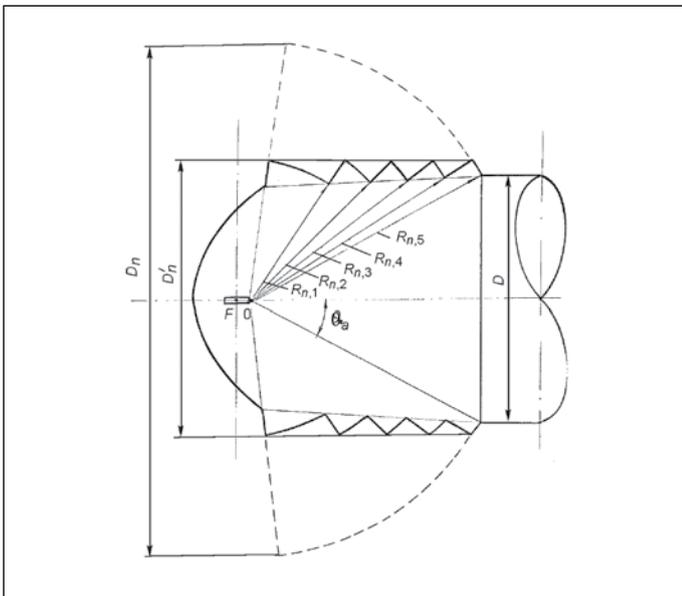


Рис. 19. Оптическая система с параболическим отражателем и приставкой в виде совокупности нескольких сферических колец

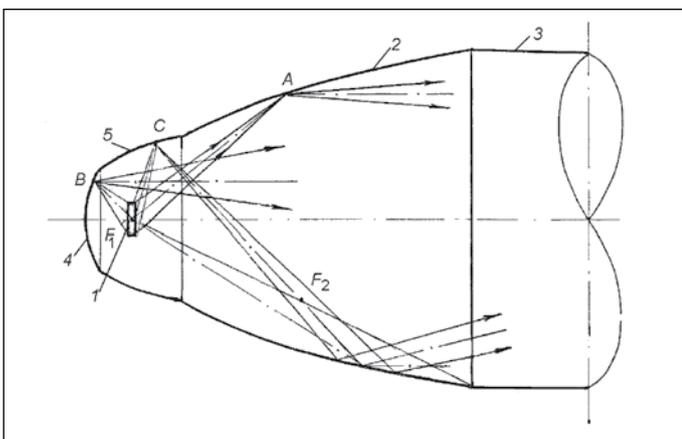


Рис. 20. Ход лучей в оптической системе с двумя параболическими и одним эллиптическим отражателями

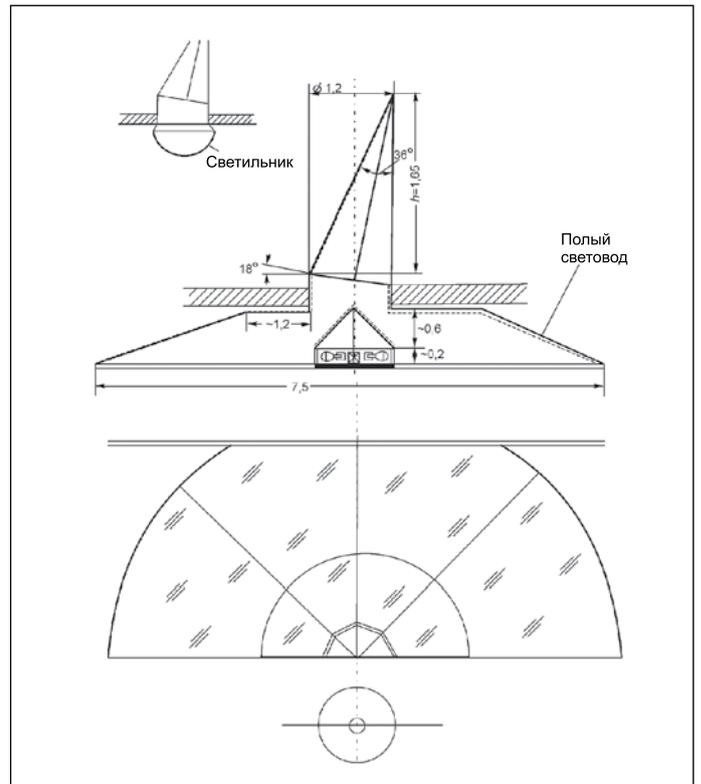


Рис. 21. Система с гелиостатом для универмага

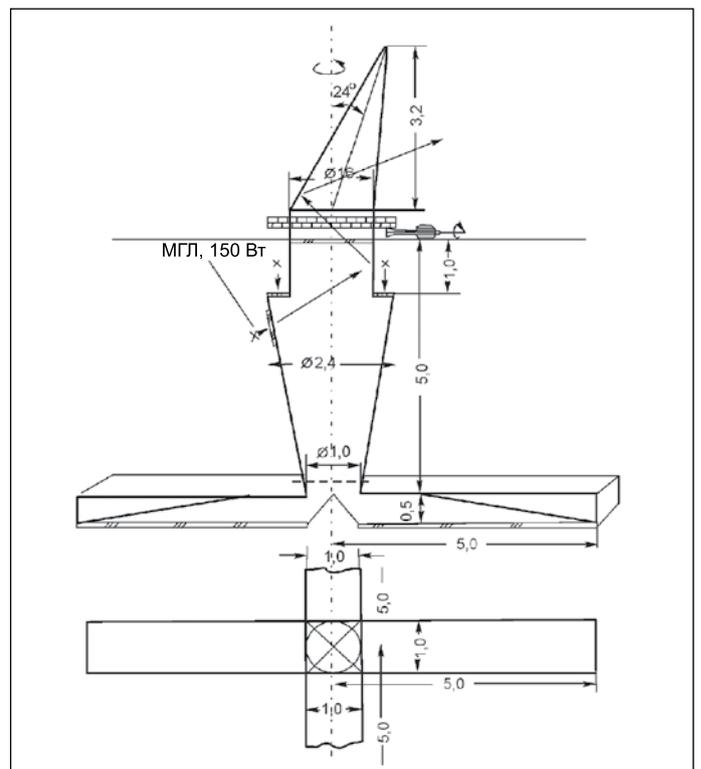


Рис. 22. Система с гелиостатом, вращающимся вокруг вертикальной оси

покрытием, которое пропускает падающее снаружи ИК излучение, отражённое куполом 2, и падающий изнутри «холодный» свет. В результате генерируемое лампами ИК излучение концентрируется в районе второй фокальной оси и нагревает трубку, по которой течёт вода. В световод

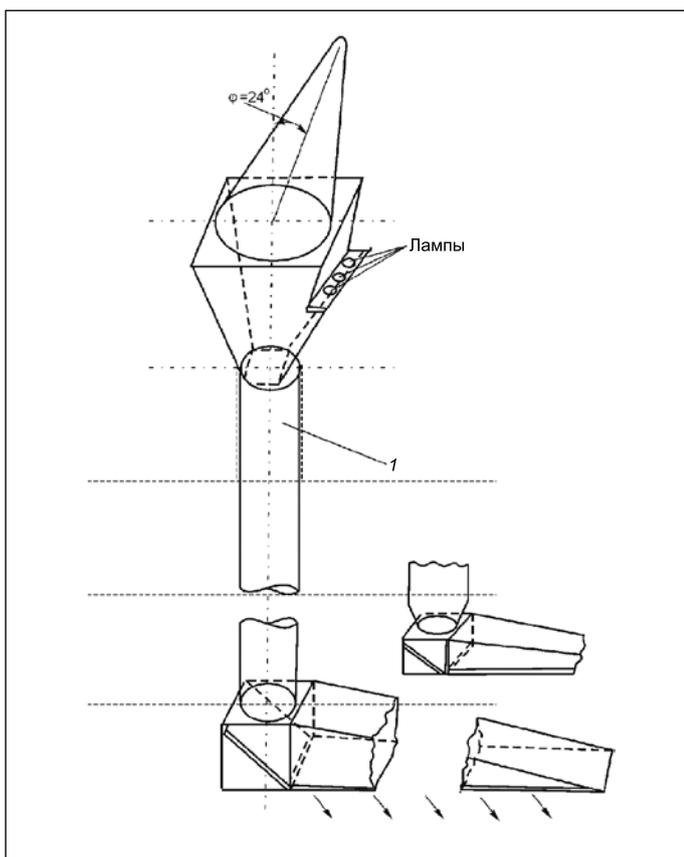


Рис. 23. Система с гелиостатом и горизонтальным плоским полым световодом

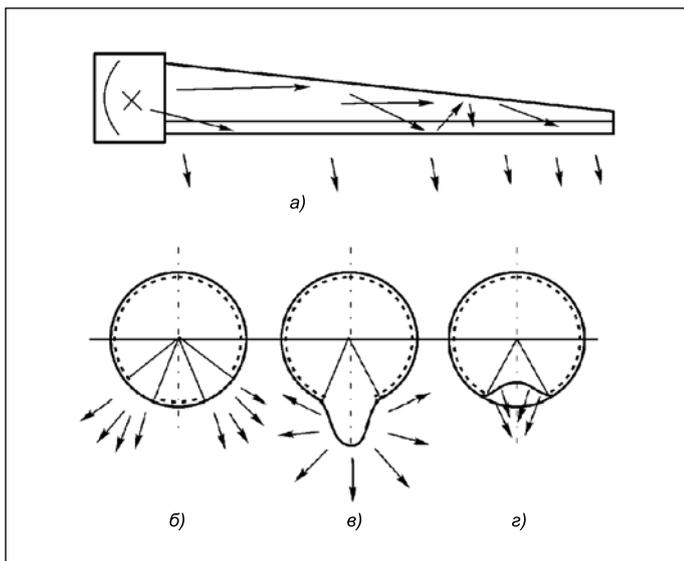


Рис. 24. Декоративный световод (а) с двумя щелями (б), с носовидной щелью (в) и с зубовидной щелью (г)

поступает только УФ и видимое излучение, которое освещает окружающее пространство [4].

## 10. Карнизное освещение

Использование полых световодов позволяет изменить привычное карнизное освещение. Вместо того, чтобы прятать в карнизе многочисленные люминесцентные лампы, тем самым ухудшая внешний вид системы (различные

цветовые тона, тёмные точки в местах состыковки ламп), имеет смысл воспользоваться световодами длиной от 6 до 12 м и диаметром 250 мм. Размеры световода должны соответствовать размерам элемента конструкции. На рис. 13 приведены два примера вводных устройств.

## 11. Использование многолампового прожектора в качестве вводного устройства

Очень важное значение имеет как увеличение светового потока, вводимого в световод, так и максимально возможное уменьшение диаметра световода. На рис. 14 и 15 приведены примеры решения этой проблемы. В основу положено использование больших (имеющих диаметры, намного превышающие диаметр световода) и или глубоких (рис. 14), или мелких (рис. 15) параболических зеркальных отражателей, которые собирают световые лучи нескольких прожекторов и направляют собранный световой поток на входное отверстие световода. Глубокий параболический отражатель имеет малое, а мелкий – большое фокусное расстояние. Оптическая схема, приведённая на рис. 15, известна как система Кассегрена с параболическим отражателем и отверстием в центре большого отражателя.

## 12. Гелиостаты с оптическими системами Кассегрена

На рис. 16 и 17 приведены схемы гелиостатов, в которых используется оптическая система Кассегрена. Эта система включает в себя большое параболическое зеркало, прозрачную защитную оболочку сферической или плоской формы, вторичный зеркальный отражатель, жгут из волоконных световодов, приёмный конец световода, источники света и входные окна, а также плоский световод, нижняя поверхность которого имеет форму светящегося диска или двух (или четырёх) прямоугольников.

## 13. Оптическая система с повышенным коэффициентом использования светового потока

На рис. 18 приведена оптическая система, включающая в себя зеркальный параболический отражатель (параболоид вращения) 1, сферическую зеркальную поверхность 2, коническую зеркальную поверхность 3, соединяющую элементы 1 и 2 и начало световода 4, имеющего диаметр  $D$ . Эта система позволяет увеличить приёмный угол, то есть перехватывать большую часть светового потока источника света. Поверхность 2 перехватывает световой поток, выходящий за пределы приёмной зоны отражателя 1, и возвращает его в фокальную точку, совпадающую с местоположением источника света [5]. Затем эти световые лучи падают на параболическое зеркало 3, фокальная точка которого совпадает с фокальной точкой сферической поверхности. После повторного отражения от параболического отражателя весь световой поток поступает на вход световода.

На рис. 19 приведена аналогичная схема, в которой для уменьшения размеров сферическая поверхность заменена на совокупность сочленённых сферических колец.

На рис. 20 приведена оптическая схема, состоящая из трёх зеркальных отражателей: глубокого 2 и мелкого 4 па-

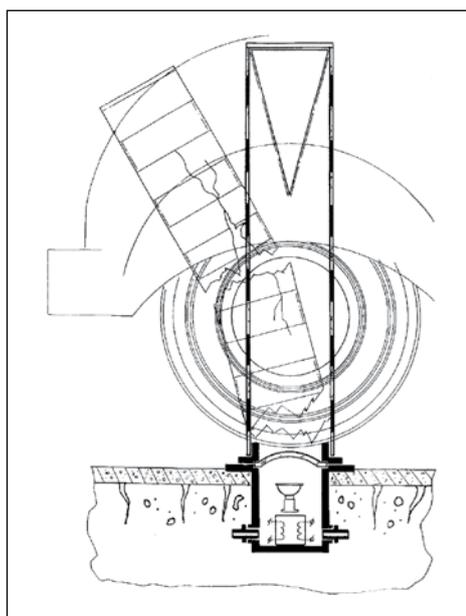


Рис. 25.  
Оптическая схема  
для светящегося  
столбика

рабочих отражателей и эллипсоида вращения 5. Эта система, особенно при использовании несферических источников света  $I$ , позволяет увеличить коэффициент использования светового потока применительно к входному концу 3 световода. При этом, входящий пучок света оказывается хорошо сфокусированным.

#### 14. Система освещения с гелиостатом и плоским клиновидным полым световодом

На рис. 21–23 приведены несколько вариантов системы освещения с гелиостатом (как фиксированным, так и поворачивающимся вокруг вертикальной оси) и плоским клиновидным световодом.

Светящаяся поверхность световода может иметь форму диска (рис. 21) или прямоугольника (рис. 22). Поступающий от гелиостата свет попадает на вход световода  $I$  с призматической плёнкой  $SOLF$  и внешним отражателем (рис. 23). Эта система предназначена для освещения закрытых (или подземных) пространств.

#### 15. Декоративный световод

Выходное отверстие плоского световода может иметь разную форму и служить для декоративных целей. Оно может иметь и разный цвет. На рис. 24 приведены плоский клиновидный световод и несколько вариантов декоративных щелей.

#### 16. Дорожный столбик с «зеброй»

Имеются патенты на светящиеся полые дорожные столбики с разметкой «зебра», которые можно устанавливать на пешеходных переходах (например, [6]). Основным недостатком таких систем состоит в том, что они имеют малую вандалостойкость, так как позволяют легко добраться до лампы. Кроме того, в чрезвычайной ситуации водитель старается предотвратить дорожное происшествие и может съехать с дороги, сбивая при этом столбик. В этом случае источник света разбивается. Эту ситуацию можно исправить, если воспользоваться полым световодом (рис. 25).

**Послесловие.** Появление и развитие светодиодов открывает новые перспективные возможности и перед световодами. Липкая токоведущая лента с нанесёнными на неё светодиодами может крепиться к верхней части зеркального световода (с любыми промежутками между светодиодами) и создавать слегка акцентированное освещение под световодом. При этом сама труба световода должна быть чуть-чуть опаловой. При этом как дневное, так и ночное высокоэффективное освещение может обеспечиваться светящейся линией практически любой длины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aizenberg, J.B. Hollow Light Guides. – Moscow: Publishing House «Znack», 2009, 208 pp.
2. Aizenberg, J.B., Bukhman, G.B., Pyatigorskiy, V.M., Solomatina, N.M. Lighting installation for premises with pneumatic protecting constructions. US Patent 4.120.024, 1978
3. Айзенберг, Ю.Б. Интегральные системы освещения помещений без достаточного естественного света//Светотехника. – 2003. – № 1. – С. 22–2 (Aizenberg J.B. Integral lighting systems for rooms with insufficient daylighting. Light & Engineering, 2003, v. 11, № 3.)
4. Авторское свидетельство СССР № 737693.
5. Авторское свидетельство СССР № 943474.
6. BRD Patent No. 3200599.



#### **Айзенберг Юлиан Борисович**

Доктор технических наук, профессор, академик АЭН РФ, главный редактор журнала «Светотехника»



#### **Коробко Алексей Александрович,**

кандидат техн. наук. Окончил в 1971 г. МЭИ. Ведущий научный сотрудник и руководитель группы специального программного обеспечения ООО «Управляющая компания «БЛ Групп». Член редколлегии журнала «Светотехника»



#### **Бухман Геннадий Борисович,**

кандидат технических наук, президент компании Экотехсвет, г. Киев



#### **Пятигорский Владимир**

Михайлович, кандидат техн. наук. Окончил МЭИ. Главный конструктор ООО «ВНИСИ». Лауреат Государственной премии РФ