Об истории развития и области эффективного использования полых световодов

Ю.Б. АЙЗЕНБЕРГ
ВНИСИ*

За последние годы в процессе подготовки публикации МКО по полым протяженным световодам в рамках комитета ТК3.30 "Hollow Light Guides" развернулась острая дискуссия по истории развития этой области светотехники, а также о достоинствах и недостатках различных групп полых световодов и обусловленной этим эффективной области их применения. К сожалению, эта дискуссия связана во многом с попыткой исказить фактически имевший место исторический процесс, принизив роль отечественной науки и техники, и в фирменных интересах отдать предпочтение одним группам изделий в ущерб другим. Все это послужило основанием для написания и публикации настоящей статьи, в которой делается попытка рассмотрения сути проблемы с более подробным освещением итогов работы отечественной школы полых протяженных световодов.

Идея создания и использования полых световодов, позволяющих отдалить источник излучения, часто имеющий недопустимо высокую температуру, яркость, нерациональное светораспределение и пожаро-, взрыво- и электроопасность, от освещаемого объекта имеет более чем столетнюю историю. В последней четверти прошлого века, в особенности в начале 80-х годов, ряд исследователей в России и США рассматривали в теоретическом плане, а некоторые реализовали на практике идею транспортирования светового потока от появившегося в те годы мощного источника света — электрической дуги по зеркализованным изнутри металлическим трубам.

Впервые разработал, осуществил (1874 г.) и опубликовал (1880 г.) результаты проведенной работы в этом направлении известный изобретатель В.Н. Чиколев [1]. На Охтинском пороховом заводе (под Санкт-Петербургом) Чиколев оборудовал осветительную установку (рис. 1) с полыми торцевыми световодами в виде зеркализованных изнутри труб, по которым во взрывоопасные помещения передавался свет от мощной электрической дуги, установленной вне здания на специальной вышке. Свет направлялся в помещения с помощью полупрозрачных зеркал, стоящих внутри труб, и распределялся в помещениях диффузно пропускающими полусферами.

Практически параллельно с Чиколевым в США над этой же проблемой безопасного использования света мощных электрических дуг работали M.T. Neal [2], W.R. Lake [3], Molera и Cebrian [4] и W. Wheeler [5]. Neal и Lake получили патенты на свои устройства уже в 1878 г., Wheeler — в 1881 г., а Molera и Cebrian опубликовали свои идеи в калифорнийском научно-техническом журнале в 1879 г. Все эти изобретения были сугубо теоретическими и неизвестно, были ли они реализованы на практике. Вместе с тем приходится лишь удивляться и восхищаться высоким для своего времени техническим уровнем этих первых изобретений в

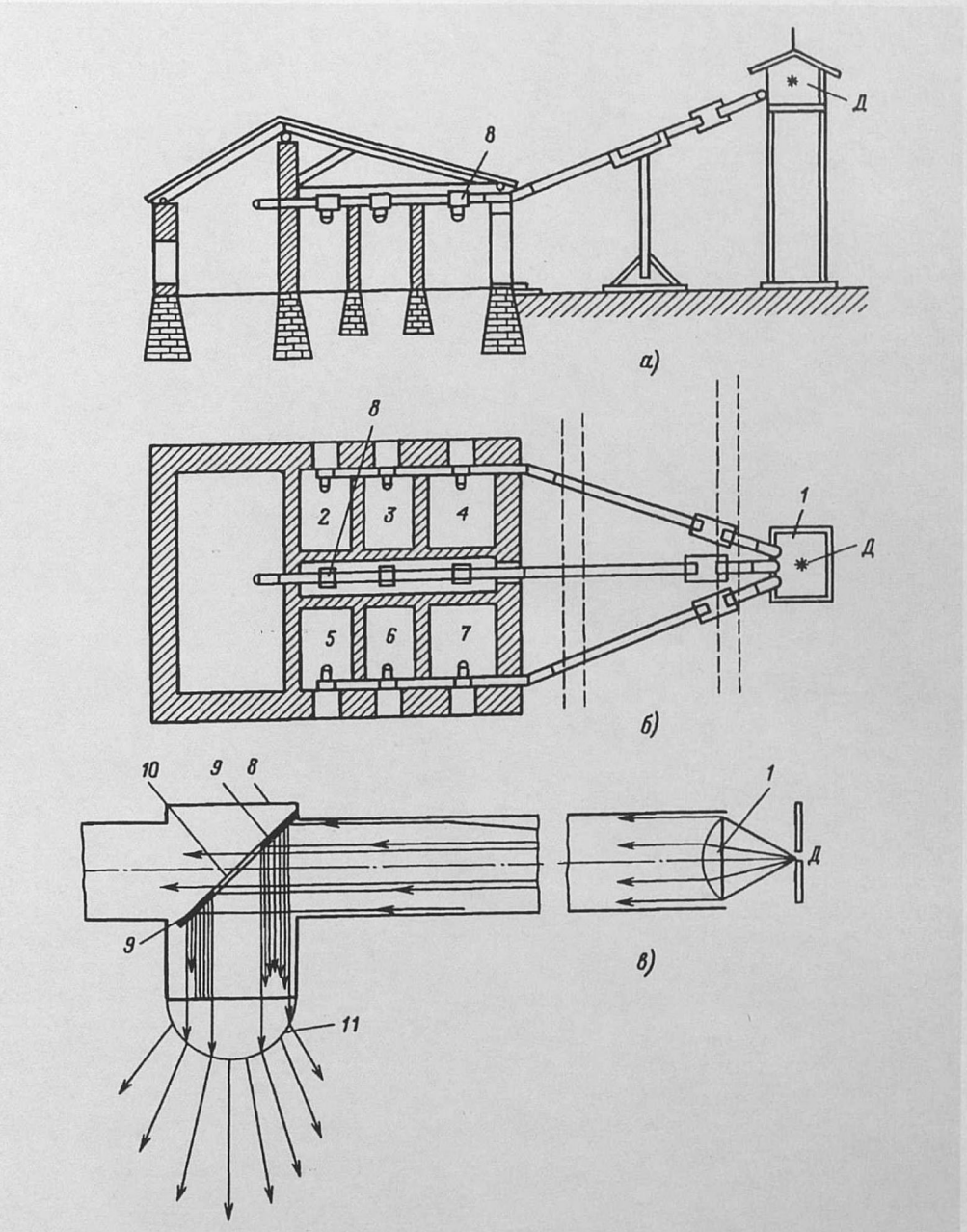


Рис. 1. Осветительная установка П.Н. Чиколева с полыми торцевыми световодами на Охтинском пороховом заводе

Д — электрическая дуга, *1* — конденсорная линза; *2—7* — освещаемые взрывоопасные помещения; *8* — светильники — светоделящие и светорассеивающие головки; *9* и *10* — зеркально-отражающие и светопрозрачная поверхности стеклянной пластины, *11* — светорассеивающая полусфера

* 129626 Москва, проспект Мира, 106.

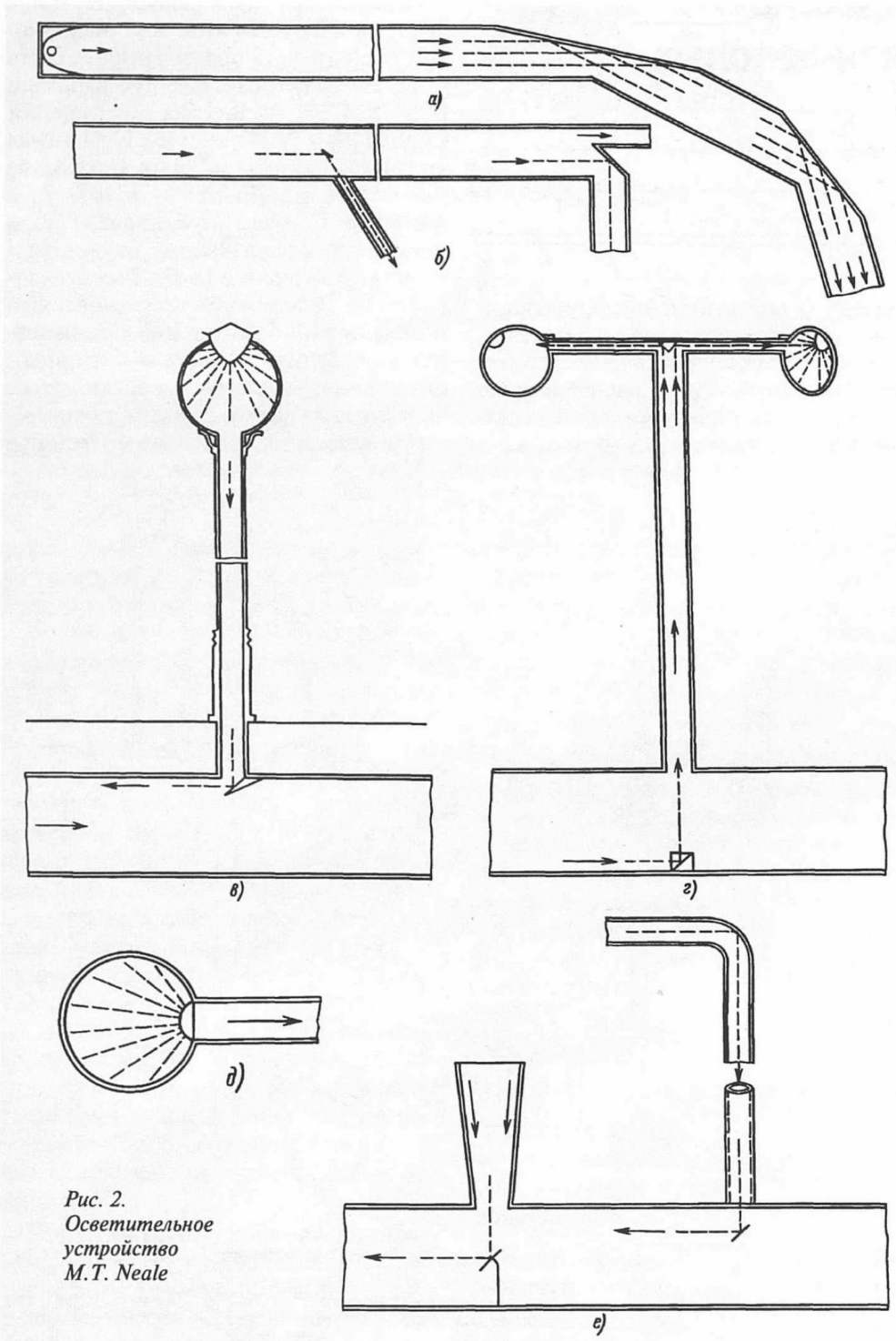


Рис. 2. Осветительное устройство M.T. Neale

области осветительных устройств и установок. Так, M.T. Neal предложил не только способы транспортирования, деления и перераспределения светового потока источников света с помощью зеркал, линз и светорассеивающих элементов (рис. 2), но и высказал мысль об использовании выделяемого мощными лампами тепла.

Получивший патент в этом же 1878 г. W.R. Lake предлагал использовать свое устройство для освещения шахт, подземных многоярусных туннелей и многоэтажных зданий (рис. 3). При этом в патенте W.R. Lake речь идет о формировании параллельных пучков света от оптической системы с мощным источником, введения их в торцы труб. О характере отражения внутренней поверхности труб ничего не сказано. Подчеркивается полная взрыво- и пожаробезопасность предлагаемого устройства.

Molera и Cebrian описали осветительную установку многоэтажного конторского здания, освещаемого с помощью мощной дуги (со стоящими под углом электродами) и несколькими линзами Френеля, направляющими в трубы световодов весь свет, генерируемый дугой. Световоды с помощью призм перераспределяют свет во все помещения здания (рис. 4).

Сложное комбинированное осветительное устройство W. Wheeler (рис. 5) решало проблемы максимально полного использования светового потока источника, направления его в одну или две стороны, транспортирования потока по трубам торцевых световодов, подразбиения потока на много частей и использования его с помощью предложенных излучателей. При этом применяться должны были сферические и эллиптические зеркала, конденсорные линзы, призмы, светорассеивающие элементы.

Такой подъем работ в этом направлении практически одновременно в разных странах показал, насколько назрела задача транспортирования и перераспределения в пространстве световых потоков от единственных в то время источников — мощных электрических дуг.

Однако пути технического прогресса после создания ламп накаливания и распределительных электрических сетей пошли по другому направлению и полые световоды как средство транспортирования излучения на большие расстояния от источников были забыты на долгие годы.

Только в 1965 г. Г.Б. Бухман (г. Киев, СССР), предложил существенное развитие идеи полых световодов, как средства не только транспортирования света, но и его использования для освещения по всей длине полого световода. Идея Г.Б. Бухмана [6] заключалась в том, что свет от мощного источника вводился в торец зеркализованной изнутри трубы, аналогично тому, как это делали Чиколев, Wheeler и др., однако после этого свет не транспортировался на основе многократных отражений до противоположного конца трубы, как это было раньше, а выходил достаточно равномерно по всей длине трубы через часть ее боковой поверхности, не покрытую зеркально отражающим слоем (рис. 6, *а*). В последующем такие световоды получили название "щелевых световодов", а боковая поверхность, через которую свет выходит в освещаемое пространство, была названа "оптической щелью". Дальнейшее развитие эта идея получила в 1970 г. в патенте [7].

В 1975 г. Ю.Б. Айзенберг и Г.Б. Бухман (СССР) патентуют два фундаментальных для развития полых световодов изобретения новых систем, позволяющих транспортировать с помощью щелевых световодов как солнечный свет, так и свет искусственных источников, а также использовать тепловую энергию, выделяемую мощными лам-

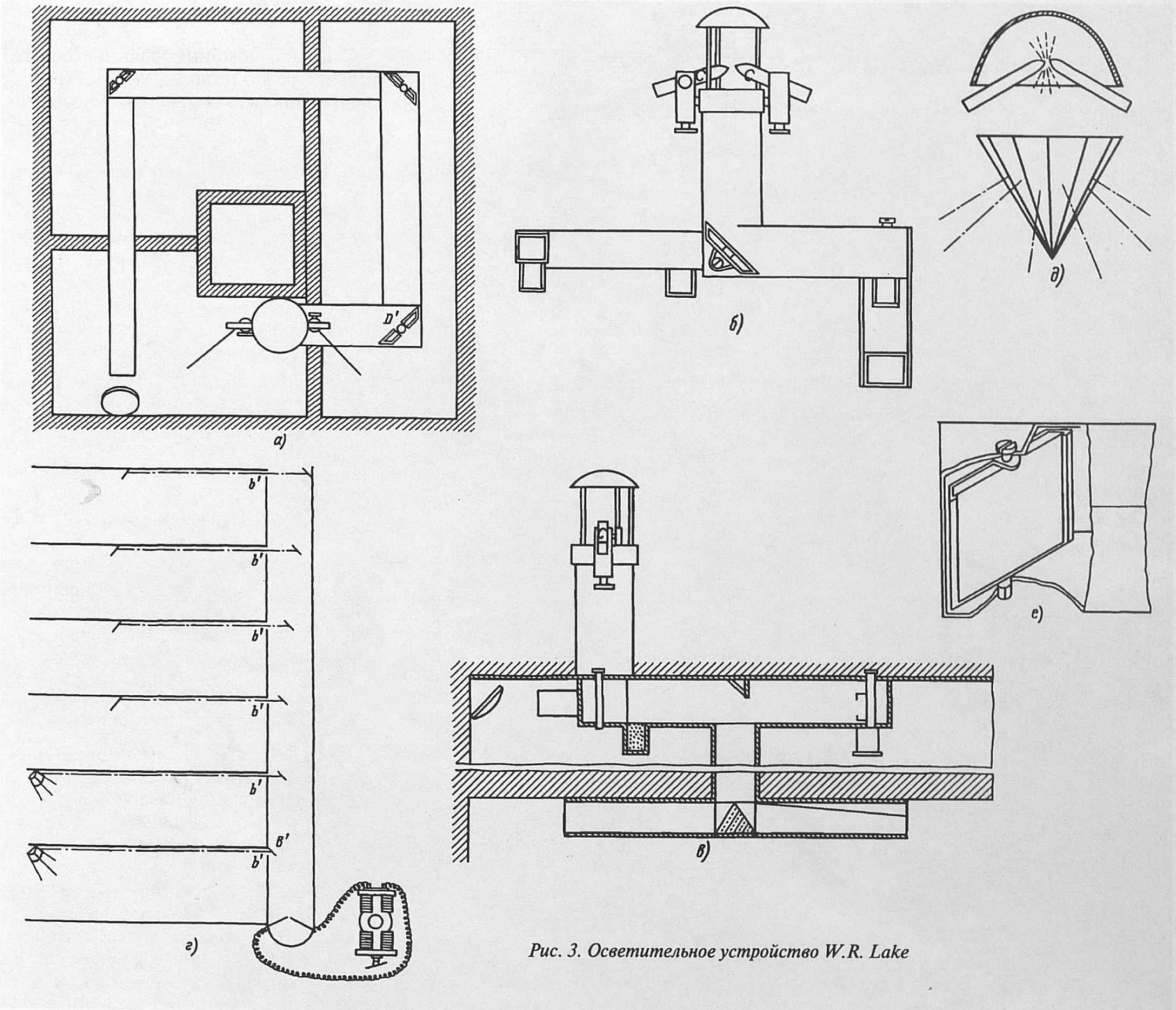


Рис. 3. Осветительное устройство W.R. Lake

пами. Сами протяженные полые световоды было предложено изготавливать из тонкой и прочной пленки из специальной пластмассы [8, 9]. В 1978 г. они же совместно с В.М. Пятигорским предложили и запатентовали [10] и реализовали на практике принципиально отличающуюся конструкцию плоских протяженных световодов клинообразной формы, позволяющих создавать большие светящие поверхности (рис. 6, *б*).

В этих патентах как бы подразумевалось, что действие зеркального отражающего слоя основано на металлическом характере отражения света, хотя все принципы работы запатентованных устройств полностью сохраняются и при других способах получения полностью переориентированного в пространстве пучка световых лучей (без его деформации) после многократных взаимодействий с конструкцией, ограждающей распространение света.

Отличительной особенностью работ, проведенных в эти годы сложившимся и длительно плодотворно работавшим творческим коллективом российских и украинских ученых и инженеров ВНИСИ, Киевского отделения УГПИ Тяжпромэлектропроект и ПО "Ватра" (г. Тернополь), являлось комплексное решение стоящих задач по исследованию, разработке, производству и применению устройств с протяженными полыми щелевыми световодами [11—27].

С этой целью были впервые разработаны теоретические методы расчетов, в том числе компьютерных, щелевых световодов и осветительных установок с ними [12—15], разработаны и внедрены в производство новые специальные материалы (полиэтилентерефталатные пленки) [16] и источники света с пускорегулирующей аппаратурой (металлогалогенные зеркальные лампы) [17], принципы конструирования систем с протяженными полыми световодами [18], методы и приборы для их фотометрирования [19], а также специальное технологическое оборудование [20] для их серийного производства. Все эти результаты были опубликованы более чем в 70 статьях и 20 патентах США, Германии, Японии, Великобритании, Франции, Италии и других стран, доложены на конгрессах МКО в Лондоне (1975 г.), Венеции (1987 г.), Мельбурне (1991 г.) и на конференциях Lux Europa (1997), Lux Pacifica (1998), Licht (1998), а также на общеамериканских конференциях в Балтиморе (1990 г.) и Сиэтле (1998 г.). Специальный выпуск журнала "Светотехника" (№ 11, 1981 г.) был

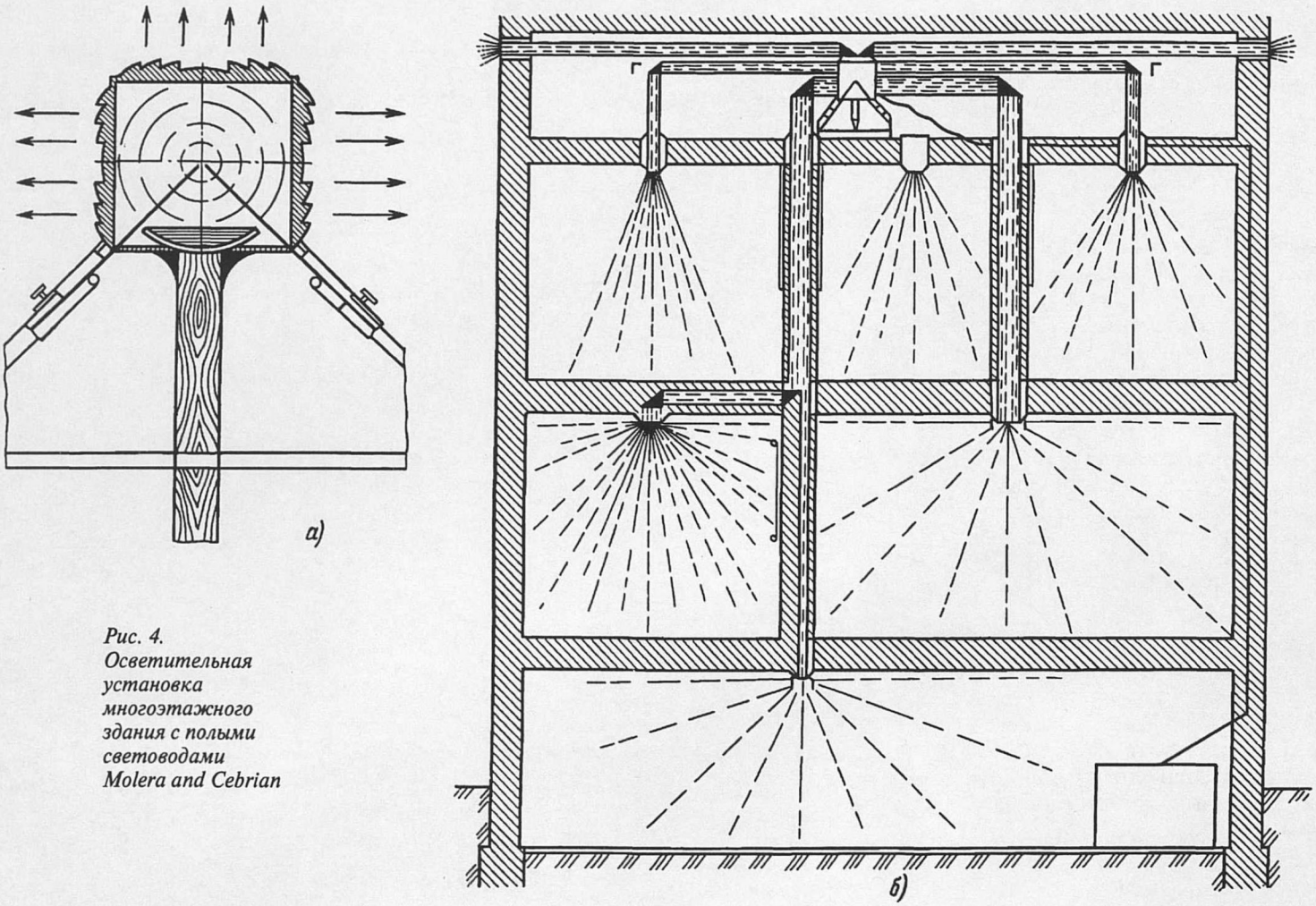


Рис. 4. Осветительная установка многоэтажного здания с полыми световодами Molera and Cebrian

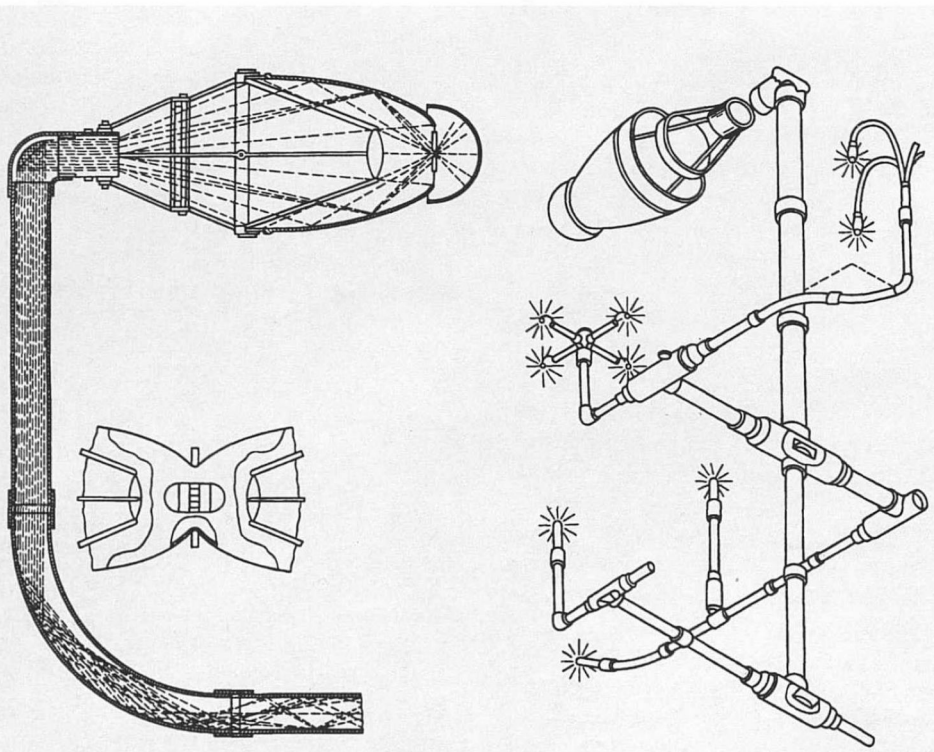


Рис. 5. Осветительное устройство W. Wheeler

посвящен комплексу выполненных работ по световодам.

Серийное производство осветительных устройств с полыми световодами было начато в 1980 г. на производственном объединении "Ватра" (Тернополь, Украина), за последующие годы было выпущено 42 тысячи комплектов щелевых световодов длиной 6 и 18 м, диаметром соответственно 275 и 600 мм с одной, тремя или четырьмя зеркальными металлогалогенными лампами мощностью по 700 Вт и оболочкой из тонкой (25—50 мкм) полиэтилентерефталатной пленки. Московским опытным светотехническим заводом было выпущено 5,0 тысяч комплектов световодов из экструдированного алюминия диаметром 140 мм и одной зеркальной лампой накаливания 300 Вт и цветным фильтром на выходе.

Осветительными устройствами со щелевыми световодами были освещены многочисленные цеха со взрывоопасными производствами (порохов, жидкого и твердого ракетного топлива), насосные станции нефтепроводов, химические предприятия. Кроме того, был освещен ряд крупных обще-

ственных зданий и станций метро [21—27], например уникальный выставочный зал павильона на ВДНХ (рис. 7 из статьи [25]).

Уникальная система "Heliobus" была спроектирована в России и реализована в Швейцарии для ввода и распределения с помощью световода солнечного излучения и света ламп в многоэтажном школьном здании [28].

Важно особо подчеркнуть, что разработанные принципы конструирования, основополагающие схемы систем с полыми протяженными световодами, выявленные области применения на основе выполненной классификации [29] легли в основу практически всех последующих разработок. Замена материала, источников света, частных конструктивных решений практически не меняли принципов разработки и использования протяженных полых световодов, а лишь конкретизировали и уточняли их. В этот же период во ВНИСИ были созданы и исследованы физическая и математическая модели осветительной установки многоэтажного здания с гелиостатами и системой полых клиновидных световодов, позволяющая вводить и распределять в здание как солнечный свет, так и свет искусственных источников [30].

В дальнейшем развитии полых световодов важную роль сыграло изобретение Л. Уайтхедом (Университет Британской Колумбии, Ванкувер, Канада) в 1981 г. призматических световодов, в которых использовался эффект полного внутреннего отражения света в продольных по отношению к оси световода призмах с углами 90° при вершинах [31]. Призматические световоды, отличаясь малыми потерями [32], обеспечивали высокоэффективное транспортирование света от вводного торца световода до выходного торца (рис. 6, *в*). Это изобретение получило путевку в жизнь в 1985 г. после создания Р. Аппельдорном и С. Коббом технологии изготовления рулонной призматической пленки марки SOLF (Scotch Optical Light Film) толщиной 0,5 мм на одном из предприятий фирмы 3М (Сент-Пол, США). Этот технологический процесс получил название "микрорепликация" и сыграл большую роль в дальнейшем развитии полых световодов.

В 1985 г. фирма TIR Systems, созданная Л. Уайтхедом и Р. Нодвелом, приступила к производству призматических полых световодов (с использованием SOLF) в основном длиной 6 м и диаметром 150 мм с металлогалогенной лампой 250 Вт в глубоком зеркальном параболоидном отражателе. К 1997 г. фирма TIR System изготовила более 15 тысяч комплектов таких световодов.

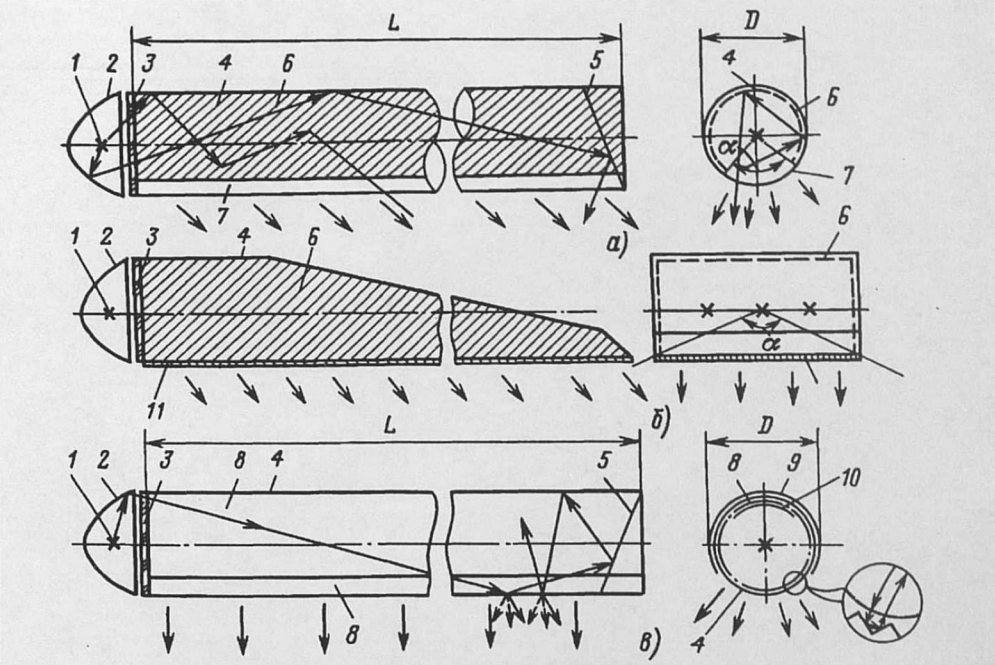


Рис. 6. Основные виды полых протяженных световодов:
а — зеркальный "щелевой световод"; *б* — зеркальный клиновидный "плоский световод"; *в* — призматический световод

Значительным этапом на пути развития полых протяженных световодов явился 1995 год, когда впервые под руководством Л. Уайтхеда в Вашингтоне были оборудованы две осветительных установки с призматическими световодами и новыми безэлектродными микроволновыми серными лампами фирмы Fusion Lighting (США) [34], имеющими высокую световую отдачу (130—140 лм/Вт), большой срок службы (60 тыс. ч) и великолепную цветопередачу.

За последние годы в разных странах оборудованы сотни новых осветительных установок с полыми световодами как для внутреннего, так и для наружного освещения. Световоды успешно применены для освещения туннелей, мостов, улиц и площадей, аэро- и метровокзалов, в производственных помещениях, надземных пешеходных переходах [23—27, 33—36]. Впервые в московском метро оборудована оригинальная осветительная установка не с прямолинейными, а с арочными щелевыми световодами, принципиально изменившими архитектуру станции и эксплуатацию установки [24].

В деле обобщения накопленного опыта, систематизации материала (терминологии, классификации, библиографии) и популяризации этого нового направления светотехники сыграла большую роль организация в 1994 г. по нашей инициативе, поддержанной фирмами 3М и TIR Systems, специального Технического Комитета ТК 3.30 в Международной Комиссии по Освещению (первоначально работавшего с 1992 г. в качестве репортерской группы R 3.07). 18 экспертов из 12 стран провели заседания в Нойссе (Германия), Стокгольме (1994), Вашингтоне (1995), Тродхайме (1997), Нагое (1998) и Ванкувере (1999) и подготовили проект публикации МКО по полым световодам и их применению.

В настоящее время сложилось практически два основных направления разработки и применения полых протяженных световодов: зеркальных "щелевых" световодов на основе использования металлического отражения от большей части внутренней поверхности световода (цилиндрические и плоские клиновидные световоды — рис. 6 *а*, *б*) и призматические световоды, основанные на использовании эффекта полного внутреннего отражения в призмах с углом при вершине 90°, покрывающих всю наружную поверхность такого световода (рис. 6, *в*).

Зеркальные "щелевые" световоды выпускаются 7 фирмами (России, Украины, Германии — 2, Испании, Бельгии, Великобритании). Призматические световоды производятся 9 фирмами (Канады, США, Германии, Италии — 2, Японии, Нидерландов, Швейцарии, Польши), при этом большая часть этих фирм — дочерние компании концерна 3М или фирмы, непосредственно связанные с 3М, выпускающим призматическую пленку SOLF. Наряду с этим ряд фирм использует полые световоды из диффузно или направленно-рассеянно пропускающего

Таблица

Сравнительные характеристики различных групп полых световодов

Основные характеристики	Группа световодов		
	Зеркальные щелевые	Призматические	Диффузные
1. Степень сложности конструкции световода, в т. ч. число составляющих элементов	Простая. 1 элемент — при оболочке из частично металлизированной светорассеивающей пленки, 2 элемента — при жесткой экструдированной светопропускающей оболочке и отдельном отражателе	Сложная. 3—4 элемента 3 элемента — защитная светопрозрачная оболочка, призматическая пленка и экстрактор, 4 элемента — то же, плюс отражатель	Простейшая. 1 элемент — диффузно светопропускающая труба
2. Относительная* длина L', в т. ч. эффективная для большинства случаев	30—40 30	40—100 40	10—15 15
3. КПД системы,** %	30—42	35—45	(20—25)
4. Соотношение яркостей ($L_н/L_к$) при одностороннем вводе света в начале и в конце световода**	4—6	~2	~(2—3)
5. Архитектурно-эстетические свойства	Недостаточная равномерность яркости для архитектурных объектов, вполне достаточная для функциональных установок и промышленных объектов	Практически равномерное распределение яркости по длине; эстетические недостатки — поперечные полосы через каждый метр, видимые дефекты изготовления и применения пленки	Практически идеальное распределение яркости для декоративных световодов и для архитектурных объектов

* Относительная длина L' равна отношению длины световода и его диаметру; ** По ориентировочной оценке.

материала (с большей долей рассеянного света), в основном для создания архитектурно-декоративных осветительных установок. Таких фирм сегодня три — в Германии и две в Италии. Всего 19 фирм из 13 стран мира выпускают полые световоды и число их непрерывно растет.

Нельзя не отметить достаточно неприятную для нас ситуацию с игнорированием отечественного приоритета в создании и развитии этого нового направления рядом фирм и патентных ведомств. Так, при анализе уровня техники при выдаче патентов Whitehead L. [31], Schreder I. [38] и ряду других значительно более ранние наши патенты не упоминаются и не противопоставляются, хотя по сути дела новые предложения являются частными решениями в развитие наших более общих запатентованных конструктивных идей. Фирма Schreder (Бельгия) не только выпускает в Бельгии и Испании плоский клиновидный световод под названием "Condulux", практически полностью подпадающий под действие нашего патента [10], но и продала на него лицензию английской фирме Simplex, которая также осуществляет их серийное производство. Фирма TIR выпускает вариант двустороннего световода, полностью соответствующий нашему патенту [7] без какого-либо упоминания об этом. Аналогичная картина с использованием в 1999 г. фирмой AEC Illuminazione (Италия) внутренних объемных экстракторов, впервые предложенных для призматических световодов в нашей работе [28], и широко опубликованной за рубежом, без какой-либо ссылки на авторов. К сожалению, в проекте публикации МКО все это не только не нашло должного отражения, но и делается попытка в интересах ряда фирм идеализировать призматические световоды за счет принижения зеркальных щелевых световодов, что, естественно, не может не вызывать возражений.

В такой ситуации необходимо разобраться с технико-экономически и эстетически целесообразной областью применения различных групп полых протяженных световодов, прояснить этот вопрос как для самих разработчиков, так и для потребителей этих новых и весьма прогрессивных изделий.

Обе основные группы полых протяженных световодов (в настоящей статье не рассматриваются крайне редко встречающиеся линзовые световоды, а также световоды, основанные на использовании многослойных интерференционных покрытий) базируются на применении специальных материалов с высоким коэффициентом отражения. В щелевых световодах в зависимости от требований к конструкции (относительной длины, угла раскрытия оптической щели, концентрации вводимого излучения, основного назначения) могут использоваться различные зеркально отражающие материалы: химически чистый напыленный алюминий ($\rho = 0{,}92$), рулонные алюминиевая объярченная фольга типа Miro ($\rho = 0{,}96$) или органический материал с поверхностью на основе серебра типа Silverlux ($\rho = 0{,}95$). При этом размеры этих материалов практически не ограничены, а сами материалы имеют широкую область применения, значительно превышающую по масштабам возможности использования их в световодах. Это делает эти материалы менее дефицитными и более дешевыми. Технология же их использования в световодах весьма проста. Эффективность призматических световодов в значительной степени определяется чистотой примененной пластмассы (отсутствие загрязнений и пузырьков воздуха в массе материала), ее коэффициентом преломления и, что очень важно, строгостью выполнения формы призм (особенно отсутствием технологических закруглений вершин призм). Эти условия в основном соблюдаются при изготовлении призматических пленок SOLF из поликарбоната ($\rho = 0{,}98$) по специальной технологии фирмы 3M "микроре-

пликация", которая используется только для световодов. При этом в настоящее время ширина рулона SOLF ограничена одним метром, через каждый метр по длине имеется шов, а стоимость исключительно высока.

Основные параметры рассматриваемых групп световодов, а также диффузных световодов без поверхностей с металлическим отражением и без призм, сведены в таблицу (данные таблицы весьма ориентировочны, т. к. параметры световодов сильно зависят от сочетания их многих физических характеристик и приведены по личной ориентировочной оценке автора). Из нее хорошо видно, что будучи наиболее сложными и дорогими, призматические световоды вне конкуренции при необходимости транспортировать свет на большие расстояния от входного торца до выходного торца, а также при необходимости иметь весьма протяженное устройство, светящее во все стороны равномерно. Во всех этих случаях не нужно использовать дополнительный отражатель вдоль световода для направления светового потока в одну сторону и не всегда необходим клиновидный экстрактор для обеспечения равномерного выхода потока по длине световода. Таким образом, в этих случаях конструкция призматического световода резко упрощается и удешевляется, свойства призматической пленки используются максимально в соответствии с ее основным назначением — транспортировать свет на максимальное расстояние с минимальными потерями. Идеальный вариант применения таких световодов — световые указатели направления движения транспорта на дорогах, световые ограждения и др., где требуются малые яркости на большой длине при малом диаметре световода. Важно отметить, что из-за того, что продольные призмы таких световодов всегда расположены вершиной наружу (по отношению к внутренней полости распространения света), для исключения их загрязнения или увлажнения, приводящих к потере светопроводящих свойств, призматическая поверхность всегда должна быть заключена внутрь дополнительной защитной светопрозрачной оболочки (например, трубы или пленки).

Стремление использовать призматический световод для общего равномерного освещения помещений и создания высоких уровней освещенности сталкивается со следующими трудностями: во-первых, необходимо вводить внешний по отношению к пленке отражатель, приводящий к снижению КПД и ухудшению внешнего вида световода. При этом использовать все преимущества призматической пленки оказывается невозможным по технико-экономическим соображением. Чтобы при большой длине световода, которую позволяет обеспечить призматическая пленка, создать необходимые высокие уровни освещенности, требуется ввести в световод исключительно большой световой поток. Такое решение возможно либо от группы мощных источников света, либо от сверхмощного одного излучателя. В первом, легко осуществимом, варианте нужно иметь световод диаметром 600—650 мм, что при существующей стоимости призматической пленки и ее ширине (как уже отмечалось выше, максимальная ширина рулона 1 м, при этом максимальный диаметр световода может быть 300 мм) делает такие световоды в настоящее время нереальными.

Конечно, в принципе можно себе представить конструкцию призматических световодов большого диаметра из нескольких полотен пленки SOLF или дальнейшее развитие технологии и оборудования для производства более широких рулонов. Однако в обозримое время это нереально. Поэтому спасительным для призматических световодов общего освещения стало появление серных безэлектродных микроволновых ламп со световой отдачей 130—140 лм/Вт и мощностью 1 кВт и выше. Однако и в этом случае возникают не только препятствия экономического порядка — высокая стоимость комплекта серной лампы с магнетронами, охлаждающими и пускорегулирующими устройствами и призматическими световодами, но и элементарные светотехнические ограничения в использовании световодов с большой относительной длиной, в которых и могли бы проявить себя основные достоинства призматической пленки.

Рис. 7. Осветительная установка выставочного зала павильона на ВДНХ, Москва (фото из статьи [25], в цветном исполнении публикуется впервые)

Речь идет о необходимости обеспечения заданных уровней освещенности при таких больших относительных длинах световодов.

Так, для равноценной замены светящей линии, состоящей из светильников с двумя люминесцентными лампами всего по 36 Вт (со световым потоком 3350 лм каждая), широко используемых в общественных зданиях и производственных помещениях, необходимый удельный световой поток на единицу длины линии (с учетом КПД = 0,8 или 0,6 для открытых с отражателем и перекрытых рассеивателем светильников) составляет 3350 (или соответственно 4467) лм/м. При замене открытых светильников с ЛЛ и условно одинаковом коэффициенте использования призматический световод диаметром 300 мм (КПД = 0,4) с серной лампой 1 кВт (140 000 лм) может иметь максимальную длину не более 12,5 м (т. е. относительная длина $L' = 41$), а при МГЛ 1000 Вт (90 000 лм) — 8 м, т. е. $L' = 27$.

При сравнении же со светильниками с рассеивателями эти цифры составляют соответственно 16,7 м ($L' = 55$) и 10,7 м ($L' = 36$).

В случае же замены линии светильников тех же исполнений с двумя лампами по 58 Вт, максимально возможная длина призматического световода составит 10,1 и 13,4 м (т. е. L' соответственно 33 и 48) при серной лампе, и 6,4 или 8,6 м при МГЛ 1000 (т. е. L' равно 21,6 и 28,7). Фактически эти значения будут еще меньше из-за меньших коэффициентов использования светового потока призматических световодов по сравнению со светильниками с отражателями.

Таким образом, мы видим, что для обеспечения необходимых уровней общего освещения с помощью призматических световодов невозможно использовать их основное свойство — иметь большие значения относительной длины, т. е. транспортировать свет на большие расстояния. Те относительные длины (20—40), которые, как правило, требуются для светотехнически адекватной замены линии светильников прямого света с люминесцентными лампами, могут быть реализованы с помощью несравнимо более простых зеркальных щелевых световодов прямого света.

С помощью зеркальных щелевых световодов значительно проще можно обеспечить наличие нескольких продольных оптических щелей, разную форму этих щелей, выполнение пунктирных щелей, а также использование различных фигур, букв, изображений и др. из зеркально-отражающих материалов на внутренней поверхности оболочки [23, 26, 36].

Важнейшими преимуществами световодов с большими диаметрами является возможность использования многоламповых вводных устройств, позволяющих резко повысить надежность работы осветительной установки, иметь несколько режимов работы с разным числом ламп, ввести резервирование источников света с постепенным включением дополнительных ламп (со временем работы) без подхода к вводным устройствам. И позволяют сделать это сегодня только зеркальные щелевые световоды. В нашей практике [11] мы широко использовали щелевые световоды с диаметром 650 мм и длиной 18 м ($L' = 28$) с четырьмя зеркальными металлогалогенными лампами мощностью по 700 Вт каждая (общая мощность 2,8 кВт и световой поток 224 тыс. лм), а также в экспериментальном порядке — с диаметром 0,9 м и длиной 54 м (при вводе света с двух сторон), т. е. при $L' = 30$). Оболочка этих световодов выполнялась из тонкой (25—50 мкм) полиэтилентерефталатной пленки, металлизированной в вакууме. Для низких помещений, для помещений с осколочным дроблением, сваркой, опасностью травматизма зеркальные щелевые световоды выполняются в жесткой ударопрочной экструдированной трубе из ПММА и ПК [36].

Вместе с тем, в зависимости от назначения освещаемого помещения, могут играть роль и другие характеристики световодов, прежде всего их эстетические свойства, определяемые внешним видом. Призматические световоды имеют значительно лучшую равномерность яркости при наибольших относительных длинах. С уменьшением длины при тех же диаметрах это преимущество нивелируется. Относительно короткие (4—5 м при условном диаметре 0,3 м) зеркальные или даже диффузные световоды имеют практически равномерную яркость.

Высокая равномерность яркости по длине — это весьма существенное преимущество призматических световодов в случае применения их в архитектурных установках при размещении на значительной высоте (6—10 м и более). При установке призматических световодов на более близком расстоянии (на высоте 3—5 м) хорошо видны эстетические недостатки этих изделий — поперечные технологические полосы через каждый метр длины световода, а также дефекты самой призматической поверхности. Для выпускаемых в настоящее время изделий характерны также "грязная" напросвет верхняя поверхность отражателя, большие формообразующие кольца, несущий сверху достаточно крупный монтажный профиль.

Зеркальные щелевые световоды, для которых при малых угловых размерах и направленно-рассеянном пропускании материала оптической щели характерен плавный спад яркости по длине световода, обеспечивают высокую равномерность распределения освещенности на освещаемой поверхности при отсутствии неприятного воздействия неравномерности яркости на глаз наблюдателя именно благодаря крайне незаметному и постепенному ослаблению яркости на большой длине. Дополнительное выравнивание распределения яркости происходит при двухстороннем вводе света, при уменьшении углового размера оптической щели, при введении более остро коллимированных световых пучков, при экранировании ближней зоны оптической щели от прямого света лампы.

Интересно отметить, что столь высокие требования к равномерности распределения яркости по световому прибору встречаются впервые, поскольку ни один из известных светильников (кроме, может быть, шара из молочного стекла) не имеет сколько-нибудь равноярких поверхностей. Плавное изменение яркости в линии световодов не всегда является недостатком, так как во многих случаях создает дополнительный световой ритм в осветительной установке при одностороннем и одинаковом расположении вводных устройств.

Относительно короткие диффузно-пропускающие световоды ($L' = 15$) при остро коллимированном световом пучке (с двойным углом 4—5°) и с зеркальным противоположным торцом обеспечивают высокий уровень равномерности яркости при относительно малом КПД, не играющим столь важной роли для уникальных и декоративных осветительных установок. Сказанное особенно относится к различного типа световым колоннам (с нижним расположением вводных устройств), все шире применяемым архитекторами. И это не такие уж малые световоды — при диаметре 400 мм световые колонны могут иметь высоту 6 м и более (такие устройства успешно работают в ряде установок Швейцарии и Италии). Кстати, впервые полые многощелевые зеркальные световоды были установлены вертикально в 1980 г. на ОТРК в Москве [37] и в пролете лестничной клетки крупного универмага также в Москве [26].

Представляются весьма перспективными всевозможные сочетания в све-

товодах поверхностей из рассматриваемых трех групп оптических материалов: зеркально и диффузно отражающих и преломляющих свет. На дальних участках труб зеркальных щелевых световодов могут успешно использоваться диффузно-отражающие повехности вместо зеркальных. В зеркальных щелевых световодах на определенных участках оптической щели может применяться призматическая пленка. В призматических вертикально расположеннных световодах квадратного сечения мы впервые [28] применили объемный диффузный экстрактор и получили весьма интересный оптический эффект, сегодня уже используемый другими фирмами.

В многоэтажном здании со световодом, пронизывающим ряд этажей и передающим во все стороны в поперечных плоскостях как прямое излучение солнца, так и свет искусственных источников, мы применили призматическую пленку, незаменимую в подобных случаях [28]. Вместе с тем, для освещения взрывоопасных цехов, насосных станций нефтепроводов, надземных переходов и многих других производственных помещений были широко и успешно использованы более простые и дешевые зеркальные щелевые световоды. Но не только в производственных целях и помещениях с временным пребыванием людей применяются зеркальные щелевые световоды. Освещение огромного выставочного зала [25] в Москве (длина 108 м, высота 24 м; рис. 7), станций метрополитена [23, 24], многоэтажного магазина [26] и др. наглядно показали возможности и достоинства новых систем освещения.

Таким образом, мы приходим к выводу о том, что с учетом технико-экономических и эстетических свойств, каждая из известных групп полых световодов имеет свою обоснованную область применения. При этом необходимо повторно подчеркнуть неуниверсальность систем со световодами, их особую область применения [29], которая, впрочем, весьма широка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чиколев В.Н.* Канализация электрического света/ Электричество. 1880. № 11. С.168; № 12. С.187.

2. *Neal M.T.* Transmitting Light, and Apparatus therefor. Patent USA N902, 1878.

3. *Lake W.R.* Lighting Apparatus for Mines, Tunnels, & Patent USA N2943, 1878.

4. *Molera, Cebrian* "The Engineer of the Pacific", 1879, N6.

5. *Wheeler W.* Apparatus for lighting dwellings or other structures. Patent USA N247.229, 1881.

6. *Бухман Г.Б.* Щелевой световод, Авт. Свидет. СССР № 181023, 1965.

7. *Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б. и др.* Взрывоопасный электрический светильник-световод, Авт. Свидет. СССР, № 468057, опубл. в Б.И. 1970.

8. *Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б.* "Interior Lighting fixture". United States Patent, N3. 902. 056, 26, 1975.

9. *Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б.* Установка для освещения помещений. Авт. свидет. СССР № 457365, 1974 г.

10. *Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б., Пятигорский В.М.* Lighting installation based on light guide. United States Patent N4.105.293.

11. *Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б., Пятигорский В.М.* Новый принцип внутреннего освещения осветительными устройствами со щелевыми световодами/ Светотехника. 1976. № 2. С. 1—5.

12. *Бухман Г.Б.* Основы расчета щелевых световодов/ Светотехника. 1970. № 10. С. 7—11.

13. *Бухман Г.Б., Прибытков В.А.* Светотехнические расчеты установок со щелевыми световодами/ Светотехника. 1981. № 11. С. 11—14.

14. *Коробко А.А., Кущ О.Г.* Расчет фотометрических характеристик щелевого световода методом Монте-Карло на ЭВМ/ Светотехника. 1979.№ 3. С. 9—11.

15. *Коробко А.А., Пятигорский В.М.* Расчет осветительных установок с плоскими световодами/ Светотехника. 1981. № 11. С. 15—17.

16. *Долгополова Л.Н., Дудина Е.И., Галкина Н.С., Левина Т.Г., Пятигорский В.М.* Новые зеркальные светорассеивающие пленки для щелевых световодов/Светотехника. 1981. № 11. С. 8—9.

17. *Софронов Н.Н., Кудаев В.П.* Источники света для щелевых световодов/Светотехника. 1981. № 11. С. 6—7.

18. *Айзенберг Ю.Б., Коробко А.А.* Влияние параметров щелевых световодов на их светораспределение/Светотехника. 1984. № 2. С. 3—6.

19. *Хазанов В.С., Шишов Д.М.* Способ и прибор для измерения светового потока щелевых световодов/Светотехника. 1981. № 11. С. 9—10.

20. *Рейхерт О.Б., Решетуха И.П.* Установка для изготовления каналов щелевых световодов/Светотехника. 1981. № 11. С. 26—27.

21. *Дикмаров В.Ф.* Опыт эксплуатации комплектных осветительных устройств со щелевыми световодами/Светотехника. 1987. № 12. С. 11—12.

22. *Брагин В.М.* Об опыте эксплуатации комплектных осветительных устройств со щелевыми световодами/Светотехника. 1981. № 11. С. 25—26.

23. *Айзенберг Ю.Б., Алешина Н.А., Пятигорский В.М.* Щелевые световоды на станции "Серпуховская" Московского метрополитена/Светотехника. 1986. № 7. С. 11—12.

24. *Айзенберг Ю.Б., Алешина Н.А., Пятигорский В.М.* Освещение арочными световодами станции "Чкаловская" Московского метрополитена/Светотехника. 1996. № 7/8. С. 5—7.

25. *Григоричев В.Е., Икоева Е.П., Коробко А.А., Пятигорский В.М.* Щелевые световоды в новом павильоне на ВДНХ СССР/Светотехника. 1988. № 3. С. 16—17.

26. *Тульчин И.К., Халковский Д.А., Шайхет А.А.* Освещение торговых залов московского универмага "Вешняки"/Светотехника. 1986. № 6. С. 6—8.

27. *Сиваковский А.В., Шехтер А.П.* Осветительная установка со щелевыми световодами в термоконстантном цехе/Светотехника. 1988. № 5. С. 1—3.

28. *Айзенберг Ю.Б., Буоб В., Зигнер Р., Коробко А.А., Пятигорский В.М.* Система совмещенного освещения школьного здания солнечным и искусственным светом/Светотехника. 1996. № 8. С. 8—19.

29. *Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б., Коробко А.А.* Область эффективного применения и классификация осветительных устройств с полыми световодами/Светотехника. 1996. С. 13—18.

30. *Aizenberg J.B., Korobko A.A., Pyatigorsky V.M., Tereshkevich S.G.* Efficiency estimates for solar lighting Systems using planar Light Pipes. Proceedings of Intern. Conf. "Daylighting 90", 1990.

31. *Whithead L.A.* Prism Light Guide Having Surfaces which are in Octature. Canadian Patents and Development. 1981/ N4.260.220.

32. *Айзенберг Ю.Б., Коробко А.А.* Полые световоды на основе призматической пленки полного внутреннего отражения //Светотехника. 1994. № 4. С. 4—10.

33. *Aizenberg J.B., Korobko A.A.* Hollow lightguides based on prismatic total internal reflection film. Light and Engineering 1994, VI, N 2, p. 14—20.

34. *Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б., Коробко А.А., Пятигорский В.М.* Новый этап развития полых световодов/Светотехника. 1995. № 4/5. С. 7—9.

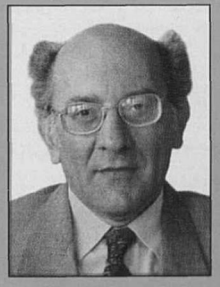
35. *Нашимура.* Новая система освещения шоссе призматическими световодами/Светотехника. 1997. № 2. С. 8—11.

36. *Айзенберг Ю.Б., Альберт Д., Корягин О.Г., Радде У.* Архитектурно-функциональная система освещения пешеходного мостового перехода через МКАД щелевыми световодами/Светотехника. 1997. № 1. С. 4—8.

37. *Зиливинский Д.Б., Тихонова Г.А.* Освещение Олимпийского телерадиокомплекса/Светотехника. 1980. № 11. С. 4—6.

38. *Schreder F.* Systeme d'eclairage a sources intenses de faibles dimensions/ EP 0032 273 B1, 1980.

39. *Комплексные* осветительные устройства типа КОУ со щелевыми световодами. Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б., Касперский Б.Т. и др.// Светотехника. 1981. № 11. С. 20—23.



***Айзенберг Юлиан Борисович,** доктор технических наук, профессор, окончил МЭИ в 1954 году, академик АЭН РФ, главный редактор журнала "Светотехника", заведующий лабораторией ВНИСИ, генеральный директор Дома света*