

составить приблизительно пять лет, а то и меньше.

## 9. Проекты будущих тоннелей

Подводя итог всему изложенному выше, мы рекомендуем, чтобы вариант с использованием дневного света учитывался на начальной стадии проекта любого нового тоннеля. Будет предпочтительно, если период окупаемости и особенности проекта оправдают именно данное решение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CIE Publication 88-1990. Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses.

2. Ne'eman E. 2002. Daylight Availability Data Base. Average hourly values of daylight illuminance measured at the Meteorological Service Center at Bet Dagan. Israel (Lat. 32°00' N, Long. 34°49' E).



**Аврахам Литманович (Avraham Litmanowicz), инженер-электрик, консультант по освещению, г. Иерусалим**



**Ильяху Нейман (Eiahu Ne'eman), доктор наук, профессор факультета архитектуры и городского планирования Израильского института технологии. Президент светотехнического общества Израиля, известной деятель МКО**



**Йонатан Шилони (Yonatan Shiloni), архитектор фирмы «Joelle and Johnatan Shiloni» г. Хайфа**

# Экономия затрат при использовании полых световодов в безоконных частях зданий

Д. ДЖЕНКИНС, Т. МУНИР

Инженерная школа Университета Напир, Эдинбург, Великобритания\*

Работа трубчатых световодов естественного света рассматривалась в работах [1, 2], но действительная экономия энергии, связанная с ними (от уменьшения использования электрического освещения) и результирующее снижение загрязнения окружающей среды исследованы гораздо меньше. Количественно оценивая эти факторы и рассматривая преимущества использования естественного света, можно продемонстрировать общие преимущества использования трубчатых световодов естественного света. Концепция оценки, таким образом, будет включать экономические, природоохранные и эстетические преимущества трубчатых световодов. Это исследование является частью программы МКО ТКЗ-38, которая занимается стоимостью и оценкой световодного освещения.

## 1. Вступление

Традиционно окна широко использовались для естественного освещения зданий. Однако главным препятствием использования окон в зданиях было то, что работа окон ограничивалась наружными природными и созданными человеком затеняющими факторами. В качестве решения предлагались окна больших размеров, для того чтобы обеспечить компромисс недостатку падающего дневного света из-за этих затеняющих факторов. Тем не менее, это может вызывать тепловой, зрительный и акустический дискомфорт. В последние десятилетия в области устройства окон произошли драматические изменения. Появление многослойного остекления с низкоэмиссионным покрытием, защищающим от инфракрасных лучей, газонаполненных стеклопакетов и изолирующих переплетов в значительной степени улучшили теплозащитные, звукоизоляционные и светотехнические качества окон. Но применение этой новой техники все еще стоит дорого. Кроме того, существ-

уют обстоятельства, когда окна не могут быть использованы для естественного освещения. Например, во внутренних помещениях широких зданий или в коридорах внутри зданий, куда естественный свет от окон не может попасть, окна применить нельзя.

Трубчатые световоды являются способом доставки естественного света в глубинные зоны зданий, куда естественный свет не может попасть другим способом. Сама труба (в данном исследовании отражающая алюминиевая поверхность с коэффициентом отражения 96%, которая использует многократные отражения для передачи света по всей ее длине) использует в качестве источника как диффузный свет неба, так и прямой свет солнца, оптимизируя, таким образом, имеющийся естественный свет для внутреннего освещения.

Основная цель расчетов, выполненных в настоящем исследовании, — показать стоимость и экологические преимущества, связанные с использованием трубчатых световодов естественного света. В частности, они должны быть проведены таким образом, чтобы пользователь световодов убедился в их преимуществах, будь он строителем офиса или владельцем частного дома. Это следует особо подчеркнуть, т.к. в Великобритании электроэнергия относительно дешева. Поэтому часто может быть трудно оправдать снижение потребления электроэнергии, особенно если начальная стоимость световодов достаточно высока. Однако, рассматривая эту начальную стоимость в контексте с длительными сроками эксплуатации и показывая, как в течение этого срока изменится загрязнение окружающей среды, проще показать важность уменьшения электрического освещения.

Подсчитывая экономию энергии, необходимо отметить следующее. Во-первых, чтобы определить уровни освещенности от световодов, необходимо создание расчетных моделей для описания самих световодов [2]. Кроме того, нужно быть уверенным, что кон-

Перевод с англ. А.К. Соловьева.

\* School of Engineering, Napier University, Edinburgh EH10 5DT, UK.

фигурация световода будет подходящей для выполнения поставленных задач. Используя соответствующую литературу, можно определить уровень электрического освещения и затраты на него. Также можно с помощью существующих методов определить уровень загрязнения окружающей среды за счет использования электрического света. В то же время необходимо показать снижение загрязнения, являющегося результатом использования световодов естественного света вместо электрического освещения. Рассмотрим типичное рабочее место в помещении офиса площадью  $15 \text{ м}^2$ .

Также важно отметить, что основным является количественное определение преимуществ, связанных с использованием световодов. Они включают отмеченные в процессе эксплуатации преимущества, связанные со здоровьем пользователей и с производительностью труда. Все эти факторы формируют часть исследований, планируемых МКО, ТКЗ-38.

## 2. Эффективность естественного света, наблюдаемая в натуральных условиях

Исследования показали, что естественный свет оказывает важное влияние на химию человеческого мозга. Свет, попадая через глаз, стимулирует нервные центры в мозгу, контролирующие дневные ритмы и настроение. Предполагали, что люди предпочитают окружающую среду при естественном свете [3] и могут поправляться после операций и болезней быстрее, если помещение освещается естественным светом, и из которого есть вид наружу [4]. Сообщается, что студенты, занимающиеся в классах, освещенных большими дозами естественного света, показывают более высокие успехи и имеют более крепкое общее здоровье [5].

Также проводились исследования для определения соотношения между количеством сезонных психофизиологических расстройств (СПР) и уровнями освещенности. СПР — это расстройство настроения и поведения, которое отражает некоторые сезонные изменения, наблюдаемые у низших млекопитающих. СПР, как полагают, зависит от уменьшения солнечного света в зимние месяцы.

Все эти факторы дают общую картину возможных преимуществ использования трубчатых световодов естественного света. Можно сказать, что они не-

которым образом предположительно (и все они являются преимуществами, которые могут быть приписаны также и обычным окнам и обычным фонарям верхнего естественного освещения). Часто только статистика убеждает обычных людей, почему стоит затратить деньги на какое-либо приобретение. Приведенные ниже расчеты продемонстрируют это положение.

## 3. Загрязнение окружающей среды, связанное с электрическим освещением

Полезно связать снижение потребления электроэнергии с выбросом вредных загрязняющих веществ в атмосферу. Проблема глобального потепления, кислотных дождей и снижения чистоты воздуха в последние годы стала объектом пристального внимания общественности. Хотя эти вредные эффекты хорошо известны как внутри, так и за пределами научного сообщества, прямая связь энергопотребления отдельного субъекта с этой проблемой до сих пор является менее определенной. Люди не чувствуют ответственность за загрязнение окружающей среды, которое они производят. При формировании количественной связи между использованием электрического освещения и эмиссией вредных газов (при соответствующем производстве электроэнергии), человек получит больше информации относительно того влияния, которое они оказывают на окружающую среду.

Три основных загрязнителя, связанных с производством электроэнергии на жидком топливе — это диоксид углерода, диоксид серы и диоксид азота. Конечно, имеются и другие загрязнители (особенно другие соединения углерода типа окиси углерода), но только эти три вещества будут рассмотрены в этом исследовании.

Используя данные, относящиеся к уровню загрязнителей, соотнесенные с уровнем производства энергии, возможно количественно определить ущерб, который наносит наше использование электрической энергии окружающей среде.

Вейр и Мунир [6] описали следующие уровни загрязнения при использовании электроэнергии в Соединенном Королевстве (для электростанций, работающих на жидком топливе):

$$\text{Эмиссия } \text{CO}_2 = 800 \text{ г/кВт,}$$

$$\text{Эмиссия } \text{SO}_2 = 10,0 \text{ г/кВт,}$$

$$\text{Эмиссия } \text{NO}_2 = 3,4 \text{ г/кВт.}$$

Рубин и Дэвидсон показали [7], что соответствующие уровни в США составляют:

$$\text{Эмиссия } \text{CO}_2 = 1030 \text{ г/кВт,}$$

$$\text{Эмиссия } \text{SO}_2 = 5,32 \text{ г/кВт,}$$

$$\text{Эмиссия } \text{NO}_2 = 3,51 \text{ г/кВт.}$$

Разница между цифрами для Великобритании и США может быть вызвана разницей в эффективности производства электроэнергии в этих странах или тем, что цитируемые статьи были опубликованы с разницей по времени в 3 года (кроме того, данные, на которые опирались авторы, были получены разными методами). Тем не менее оба набора цифр были использованы для создания гипотезы уровней загрязнения, связанных с энергопотреблением. Следует отметить, что эти цифры относятся только к электростанциям на жидком топливе — это будет достаточно точная аппроксимация для общего производства энергии в Великобритании и США, т.к. «возобновляемые» источники энергии в этих странах дают относительно небольшую часть общего количества энергии.

Эта информация теперь может быть использована, если мы рассчитаем потребление энергии для типичного сценария.

## 4. Расчеты потребления энергии

Следующие расчеты проведены на примере офиса в Соединенном Королевстве, площадью  $15 \text{ м}^2$ . Из [8] проектная освещенность для офисных помещений составляет 425 лк. Офис с проектной установленной мощностью в  $15 \text{ Вт/м}^2$  (также отмеченной в [8]) будет расходовать энергию в кВт:

проектная нагрузка равна электрической нагрузке на единицу площади, умноженной на площадь помещения =  $0,015 \text{ кВт/м}^2 \times 15 \text{ м}^2 = 0,225 \text{ кВт}$ .

Для определения годовых затрат электроэнергии необходимо знать количество часов использования электрического освещения за год. В качестве приближения предполагаем, что офис будет использоваться в течение 50 недель в году, пять дней в неделю и восемь часов в день (т.е. с 9 утра до 5 вечера). Это составит 2000 часов в год. Используя проектную нагрузку в 0,225 кВт для освещения рассматриваемой комнаты, это даст нам 450 кВт-ч/год.

Следующим шагом будет определение конфигурации световодов, которые необходимы, чтобы осветить ту же самую комнату в дневное время.

Таблица 1

**Расчетные величины загрязняющих выбросов вследствие  
освещения офиса (кг/год)**

Страна	Загрязняющие выбросы в случае, если электрическое освещение работает в течение всего светового дня			Загрязняющие выбросы, когда освещение днем обеспечивается световодами естественного света		
	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
Великобритания [10]	360,0	4,50	1,53	165,6	2,07	0,70
США [11]	463,5	2,39	1,58	213,21	1,10	0,73

Таблица 2

**Расчетное сокращение выбросов, энергопотребления  
и стоимости электроэнергии за год при использовании световодов  
в рассматриваемом офисе (в дневное время)**

Страна	Снижение выбросов при использовании световодов (кг/год)			Снижение потребле- ния энергии (кВт-ч/год)	Снижение стои- мости затраченной электроэнергии (фунтов в год)
	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>		
Великобритания [10]	194,4	2,43	0,83	243	20,17
США [11]	250,3	1,29	0,85		

### 5. Конфигурация световодов

Прежде чем решить вопрос о конфигурации световодов, необходимо определить величину наружной освещенности для Великобритании. Наружная освещенность в 30 клк (которая бывает в условиях пасмурного небалетом и ясного неба зимой) в Великобритании можно ожидать в течение 30% **всего** дневного времени (от восхода до заката) [9]. Это будет расчетным условием для большинства часов работы офиса.

Для офиса, чтобы достичь приблизительно 425 лк (как того требуют стандарты CIBSE, теперь SLL0), может быть выбрана конфигурация из двух трубчатых световодов диаметром 530 мм и длиной 1,5 м). Модель «люксплот», использованная в настоящем исследовании, дает уровни освещенности, показанные на рис. 1, на уровне 1,5 м под потолком при наружной освещенности в 30 клк. Более ранняя версия этой модели описана в отдельной статье [2], хотя форма в уравнении 1 слегка модифицирована для того, чтобы представить горизонтальное распределение света более точно. Полное соотношение будет иметь следующий вид:

$$E_i = (0,494) E_{ex} \tau \pi r^2 \cos^4 \theta / V^2,$$

где  $E_i$  — внутренняя освещенность,  $E_{ex}$  — наружная освещенность (обе в лк),  $\tau$  — светопропускание трубы световода (она является функцией разме-

ров трубы и исследована в уже упомянутой работе [2]),  $r$  — радиус трубы,  $\theta$  — угол между вертикальной линией от диффузора и линией, соединяющей центр диффузора с рассматриваемой точкой, и  $V$  — вертикальное расстояние от диффузора до рассматриваемой плоскости.

Средняя освещенность по поверхности в 15 м<sup>2</sup> на рисунке составляет 468 лк и может считаться достаточной для описанного сценария (модель предполагает, что даже если трубы будут длиной 2 м, то проектная освещенность еще может быть достигнута при данной конфигурации).

Следует отметить, что многие офисы освещаются окнами, а это игнорируется в данных вычислениях. Оправданием этому является то, что хотя добавление окон снизит стоимость и величину электроосвещения в течение дня, это будет также означать, что меньшее количество или меньшие диаметры световодов могут быть использованы (если эти окна дают естественную освещенность). Это снизит начальную стоимость установки световодов естественного света. Другими словами, окна снизят стоимость обоих видов освещения, так что игнорирование окон не изменит сути приведенных расчетов, по меньшей мере в соотношении величин эксплуатационных затрат.

Как уже было отмечено, данные на рисунке приведены для 30 клк наруж-

ной освещенности, и эти освещенности будут иметь место в 30% дневного времени в году, что составляет 921 час (при 4487 дневных часах в год [10] с вычетом часов, когда офис не будет эксплуатироваться в конце недели и две недели в году). Другими словами электроосвещение может быть выключено в течение 921 часа в год (так, что время использования искусственного света составит 1079 час вместо 2000 часов), если в рассматриваемом помещении будут установлены световоды. Затрачиваемая на освещение электроэнергия теперь будет снижена до 207 кВт-ч/год.

### 7. Расчет экономии средств

В экономической литературе отмечается [11], что капитальные затраты на электрическое освещение офисов должно составлять 35 англ. фунтов на м<sup>2</sup>. Для офиса площадью 15 м<sup>2</sup> общие капитальные затраты составят 525 фунтов. При ранее рассчитанном энергопотреблении в 450 кВт-ч/год для офиса, освещаемого только электрическим освещением, можно определить что стоимость электроэнергии за год составит 37,36 фунтов (предполагая стоимость электроэнергии 7,22 пенса за киловатт, соответственно данным коммунального департамента и добавляя налог на охрану окружающей среды в 15% за электроэнергию).

Если в офисе использованы световоды с конфигурацией как на разрезе рис. 4, стоимость электроэнергии на освещение будет снижена до 17,19 фунтов в год (что основано на более низком энергопотреблении в 207 кВт-ч/год и с учетом налога в 15%). Тем не менее, капитальные затраты на устройство световодов при плоской кровле составят 640 фунтов (по данным производителя по его спецификациям). Если электрическое освещение будет таким же, как и в предыдущем расчете (для обеспечения освещения в течение всего дня), то в этом случае капитальные затраты составят 1365 фунтов.

При экономии текущих затрат в 20,17 фунтов в год и 840 фунтах, использованных на покупку и установку световодов, эта система окупится примерно через 41 год — очень долгий срок окупаемости. Тем не менее, этот пример не учитывает некоторые факторы, которые могут снизить этот срок окупаемости. Например, предполагалось, что электрическое освещение будет использоваться при наружной

244	315	328	287	246	246	287	328	315	244	<b>Внешняя освещенность, лк</b>	<b>3·10<sup>4</sup></b>
403	558	575	459	358	358	459	575	558	403	<b>Диаметр трубы, м</b>	<b>0,53</b>
550	809	828	615	447	447	615	828	809	550	<b>Длина трубы, м</b>	<b>1,5</b>
550	809	828	615	447	447	615	828	809	550	<b>Вертикальное расстояние, м</b>	<b>1,5</b>
403	558	575	459	358	358	459	575	558	403	<b>Средняя освещенность, лк</b>	<b>468</b>
244	315	328	287	246	246	287	328	315	244	<b>Средняя величина КЕО, %</b>	<b>1,56</b>

Расчетные уровни освещенности на площади 15 м<sup>2</sup> (3 x 5 м) на высоте 1,5 м ниже уровня потолка от двух световодных труб диаметром 0,53 м, длиной 1,5 м. В качестве расчетной принята наружная освещенность 30 клк

освещенности меньше 30 клк. Если использовать интегрированную систему, где при более низких уровнях наружной освещенности будет работать дополнительное искусственное освещение, то можно получить большую экономию электроэнергии и снизить срок окупаемости системы. Так, например, автоматический регулятор может изменить степень использования электрического освещения за световой день. Таким образом, даже при низких освещенностях световодные трубы естественного света обеспечивают некоторую экономию стоимости электроэнергии для рассматриваемого офисного помещения.

Кроме того, тот факт, что световоды использованы в офисе, где работа идет в основном в дневные часы, означает, что будет использовано меньше электрического освещения и капитальные затраты будут меньше (срок окупаемости будет снижен). Поэтому срок окупаемости в 41 год можно считать максимальной величиной, которая может быть снижена при хорошем проектировании офиса.

Также ничего не означает тот факт, что электроэнергия, произведенная с помощью солнечных фотобатарей, имеет даже еще больший срок окупаемости. Такие большие величины типичны для новых технологий, где относительно малая конкуренция и высокие производственные затраты могут в результате приводить к высоким ценам на продукт (и тем самым увеличивать срок его окупаемости). Однако если световоды получают более широкое распространение, то увеличивающаяся конкуренция, которую можно в этом случае ожидать (из-за увеличения числа поставщи-

ков-производителей) снизит капитальные затраты на световоды и, соответственно, срок их окупаемости.

Имеются также последние предположения, что проектные уровни естественной освещенности могут быть ниже, чем уровни искусственной освещенности. Если такие утверждения справедливы, то можно использовать меньшие, а следовательно более дешевые трубчатые световоды. Однако это положение на текущий момент еще является сомнительным.

## 8. Снижение загрязнений окружающей среды

Уровень загрязнений, производимых за счет освещения офиса электрическим освещением и при использовании световодов, может теперь быть получен умножением величин выбросов загрязняющих веществ (на кВт, см. раздел 3) на 450 кВт-ч/год и на 207 кВт-ч/год соответственно. Результаты этих расчетов приведены в табл. 1.

В результате подсчитаем экономию, которая может быть получена для этого маленького офиса (табл. 2). Цифры относятся только к рассматриваемому офису и учитывают электрическую энергию, которая связана с рассматриваемыми системами освещения (как рекомендовано в приведенных в ссылках указаниях). Если использовать полностью интегрированную систему, где электрический и дневной свет работают совместно, то это снижение загрязнений может быть еще более значительным. Системы с сенсорами, которые изменяют искусственную освещенность в зависимости от естественной освещенности, обеспечивают оптимальное решение.

## 9. Заключение

Приведенные в настоящей статье расчеты использованы для количественной оценки экономических и экологических преимуществ, которые могут быть обеспечены при установке световодных труб естественного света в типичном офисе (площадью 15 м<sup>2</sup> без окон). Сбережение текущих затрат на освещение этого офиса, связанное с использованием электроэнергии, определено в 20,17 фунтов в год. Однако сами световоды будут стоить дополнительно 840 фунтов. Получаем большой срок окупаемости в 41,5 года. Этот период может быть значительно снижен, если запроектировать интегрированную систему использования даже низких уровней естественной освещенности для дополнения электрического освещения (рассмотрено детально в различных исследованиях [12, 13, 14]). Эти цифры взяты в сравнение с фотоэлектрическими батареями, т.е. другой появившейся устойчивой технологией, которая пока также имеет большой срок окупаемости.

Срок окупаемости, это только один из путей оценки использования световодов. Здание, которое использует естественный свет, имеет и другие преимущества. Их следует отметить.

Снижение загрязняющих выбросов в атмосферу (снижение энергопотребления с использованием световодов) при освещении офиса показывает другой подход для оценки световодов. Эти сведения полезны для того, чтобы показать пользователям, как их действия могут быть напрямую связаны (количественно) с загрязнением, угрожающим нашей окружающей среде. Они дают действительные цифры



(хотя и оценочные), которые могут быть использованы в гармонии с более предположительными элементами действия естественного света (относительно здоровья и производительности труда), чтобы продемонстрировать потенциальные преимущества использования световодов естественного света. Полное исследование этой проблемы должно быть выполнено в рамках планов МКО ТК3-38.

Это исследование предполагает, что световоды естественного света, описанные здесь, не могут быть оправданы только с помощью экономических аргументов (основываясь на большом сроке окупаемости современных капитальных затрат на световодные трубы). Однако настоящая цена их применения становится более очевидной, если принять во внимание такие факторы, как преимущества естественного света для здоровья людей и снижение загрязнения окружающей среды за счет замены электрического освещения.

При более широком распространении световодов можно предположить, что капитальные затраты снизятся, и при повышении эффективности процесса производства световодов сроки их окупаемости станут более мощным аргументом в деле внедрения этих устройств в практику естественного освещения зданий.



**Тариг Мунир (Tarig Muneer),** профессор в области энергетики в Напьерском университете, председатель Эдинбургской группы «Энергетика в зданиях», международный эксперт в области использования

солнечного излучения и моделирования естественной освещенности



**Давид Дженкинс (David Jenkins),** окончил Лондонский университет по специальности физика и астрономия в 2001 г., работает в области промышленного изготовления солнечных батарей

и элементов, заканчивает научную работу для получения степени доктора философии в 2004 г.

## Освещение начальной школы в Прени-Шамбези, Женева

Д. ДЕМЕТРИАДИС, С. СИМОС\*

Швейцарский университет прикладных наук западной Швейцарии\*\*

Прени-Шамбези — это жилой пригород Женевы. Существенное увеличение населения привело к необходимости строительства новой начальной школы.

Здание проектировала архитектурная фирма Д. Деметриадес & Д. Пападаниэль, оно имеет 8 классных комнат, 2 зала для внеклассных занятий, школьную столовую и муниципальную библиотеку. Здание построено рядом с небольшим парком и использует естественный уклон местности с 2 уровнями, имеющими прямой доступ с внешней стороны, образуя верхний и нижний первые этажи.

\* Перевод с английского Е.Н. Чернышовой.  
\*\* E-mail: [simon.simos@simos.ch](mailto:simon.simos@simos.ch)

По длинной стороне первого этажа расположено 4 помещения шириной 10 м каждое, образующие классные комнаты размером 10x10 м. По короткой стороне здания расположено 3 помещения, которые представляют собой учительскую, прогулочные площадки (разделенные по вертикали и горизонтали) и вспомогательные помещения (вход, раздевалка, туалет и т.д.).

Проект 2-х низких этажей (верхний и нижний первые этажи) одинаков. Проект третьего уровня (второго этажа) включает в себя учительскую и вспомогательные помещения, расположенные в противоположной стороне относительно первого этажа. Таким образом, обеспечивается наружная крытая пло-



хия. / . Вид здания



Рис. 2. Северо-восточный фасад. Большие светопроемы в крыше для освещения абонементных зон второго этажа



Рис. 3. Встраиваемые в пол светильники с узкого светораспределения освещают потолок в ночное время