

# Измерение на месте фотометрических характеристик бетонного дорожного покрытия прибором COLUROUTE<sup>1</sup>

В. МЮЗЕ<sup>1,3</sup>, Ж. АБДО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Компания *Cerema Est / Laboratoire de Strasbourg*, Страсбург, Франция

<sup>2</sup> Ассоциация *Cimbeton*, Париж, Франция

<sup>3</sup> E-mail: valerie.muzet@cerema.fr

## Аннотация

Стандартным инструментом, используемым для описания фотометрических характеристик дорожных покрытий, служат таблицы значений редуцированного показателя яркости (или *r*-таблицы), которые были составлены МКО в семидесятых годах прошлого века. Так как эти таблицы уже не отражают реальные характеристики дорожных покрытий, то для оптимизации осветительных установок и обеспечения требуемых уровней и равномерности яркости необходимо проводить измерения фотометрических характеристик дорожных покрытий. Целью настоящей работы было определение на месте фотометрических характеристик различных бетонов в зависимости от времени их эксплуатации. Первый эксперимент был проведён неподалёку от цементного завода применительно к двум разновидностям бетона (обработанного щёткой и обработанного струёй воды). Фотометрические характеристики этих покрытий измерялись при помощи портативного рефлектометра COLUROUTE на протяжении трёх лет. Выбранная обработка поверхности была реализована в тоннеле, и фотометрические характеристики покрытий измерялись на протяжении 30-ти месяцев. Было показано, что бетонные покрытия являются более диффузными и светлыми, чем классические дорожные покрытия, и их применение может привести к существенной экономии энергии.

**Ключевые слова:** бетон, экономия энергии, наружное освещение, фотометрирование дорожных покрытий, портативный рефлектометр.

## 1. Введение

Проектирование осветительных установок предполагает учёт конкретных геометрических параметров и фотометрических характеристик источников света, так и дорожного покрытия. При известных фотометрических характеристиках дорожного покрытия проектирование осветительных установок можно оптимизировать применительно к расположению осветительных приборов и энергосбережению. Для описания отражательных свойств дорожных покрытий, служат таблицы значений редуцированного показателя яркости (или *r*-таблицы) [1, 2]. Для упрощения расчётов произведена классификация на основе показателя зеркальности (*specularity coefficient*)  $S_l$ . Соответствующие стандартные таблицы были составлены МКО. При этом МКО рекомендует масштабировать выбранную таблицу в соответствии с измеренным значением показателя освещённости  $Q_0$  [2]. Так как фотометрические характеристики, как правило, неизвестны, то при проектировании освещения используется одна стандартная *r*-таблица без какого бы то ни было масштабирования [3]. А это приводит к суще-

ственным ошибкам [4, 5]. Более того, исследования показали, что большое значение имеет изменение фотометрических характеристик во времени и что эти таблицы уже не являются характерными [6, 7]. В связи с этим, для оптимизации осветительных установок и обеспечения требуемых уровней и равномерности яркости необходимо проводить измерения фотометрических характеристик дорожных покрытий.

Считается, что бетонные покрытия являются более диффузными и светлыми, чем классические дорожные покрытия [8]. Цель данной работы состояла в определении фотометрических характеристик бетонных покрытий в зависимости от срока их эксплуатации, сравнении результатов полевых и лабораторных измерений и расчёте возможной экономии энергии. Эта работа проводилась в рамках 6-летнего договора о сотрудничестве между французскими ассоциациями производителей цементных и бетонных дорожных покрытий *CIMBETON* и *SPECBEA* и компанией *Cerema*, которая отвечала за проведение измерений и технических оценок.

## 2. Материал и методы

### 2.1. Введение в дорожное освещение

*r*-таблица представляет собой двухмерную таблицу с рядом стандартизированных сочетаний угла падения света  $\gamma$  и угла отклонения  $\beta$ , границы которых определяют собой телесный угол  $\Omega$  (рис. 1а). Угол наблюдения  $\alpha$  задаётся равным  $1^\circ$ , что соответствует водителю, смотрящему с расстоя-

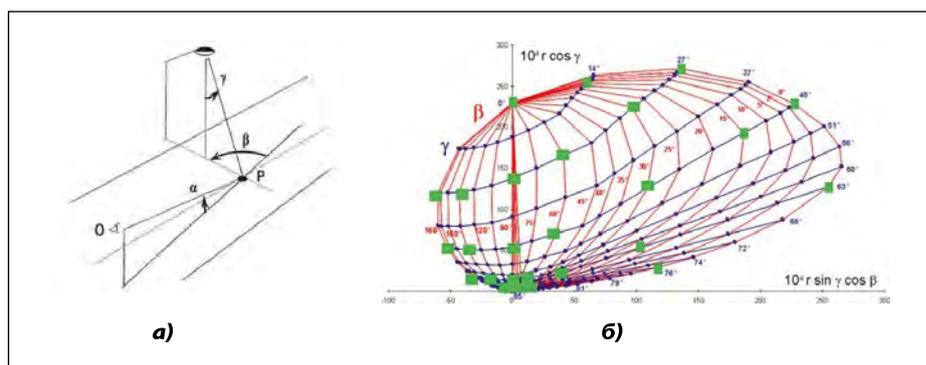


Рис. 1. а – значения фотометрических характеристик дорожного покрытия зависят от углов наблюдения ( $\alpha$ ), отклонения ( $\beta$ ) и падения ( $\gamma$ ) (согласно [2]). О – водитель, Р – точка наблюдения; б – индикатриса отражения дорожного покрытия. Углы отклонения  $\beta$  обозначены красным цветом, углы падения  $\gamma$  – синим цветом, а положение источников света прибора COLUROUTE – зелёным цветом

<sup>1</sup> По материалам доклада на конгрессе *Lux Europa-2017*.

Перевод с англ. Е.И. Розовского.



Рис. 2. а – прибор COLUROUTE компании Cerema (Страсбург); б – гониофотометр компании Cerema (Клермон-Ферран)

ния примерно 100 м [1]. Редуцированный показатель яркости  $r$  описывается выражением:

$$r(b, g) = (L(b, g)/E_h) \cdot \cos^3 g = q(b, g) \cdot \cos^3 g \quad (1)$$

где  $L$  – яркость в направлении наблюдателя, кд/м<sup>2</sup>,  $E_h$  – горизонтальная освещённость, лк.

Для описания покрытия служат его показатели зеркальности  $S_1$  и освещённости  $Q_0$ . Эти два параметра рассчитывают на основе вышеупомянутой матрицы, которую называют  $r$ -таблицей. Графическим представлением  $r$ -таблицы служит индикатриса отражения (рис. 1б). Её объём соответствует показателю освещённости:

$$Q_0 = \int_0^{\Omega} \frac{q(\beta, \text{tg } \gamma) \cdot d\Omega}{\Omega} \quad (2)$$

а её форму отражает показатель зеркальности

$$S_1 = \frac{r(\beta = 0, \text{tg } \gamma = 2)}{r(\beta = 0, \text{tg } \gamma = 0)} \quad (3)$$

## 2.2. Прибор COLUROUTE

Портативный измерительный прибор COLUROUTE (акроним французского названия «COefficient de LUMinance des ROUTES») был разработан компанией Cerema в соответствии с рекомендациями МКО [9]. При помощи этого прибора (рис. 2а) измерения показателей яркости дорожных покрытий производятся на месте при дневном свете и без взятия образцов.

COLUROUTE снабжён датчиком, направленным на измеряемую поверхность под углом 1°, и содержит 27 источников света, расположенных таким образом, чтобы последовательно освещать эту поверхность при разных сочетаниях углов  $\beta$  и  $\gamma$  (рис. 2б). Эти углы были целенаправленно выбра-

ны таким образом, чтобы обеспечить возможность расчёта показателя зеркальности  $S_1$  и при помощи интерполяции сформировать полную таблицу коэффициентов отражения дорожного покрытия. Калибровка осуществляется на месте при помощи образцовых пластинок, измеренных в лаборатории при помощи гониофотометра [10]. Полученные результаты позволяют сформировать таблицу значений редуцированного показателя яркости ( $r$ -таблицу) и определить значения показателей освещённости  $Q_0$  и зеркальности  $S_1$ . При помощи этого портативного прибора можно исследовать большое количество участков и увеличить количество измерений без ущерба для дорожного покрытия.

## 2.3. Экспериментальная установка

Целью этого 3-летнего исследования было определение фотометрических характеристик различных бетонов в зависимости от времени их эксплуатации и выбор состава дорожного покрытия для тоннеля. Фотометрические характеристики двух покрытий измерялись как на месте при помощи прибора COLUROUTE, так и в лабораторных условиях с использованием цилиндрических образцов и гониофотометра компании Cerema. Измерения проводились неподалёку от цементного завода, расположенного около г. Лиона, Франция (рис. 3а). Новое бетонное покрытие изготавливалось из местных минеральных отложений, цвет которых представлял собой более или менее светлую смесь коричневого и бежевого цветов. Для получения двух различных макроструктур использовались два способа обработки поверхности: щёткой и струёй воды. Эксплуатация дороги осуществлялась



Рис. 3. а – место проведения экспериментальных исследований; б – вид тоннеля Sinard; в – фотография бетона, обработанного щёткой (начальная стадия)

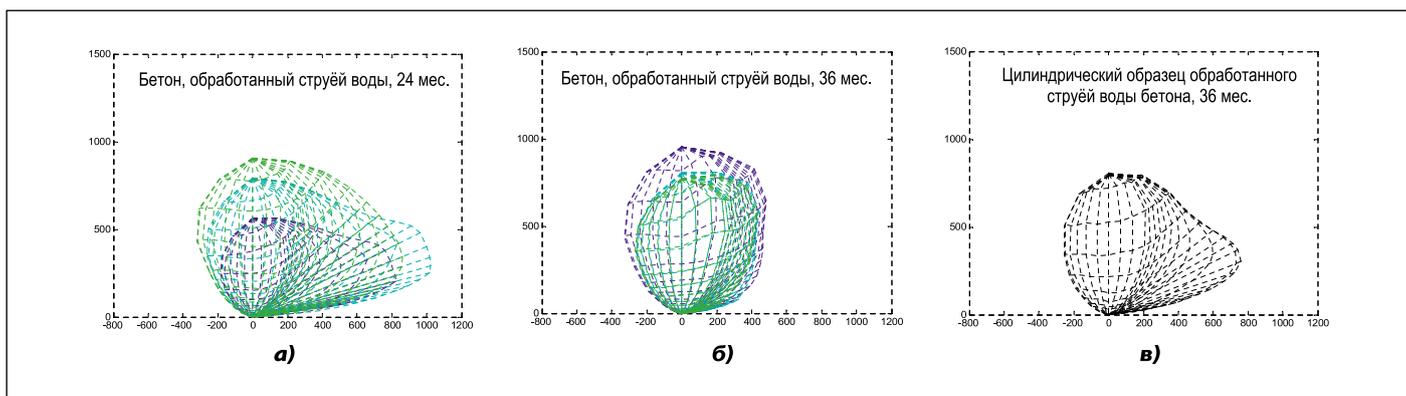


Рис. 4. Индикатрисы отражения обработанного струёй воды бетона, измеренные на месте прибором COLUROUTE после 24-х (а) и 36-ти (б) месяцев эксплуатации. Результаты трёх измерений показаны синим, голубым и зелёным цветом; в – результаты измерений, проведённых при помощи лабораторного гониофотометра применительно к цилиндрическому образцу, извлечённому после 36-ти месяцев эксплуатации. Оси показаны на рис. 16

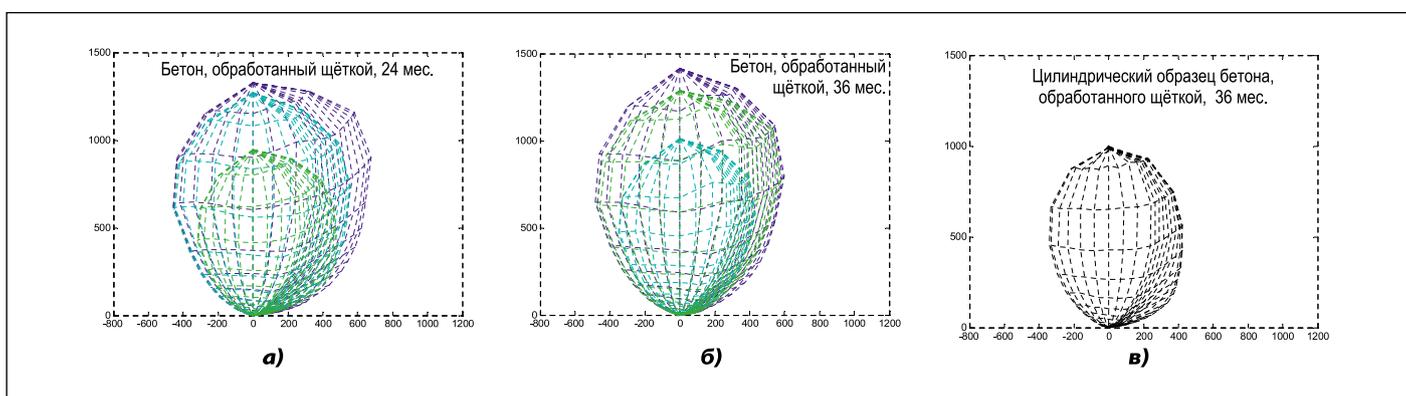


Рис. 5. Индикатрисы отражения бетона, обработанного щёткой, измеренные на месте прибором COLUROUTE после 24-х (а) и 36-ти (б) месяцев эксплуатации. Результаты трёх измерений показаны синим, голубым и зелёным цветом; в – результаты измерений, проведённых при помощи лабораторного гониофотометра применительно к цилиндрическому образцу, извлечённому после 36-ти месяцев эксплуатации. Оси показаны на рис. 16

грузовиками, вывозящими свежий бетон с завода. Чтобы избежать пыли, бетонные поверхности всегда увлажнялись. Мы считаем, что наличие песка и воды ускорило износ.

Тоннель *Sinard* (длина 980 м), расположенный к югу от Гренобля на магистрали *A51*, является одним из не многих французских тоннелей с бетонным дорожным покрытием (рис. 3б). Это неармированное и не имеющее стыковочных штырей бетонное покрытие на дренажном бетонном основании. Верхний слой бетонного покрытия обрабатывался жёсткой щёткой в поперечном направлении транспорта для формирования шероховатости, необходимой для сцепления шин с дорожным покрытием (рис. 3в). Поверхность бетона содержит дроблёные материалы, обеспечивающие повышенное сцепление шины с дорогой после относительного износа дорожного покрытия вследствие обработки щёткой только что уложенного бетона. Фотометри-

ческие характеристики этого покрытия на протяжении 30-ти месяцев регулярно измерялись при помощи прибора COLUROUTE.

### 3. Результаты

#### 3.1. Предварительные исследования

В рамках предварительных исследований, по три измерения каждого из покрытий (*M1*, *M2*, *M3*) проводились при помощи прибора COLUROUTE с интервалом 6 месяцев, и по одному цилиндрическому образцу было взято для лабораторных исследований. Полученные результаты приведены в табл. 1 для обработанного струёй воды бетона и в табл. 2 для обработанного щёткой бетона.

Независимо от методики измерений, показатель освещённости для обоих покрытий со временем увеличивался, достигнув значения, равно-го примерно 0,15. Согласно резуль-

татам измерений, проведённых при помощи прибора COLUROUTE, показатель зеркальности обработанного струёй воды бетона по истечении 2-х лет существенно увеличился (до соответствующего покрытию класса *R3*) (рис. 4а), однако по истечении 3-х лет он вновь вернулся к значению, соответствующему покрытию класса *R2* (рис. 4б). В случае обработанного щёткой бетона показатель зеркальности остаётся небольшим, соответствующим покрытию класса *R1* (рис. 5). Измеренные в лаборатории на цилиндрическом образце значения показателя зеркальности (рис. 4в и 5в) обычно были выше, чем измеренные в полевых условиях. Это, возможно, связано с наличием запылённости в окрестностях цементного завода, которая могла повлиять на результаты проводившихся на месте измерений. Как бы то ни было, результаты и гониофотометрических измерений, и измерений, проводившихся при помощи прибора COLUROUTE, говорят о том, что у об-



Рис. 6. Фотографии обработанного струёй воды бетона (а – исходное состояние, б – после 2-х лет) и обработанного щёткой бетона (в – исходное состояние, г – после 2-х лет)

Таблица 1

Результаты для обработанного струёй воды бетона ( $m$  – номер месяца)

Обработанный струёй воды бетон	Показатель освещённости $Q_0$					Показатель зеркальности $S_I$				
	$T_0$	$T_{3m}$	$T_{12m}$	$T_{24m}$	$T_{36m}$	$T_0$	$T_{3m}$	$T_{12m}$	$T_{24m}$	$T_{36m}$
<i>COLUROUTE M1</i>	0,090	0,088	0,095	0,154	0,165	0,11	0,12	0,44	1,51	0,50
<i>COLUROUTE M2</i>	0,084	0,094	0,095	0,199	0,152	0,12	0,10	0,86	1,36	0,54
<i>COLUROUTE M3</i>	0,089	0,120	0,096	0,187	0,139	0,20	0,13	0,46	1,03	0,46
<i>GONIO</i> (на цилиндрическом образце)	0,088	0,121	0,142	образца нет	0,157	0,23	0,72	0,86	образца нет	1,03

Таблица 2

Результаты для обработанного щёткой бетона ( $m$  – номер месяца)

Бетон, обработанный щёткой	Показатель освещённости $Q_0$					Показатель зеркальности $S_I$				
	$T_0$	$T_{3m}$	$T_{12m}$	$T_{24m}$	$T_{36m}$	$T_0$	$T_{3m}$	$T_{12m}$	$T_{24m}$	$T_{36m}$
<i>COLUROUTE M1</i>	0,141	0,120	0,112	0,191	0,181	0,09	0,14	0,27	0,43	0,30
<i>COLUROUTE M2</i>	0,120	0,149	0,140	0,176	0,136	0,08	0,16	0,28	0,36	0,25
<i>COLUROUTE M3</i>	0,152	0,105	0,117	0,139	0,175	0,08	0,14	0,33	0,51	0,24
<i>GONIO</i> (на цилиндрическом образце)	0,099	0,123	0,166	образца нет	0,138	0,09	1,10	0,80	образца нет	0,42

работанного щёткой бетона показатель зеркальности ниже, чем у обработанного струёй воды бетона.

Результаты фотометрических измерений демонстрируют важное воздействие эрозии в процессе эксплуатации дорожного покрытия, которое заметно на фотографиях, сделанных при каждом использовании прибора *COLUROUTE* (рис. 6). По истечении двух лет обработанная щёткой поверхность выглядела так же, как и обработанная струёй воды поверхность (рис. 6б и 6г).

Так как равномерное освещение легче реализовать в случае диффузно отражающего дорожного покрытия, то для тоннеля *Sinard* было выбрано обработанное щёткой дорожное покрытие, как имеющее меньший показатель зеркальности.

### 3.2. Эксперименты, проводившиеся применительно к тоннелю *Sinard*

В связи с невозможностью извлечения цилиндрических образцов из магистрали *A51*, измерения характеристик дорожного покрытия крайней правой полосы движения проводились на месте в течение 30-ти месяцев только при помощи прибора *COLUROUTE*. Измерения проводились в центре и в колее полосы. Показатель зеркальности во всех случаях оказывался относительно неизменным, тогда как в случае показателя освещённости различия могли достигать 30 % (рис. 7). Вначале (рис. 8а) обработанная щёткой поверхность бетона была не очень зеркальной (класс *R2*), что, возможно, было свя-

зано с присутствием остатков отвердителя. После 6-ти месяцев эксплуатации дорожное покрытие имело показатель освещённости, равный 0,1, то есть оно было очень близко к классу *R1* (рис. 8б). Наблюдалось большее количество зеркально отражающих свет участков, особенно в левой колее и в центре. После 18-ти и 30-ти месяцев эксплуатации (рис. 7 и 8в) покрытие оставалось в классе *R2*, но отражало свет лучше, чем типичные покрытия этого класса (показатель освещённости был равен 0,10 по истечении 18-ти месяцев и 0,09 по истечении 30-ти месяцев).

Энергетические последствия выбора такого бетонного покрытия были проанализированы при помощи программы *DIALUX* применительно к классической установке дорож-

Результаты расчётов при помощи программы *DIALUX* и соответствующее энергопотребление

Описание покрытия	$Q_0$	Мощность светильника, Вт	Энергопотребление, кВт/км	Экономия энергии, %
Стандартная $r_2$ -таблица (точка отсчёта)	0,070	54,7	1,89	0
$r_2$ -таблица, масштабированная применительно к классическому асфальтовому покрытию	0,054	70,6	2,43	-29
$r_2$ -таблица, масштабированная применительно к бетонному покрытию тоннеля <i>Sinard T30</i>	0,092	38	1,31	31

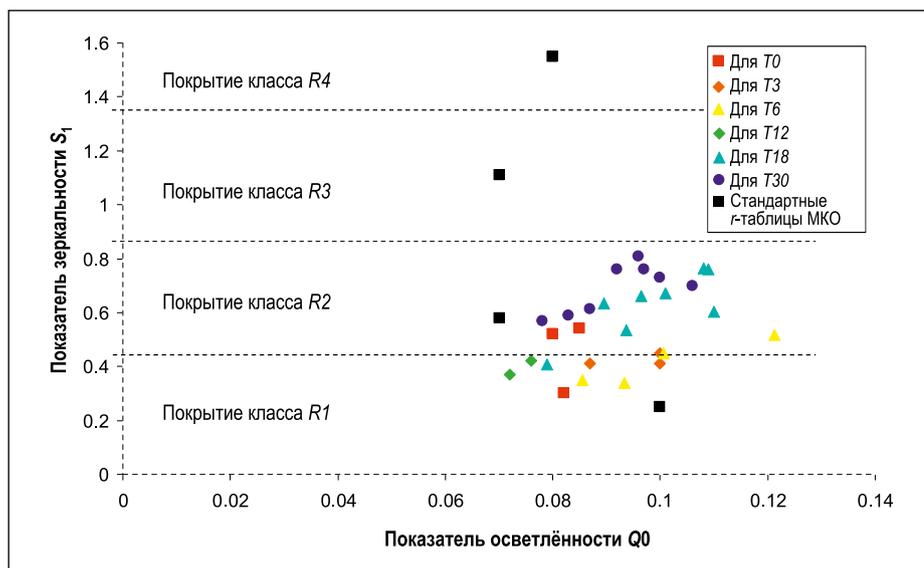


Рис. 7. Фотометрические характеристики из стандартных  $r$ -таблиц (чёрный цвет) и измеренные прибором *COLUROUTE* в тоннеле *Sinard*. Результаты, полученные в моменты времени  $T_0$ ,  $T_3$ ,  $T_6$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{18}$  и  $T_{30}$ , обозначены, соответственно, красным, оранжевым, желтым, зеленым, светло-синим и синим цветом

ного освещения со светильниками *Philips Iridium gen3 Led* и расстоянием между опорами, равным 29 м (высота 8 м). Расчёты были проведены для трёх вариантов: с использованием стандартной  $r$ -таблицы для покрытия класса  $R_2$ , с использованием стандартной  $r$ -таблицы для покрытия класса  $R_2$ , масштабированной приме-

нительно к 3-летнему классическому французскому чёрному асфальтовому дорожному покрытию [5], и масштабированной с использованием значения  $Q_0$ , измеренного по истечении 30-ти месяцев при помощи прибора *COLUROUTE*. Для выполнения требований к дорогам класса  $M_3$  по освещению [11], в случае стандартной

$r$ -таблицы для покрытия класса  $R_2$  потребовались светильники мощностью 54,7 Вт, тогда как для классического асфальтового покрытия и для покрытия, использовавшегося в тоннеле *Sinard*, потребовались светильники мощностью 70,6 и 38 Вт соответственно (табл. 3). Полученные значения энергопотребления подтверждают, что использование более светлого дорожного покрытия приводит к значительной экономии энергии.

#### 4. Заключение

Это предварительное исследование проводилось с целью выбора метода обработки поверхности бетона. Результаты измерений, проведенных в лаборатории, и результаты, полученные при помощи портативного прибора *COLUROUTE*, согласуются друг с другом. Имеющиеся расхождения зачастую связаны с процессом взятия образцов. В случае предварительных исследований, проводившихся в окрестности цементного завода, имело место осаждение пыли, которая удалялась при извлечении образцов. Независимо от метода измерений, обработанная щёткой поверхность бетона всегда имела меньший показатель зеркальности, чем обработанная

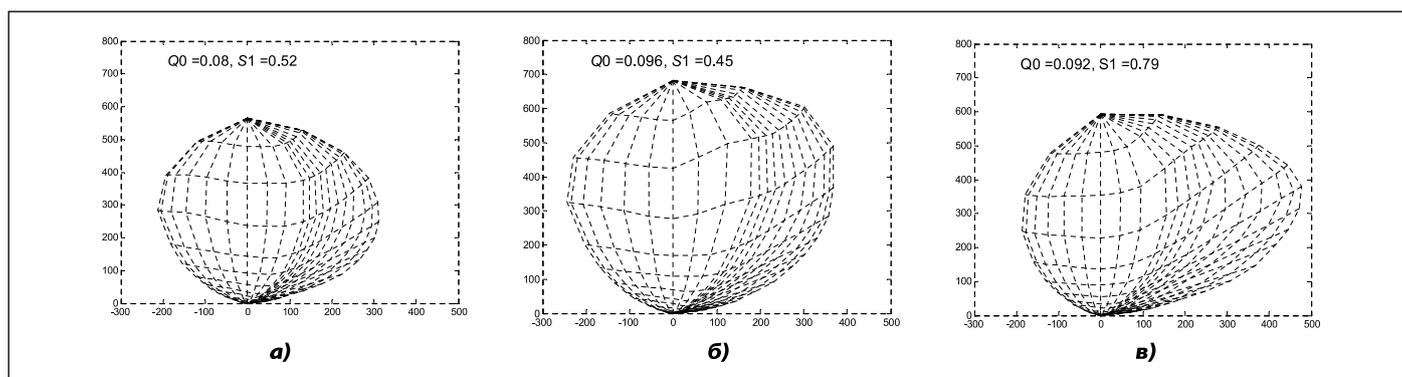


Рис. 8. Фотометрические тела дорожных покрытий в тоннеле *Sinard*, измеренные прибором *COLUROUTE* на новом покрытии (а) и в более после 6-ти (б) и 30-ти (в) месяцев эксплуатации

струей воды поверхность. Результаты, полученные в рамках предварительных исследований и в действующем тоннеле, соответствовали друг другу. Обработанная щёткой поверхность бетона была и остаётся светлой, а её зеркала остаётся умеренной, несмотря на влияние движения транспорта.

Исследование энергопотребления показало, что при учёте реальных характеристик бетонного дорожного покрытия, которое используется в тоннеле *Sinard*, расход энергии на освещение можно уменьшить на 46 % по сравнению с потреблением энергии в случае классического французского асфальтового дорожного покрытия. Это подчёркивает важность для проектировщика правильности выбора характеристик дорожного покрытия при составлении спецификации на тоннель и дорогу.

При проведении измерений на месте, количество измерений может быть увеличено, и средние результаты окажутся более достоверными, чем при отборе одного или двух цилиндрических образцов. Всё ещё требуется определить, сколько измерений и как следует произвести. Эти вопросы будут рассмотрены в рамках европейского проекта *Empir (SURFACE)*, который в настоящее время находится на ранней стадии реализации.

Авторы благодарят Дж.-Ф. Варгаса (*J-F Vargas*), Г. Лемонье (*G. Lemonnier*) и С. Горварта (*S. Horwarth*) за их вклад в эту работу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Road Surfaces and lighting, joint CIE/PI-ARC publication, CIE66–1984.
2. Road surface and road marking reflexion characteristics // Tech. Rep., CIE144–2001.
3. *Dumont, E.* Photométrie des chaussées et éclairage public // Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, CR45, Ed. LCPC, 2007 (in french).
4. *Chain, C., Lopez, L., Verny, P.* Impact of real road photometry on public lighting design // Presentation at the 26<sup>th</sup> session of the CIE, July 4–11, 2007, Beijing, China.
5. *Dumont, E., Fournela, F., Muzet, V., Paumier, J-L., Venin, C.* Pavement reflection properties and luminance distribution: measurements on a road lighting test track and comparison with standard calculations // Poster at the 26<sup>th</sup> session of the CIE, July 4–11, 2007, Beijing, China.
6. *Dumont, E., Paumier, J-L.* Are standard tables R still representative of the properties of road surfaces in France? // Poster at the

26<sup>th</sup> session of the CIE, July 4–11, 2007, Beijing, China.

7. *Jackett, M., Frith, W.* Reflection properties of New Zealand road surfaces for road lighting design // Technical paper, IPENZ Transportation Group Conference Christchurch, 14 pp., March 2010.

8. *Ylinen, A.M., Pellinen, T., Valtonen, J., Putilakka, M., Halonen, L.* Investigation of pavement light characteristics // Road material and pavement design.– 2011. – Vol. 12, No. 3. – P. 587–614.

9. *Muzet, V, Paumier, J-L., Guillard, Y.* COLUROUTE: a mobile gonio-reflectometer to characterize the road surface photometry // CIE Int. Symp. on road surface characteristics, 9–10 July 2007, Torino.

10. *Paumier, J-L., Legoueix, G., Dupont, P., Aubert, F.* Propriétés photométriques des revêtements de chaussée // *CFTR-Info*, No. 14, 12 pp., Septembre 2006 (in french).

11. CEN EN13201–2:2015 «Road Lighting – Part 2: Performances requirements», December 2015.



**Валери Мюзет (Valérie Muzet),**

Ph.D. Окончила Страсбургский университет (1997 г.). Работает в исследовательской группе ENDSUM (неразрушающая оценка конструкций

и материалов) компании *Sereta*. На протяжении 15-лет участвует в разработке различных оптических приборов для измерения параметров дорог. Член рабочей группы WG2 технического комитета TC226 Европейского комитета по стандартизации, комитета TC4–50 МКО и Французского светотехнического общества. Руководит участием компании *Sereta* в европейском проекте *Empir (SURFACE)*. Область научных интересов: 3-мерное отображение дорог, фотометрия дорог и разметки



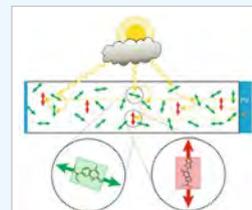
**Жозеф Абдо (Joseph Abdo),**

Ph.D. Окончил институт Mines Paris Tech (1982 г.). Заместитель директора по дорожным покрытиям ассоциации CIMBETON. Автор нескольких

технических справочников серии CIMBETON Collection, член редакционной коллегии Французского комитета по дорожному строительству

## Переизлучающие пигменты стали концентратором света для солнечных батарей

Учёные предложили новую конструкцию люминесцентного концентратора, позволяющего собирать солнечный свет с большой площади на небольшую солнечную панель из более эффективного, чем кремний, но дорогого материала (чтобы снизить стоимость таких панелей до экономически целесоо-



бразного уровня). В нём используются два пигмента, один из которых поглощает свет и переизлучает на второй, который уже переизлучает свет на солнечную панель, сообщается в журнале «*Nature Communications*».

Исследователи из Брауншвейгского технического университета предложили располагать солнечную панель в торце люминесцентного концентратора, большую часть которого занимает полимер с двумя флуоресцентными пигментами – донором и акцептором. Молекулы акцептора специально сильно вытянуты и в основном излучают свет «перпендикулярно», в отличие от молекул донора, излучающего более «равномерно». Пигменты-доноры располагаются в полимере хаотично, а акцепторы ориентированы вдоль плоскости солнечной панели. За счёт этого доноры поглощают солнечный свет, переизлучают, и переизлучённый свет попадает на молекулы акцептора, который, в свою очередь, тоже излучает в сторону солнечной панели или обратную, на которой расположена отражающая поверхность.

Излучение акцепторного пигмента, излучающего в сторону солнечной панели, имеет длину волны около 520 нм, что совпадает с максимумом поглощения соединения *InGaP*, на базе которых сегодня разрабатываются очень эффективные солнечные панели.

Исследователи протестировали разные концентрации пигментов и выбрали соотношение молекул донора к молекулам акцептора десять к одному. Они показали, что такое устройство может иметь квантовую эффективность перенаправления света определённой длины волны около 80 %, а также предложили создавать многослойные солнечные панели с такими концентраторами, в которых каждый слой будет содержать разные пигменты, поглощающие свет определённого спектрального диапазона.

В прошлом году учёные предложили повысить диапазон углов падения света для солнечных панелей с помощью материала со структурой, напоминающей крылья бабочки. Такая структура позволила повысить эффективность поглощения света примерно вдвое.

nanonewsnet.ru  
03.03.2018