

# К вопросу о преобразовании систем фотометрирования

О.Е. ЖЕЛЕЗНИКОВА, С.В. ПРЫТКОВ

НИУ «МГУ им. Н.П. Огарёва», Саранск  
E-mail: sarstf@mail.ru

## Аннотация

Предлагается способ перехода между фотометрическими системами  $A\alpha$ ,  $B\beta$  и  $C\gamma$ , основанный на их совмещении с помощью поворотов в декартовой прямоугольной системе координат и последующей интерполяции значений силы света в заданных узлах. Это позволяет корректно определять все значения меридиональных углов во всей области принимаемых значений:  $[-\pi, \pi]$  для  $A$ ,  $B$  и  $[0, 2\pi]$  для  $C$ .

**Ключевые слова:** осветительный прибор, системы фотометрирования, кривая силы света, гониофотометрия, интерполяция.

Пространственно-угловое распределение силы света определяется в ходе гониофотометрических измерений и может задаваться в одной из трёх систем фотометрирования –  $A\alpha$ ,  $B\beta$  и  $C\gamma$  [1, 2]. Выбор конкретной системы для определённых типов источников света или осветительных приборов (ОП) стандарты строго не регламентируют, но дают некоторые рекомендации. Так, согласно [1, 2], прожекторы рекомендуется фотометрировать в системе  $B\beta$ , автомобильные фары – в системе  $A\alpha$  [2], а офисные и уличные светильники – в системе  $C\gamma$ . А если кинематическая схема гониофотометра предполагает поворот измеряемой разрядной лампы, то рекомендуется выбирать ту систему, при которой не меняется рабочее положение лампы.

Часто же выбор диктуется просто удобством проведения измерений.

В светотехнической практике могут встречаться ситуации, когда фотометрирование осуществляется в одной системе, а результаты надо представлять в другой. Когда, например, сопоставляются результаты измерений двумя гониофотометрами, кинематические схемы которых реализуют разные системы фотометрирования. В [1, 2] есть формулы перехода между системами фотометрирования. Однако, как показано ниже, они не вполне корректны.

Системы фотометрирования представляют собой сферические системы координат, определённым образом ориентированные относительно фотометрической, продольной и поперечной осей ОП [1]. Совмещение систем фотометрирования можно осуществлять, либо используя основные понятия и правила сферической геометрии [3], либо – матричные преобразования в декартовой системе координат. Оба способа приводят к одним и тем же результатам, но в данной работе мы отдаём предпочтение последнему вследствие более экономной, удобной для запоминания формы записи.

Как известно, переход от сферических координат к декартовым и обратно осуществляется по формулам

$$x = r \sin \theta \cos \varphi, \quad y = r \sin \theta \sin \varphi, \quad z = r \cos \theta, \quad (1)$$

где  $\theta$  – полярный угол,  $\varphi$  – азимутальный угол,  $r$  – радиус-вектор (рис. 1).

Далее выясним, как осуществляется переход к декартовым координатам, связанным с системами фотометрирования  $C\gamma$ ,  $B\beta$ ,  $A\alpha$ . Координатными осями во всех трёх системах являются поперечная, продольная и фотометрическая оси ОП. Положительные направления координатных осей в системах  $C\gamma$ ,  $B\beta$ ,  $A\alpha$  определяют тройки единичных векторов  $(i_C, j_C, k_C)$ ,  $(i_B, j_B, k_B)$  и  $(i_A, j_A, k_A)$  соответственно (рис. 2–4).

Из рис. 1–4 видно, что углы  $\theta$  и  $\varphi$  связаны с меридиональными и экваториальными углами систем  $C\gamma$ ,  $B\beta$ ,  $A\alpha$  следующим образом:  $\theta_C = 180^\circ - \gamma$ ,  $\varphi_C = C$ ;  $\theta_B = 90^\circ - \beta$ ,  $\varphi_B = B$ ;  $\theta_A = 90^\circ + \alpha$ ,  $\varphi_A = A$ . Подставляя данные выражения в (1), получаем следующие формулы преобразования координат систем  $C\gamma$ ,  $B\beta$ ,  $A\alpha$  в декартовы:

$$\begin{cases} x_C = \sin \gamma \cos C, \\ y_C = \sin \gamma \sin C, \\ z_C = -\cos \gamma; \end{cases} \begin{cases} x_B = \cos \beta \cos B, \\ y_B = \cos \beta \sin B, \\ z_B = \sin \beta; \end{cases} \begin{cases} x_A = \cos \alpha \cos A, \\ y_A = \cos \alpha \sin A, \\ z_A = -\sin \alpha. \end{cases}$$

Теперь необходимо осуществить поворот координатных осей или базиса систем. Обращаясь снова к рис. 2–4, видим, что при переходе  $C\gamma \rightarrow B\beta$  поворот происходит относительно оси  $j_C$  на  $270^\circ$  против часовой стрелки, а при  $B\beta \rightarrow A\alpha$  – относительно оси  $i_B$  на  $270^\circ$  против часовой стрелки. Матрицы данных преобразования таковы:

$$R_{cb} = \begin{pmatrix} \cos 270^\circ & 0 & \sin 270^\circ \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin 270^\circ & 0 & \cos 270^\circ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

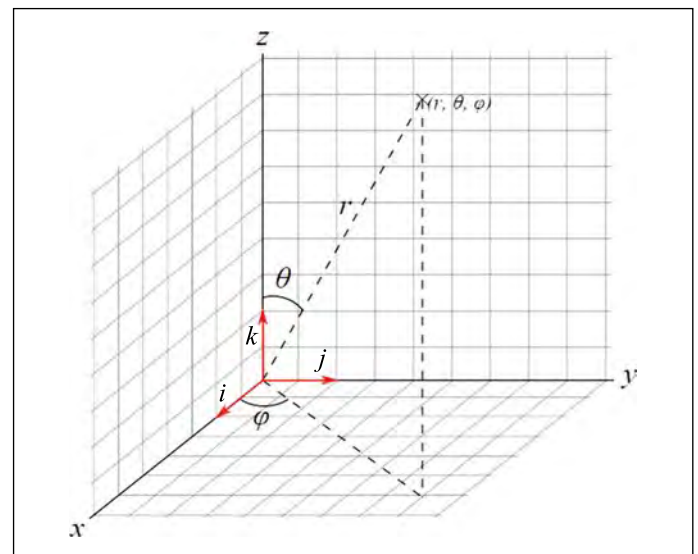


Рис. 1. Сферическая система координат

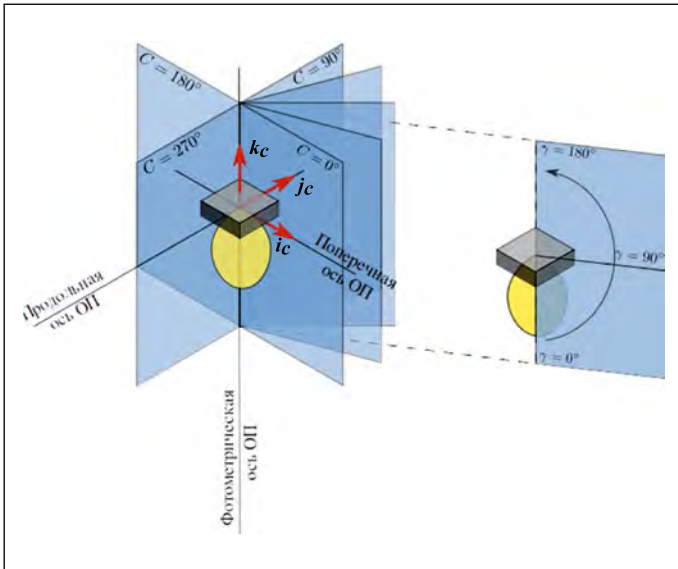


Рис. 2. Система фотометрирования  $C\gamma$

$$R_{ba} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 270^\circ & -\sin 270^\circ \\ 0 & \sin 270^\circ & \cos 270^\circ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Как будет показано ниже, двух этих матриц достаточно, чтобы полностью описать связь систем фотометрирования. Дадим теперь матричное обозначение этим преобразованиям:

$$c = \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix}, a = \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix}.$$

Тогда переход между системами фотометрирования запишется в следующем виде:

$$C\gamma \rightarrow B\beta : b = R_{cb} c, \quad (2)$$

$$B\beta \rightarrow A\alpha : a = R_{ba} b, \quad (3)$$

$$C\gamma \rightarrow A\alpha : a = R_{ba} R_{cb} c = R_{ca} c, \quad (4)$$

$$B\beta \rightarrow C\gamma : c = R_{cb}^{-1} b, \quad (5)$$

$$A\alpha \rightarrow B\beta : b = R_{ba}^{-1} a, \quad (6)$$

$$A\alpha \rightarrow C\gamma : c = R_{ca}^{-1} a. \quad (7)$$

Выражения (2)–(7) однозначно определяют связь между системами фотометрирования. Решая их в явном виде, находим следующие соотношения для углов:

$$\begin{aligned} C\gamma \rightarrow B\beta : B &= \arctg(\sin C \cdot \tg \gamma), \\ \beta &= \arcsin(\cos C \cdot \sin \gamma), \end{aligned} \quad (8)$$

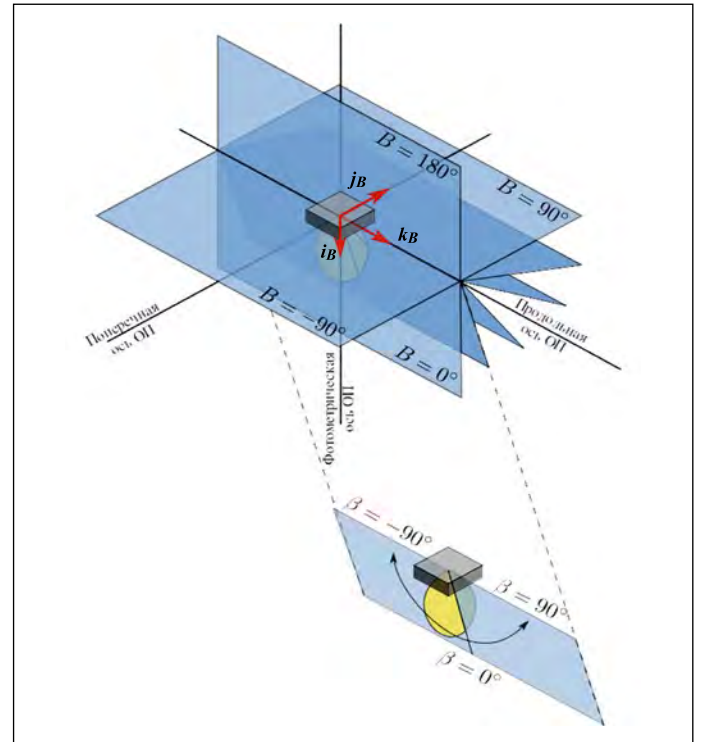


Рис. 3. Система фотометрирования  $B\beta$

$$\begin{aligned} B\beta \rightarrow A\alpha : A &= \arctg(\tg \beta / \cos B), \\ \alpha &= \arcsin(\sin B \cdot \cos \beta), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} C\gamma \rightarrow A\alpha : A &= \arctg(\cos C \cdot \tg \gamma), \\ \alpha &= \arcsin(\sin C \cdot \sin \gamma), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} B\beta \rightarrow C\gamma : C &= \arctg(\sin B / \tg \beta), \\ \gamma &= \arccos(\cos B \cdot \cos \beta), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} A\alpha \rightarrow B\beta : B &= \arctg(\tg \alpha / \cos A), \\ \beta &= \arcsin(\sin A \cdot \cos \alpha), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} A\alpha \rightarrow C\gamma : C &= \arctg(\tg \alpha / \sin A), \\ \gamma &= \arccos(\cos A \cdot \cos \alpha). \end{aligned} \quad (13)$$

Эти же соотношения приведены в [1]. Анализируя их совместно с рис. 1–4, заключаем, что для нахождения экваториальных углов  $A$ ,  $B$  и  $C$  использование лишь главной ветки арктангенса недостаточно, так как  $-\pi \leq A \leq \pi$ ,  $-\pi \leq B \leq \pi$ ,  $0 \leq C \leq 2\pi$ , и в то же время  $-\pi/2 < \arctg x < \pi/2$ . Это приводит к тому, что после преобразования половина информации теряется. Для корректного определения всех значений меридионального угла его следует искать как аргумент комплексного числа:

в случае  $A$  и  $B$  имеем

$$\varphi(y, x) = \begin{cases} \arctg(y/x), x > 0; \\ \pi + \arctg(y/x), x < 0, y \geq 0; \\ -\pi + \arctg(y/x), x < 0, y < 0; \\ \pi/2, x = 0, y > 0; \\ -\pi/2, x = 0, y < 0, \end{cases}$$

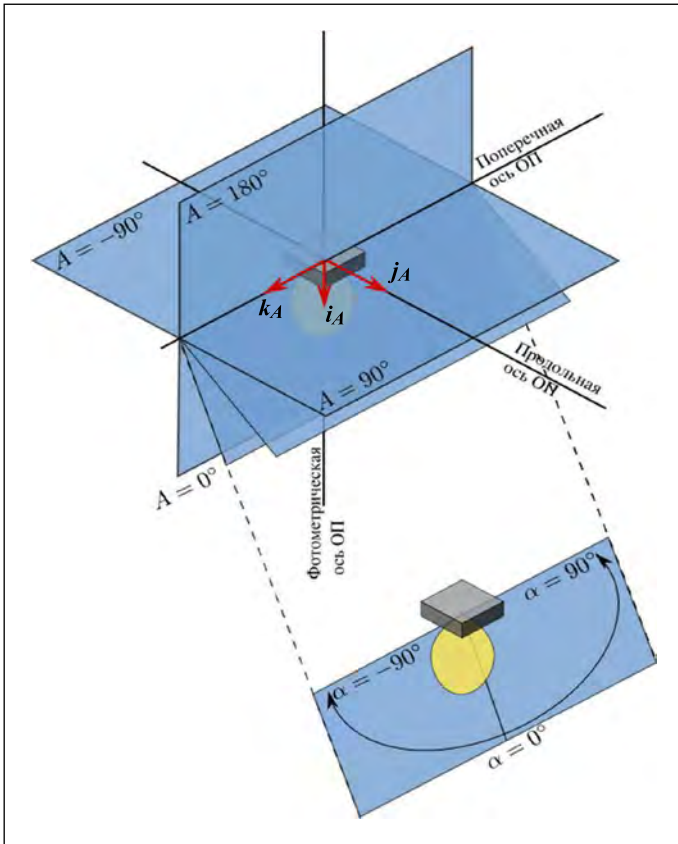


Рис. 4. Система фотометрирования  $A\alpha$

а в случае  $C$  –

$$\varphi^*(y/x) = \begin{cases} \arctg(y/x), x > 0, y \geq 0; \\ \pi + \arctg(y/x), x < 0; \\ 2\pi + \arctg(y/x), x > 0, y < 0; \\ \pi/2, x = 0, y > 0; 3\pi/2, x = 0, y < 0. \end{cases}$$

Учитывая это, перепишем выражения (8)–(13) следующим образом:

$$C\gamma \rightarrow B\beta : B = \varphi(\sin C, \text{ctg}\gamma), \quad \beta = \arcsin(\cos C \cdot \sin \gamma), \quad (14)$$

$$B\beta \rightarrow C\gamma : C = \varphi(\sin B, \text{tg}\beta), \quad \gamma = \arccos(\cos B \cdot \cos \beta), \quad (15)$$

$$B\beta \rightarrow A\alpha : A = \varphi(\text{tg}\beta, \cos B), \quad \alpha = \arcsin(\sin B \cdot \cos \beta), \quad (16)$$

$$A\alpha \rightarrow B\beta : B = \varphi(\text{tg}\alpha, \cos A), \quad \beta = \arcsin(\sin A \cdot \cos \alpha), \quad (17)$$

$$A\alpha \rightarrow C\gamma : C = \varphi(\text{tg}\alpha, \sin A), \quad \gamma = \arccos(\cos A \cdot \cos \alpha), \quad (18)$$

$$C\gamma \rightarrow A\alpha : A = \varphi(\cos C, \text{ctg}\gamma), \quad \alpha = \arcsin(\sin C \cdot \sin \gamma). \quad (19)$$

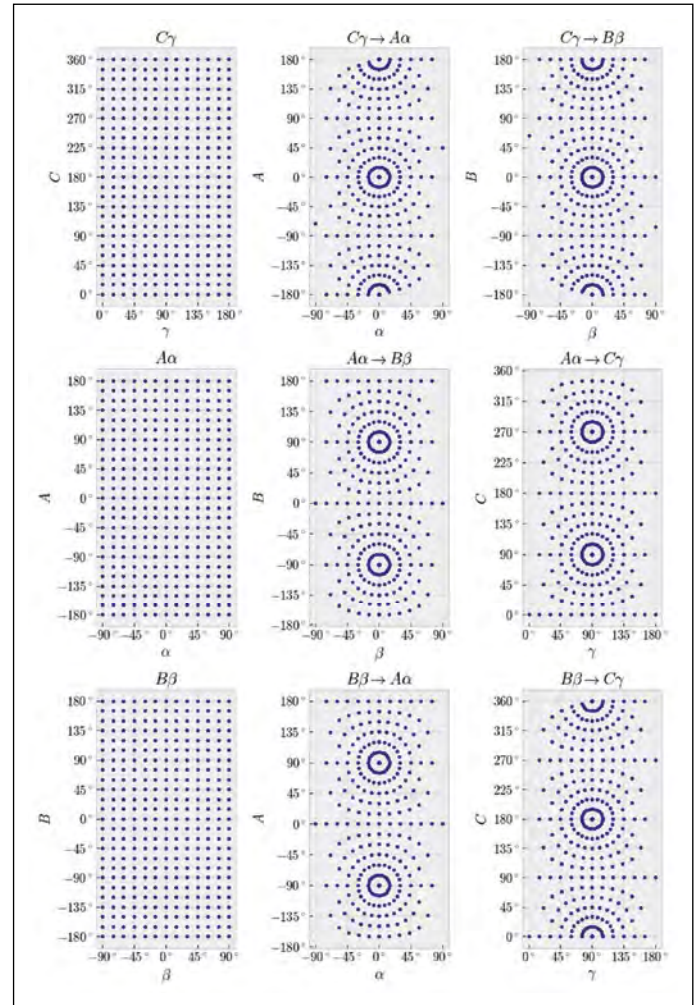


Рис. 5. Узлы систем фотометрирования до и после преобразования. Использовались формулы (14)–(19)

Из результата преобразования по этим формулам (рис. 5) видно: структура данных после преобразований (14)–(19) становится нерегулярной и потому дополнительно нужна интерполяция значений силы света. При этом возможны два варианта:

- если мы совмещаем старую систему (систему с исходными данными) с новой, то интерполяция значений силы света осуществляется в новой системе. В данном случае интерполяционные узлы образуют нерегулярную сетку, поэтому нужно использовать соответствующую интерполяцию (например, с применением триангуляции Делоне) [4];
- если мы совмещаем новую систему (систему, в которой хотим получить значения силы света) со старой, то интерполяция значений силы света, соответственно, производится в старой системе. В данном случае интерполяционные узлы образуют прямоугольную сетку, поэтому находить значения силы света можно с помощью билинейной интерполяции [5].

Итак, в настоящей статье предложен способ перехода между фотометрическими системами, основанный на их совмещении с помощью поворотов в декартовой прямоугольной системе координат и последующей интерполяции значений силы света в заданных узлах. Итоговые формулы (14)–(19) в отличие от соответствующих приведённых в [2] позволяют корректно определять все значения меры-



диональных углов во всей области принимаемых значений:  $[-\pi, \pi]$  для  $A$ ,  $B$  и  $[0, 2\pi]$  для  $C$ . Показано, что после преобразований (14)–(19) сетка углов становится нерегулярной, что, в свою очередь, приводит к невозможности формировать файлы фотометрических данных в широко распространённых форматах *ldt* и *ies* [6, 7]. Установлено, что в [2] для преобразования  $A\alpha \rightarrow C\gamma$  предложены формулы, не согласующиеся ни с [1], ни с решением, предложенным в данной статье. Согласно [2], преобразование  $A\alpha \rightarrow C\gamma$  должно осуществляться так:

$$\gamma = \alpha + 90^\circ, C = \begin{cases} -A, & -180^\circ < A < 0^\circ; \\ 360^\circ - A, & 0^\circ < A < 180^\circ; \\ 0^\circ, 360^\circ, & A = 0^\circ. \end{cases} \quad (20)$$

Анализ выражения (20) показывает – никакого поворота системы фотометрирования  $A\alpha$  относительно ОП до её совмещения с  $C\gamma$  не происходит, то есть полярная ось системы  $C\gamma$  (линия пересечения полуплоскостей фотометрирования) после преобразования (20) не совмещается с оптической осью ОП, что нарушает одно из требований при построении данной системы [1, 2].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 54350–2015 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний».
- IESNA LM-75–01 «Goniophotometer Types and Photometric Coordinates».
- Алексеевский Д.В., Винберг Э.Б., Солодовников А.С. Геометрия пространств постоянной кривизны / Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. – М.: ВИНТИ, 1988. – Т. 29. – С. 1–146.
- Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 128 с.
- ГОСТ Р 55708–2013 «Освещение наружное утилитарное. Методы расчёта нормируемых параметров».
- IESNA: LM-63–1995 «Standard file format for electronic transfer of photometric data».
- Stockmar A.W. EULUMDAT/2 – Extended Version of a Well Established Luminaire Data Format / CIBSE National Lighting Conference, 1998. – P. 353–362.

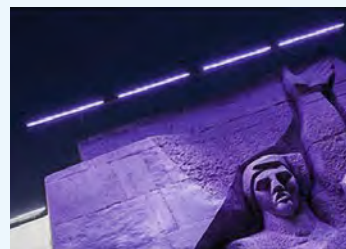


**Железникова Ольга Евгеньевна**, кандидат техн. наук, доцент. Окончила в 1989 г. светотехнический факультет Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Заведующий кафедрой светотехники НИУ «МГУ им. Н.П. Огарёва». Заслуженный работник высшей школы Республики Мордовия. Член редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»



**Прытков Сергей Владимирович**, кандидат техн. наук. Окончил в 2010 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Доцент кафедры светотехники НИУ «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: светотехнические расчёты

Летом 2018 г. фасады 14 станций московского метро заиграли новыми красками. В рамках программы благоустройства «Моя улица» 1244 единицы светодиодного оборудования *IntiLED* было использовано для архитектурно-художественного освещения недавно отреставрированных станций метро («Спортивная», «Сокол» (восточный и западный вестибюли), «Баррикадная», «Таганская» КЛ, «Алексеевская», «Рижская», «Курская» КЛ и АПЛ, «Кузнецкий Мост», «Арбатская» АПЛ, «Александровский сад», «Павелецкая», «Баррикадная» и «Автозаводская»).



Освещение метрополитена – не только одна из самых интересных тем в светодизайне, но и одна из самых консервативных. Нормы освещения Московского метрополитена, прописанные в СНиП в середине XX столетия, не менялись вплоть до 2003 г.

Тогда требования к освещению станций были минимальными – нужно было обеспечить безопасность пассажиров. Сегодня подход изменился. При выборе цветов и приёмов освещения светодизайнеры провели серьёзную подготовительную работу: изучили историю создания станций и их архитектурные особенности. Благодаря этому для каждой из них был подготовлен индивидуальный проект, который решает важнейшие задачи: как соблюсти жёсткие меры безопасности, обеспечить высокую степень комфорта для пассажиров и подчеркнуть выдающуюся архитектуру.

Так, станции «Кузнецкий Мост» и «Баррикадная», не имеющие статуса памятников, получили цветное освещение. На «Баррикадной» барельеф с изображением героев 1905 года осветили фиолетовым цветом, что придало ему еще больше торжественности.

На станции «Таганская» КЛ, которая признана объектом культурного наследия, с помощью оборудования *IntiLED* удалось расставить световые акценты так, чтобы выделить декоративные элементы и осветить своды лазурно-голубого потолка.

Холодно-белый свет подчёркивает композиционные особенности архитектурного решения наземного павильона станции метро «Курская».

Для станций «Сокол» и «Спортивная» было выбрано классическое освещение с использованием светорегулируемых светильников. Тёпло-белый свет использован в полуоткрытых пространствах, холодно-белый – для акцентирования белых классических элементов (аттиков, парапетов и карнизов), а нейтрально-белый – для визуального увеличения поверхности фасада. Тёплый белый свет на станциях «Алексеевская» и «Рижская» создаёт комфортные условия для пассажиров во входных зонах.

Благодаря светорегулируемому оборудованию и возможности включения разных групп светильников освещение имеет два режима – вечерний и ночной. Их будут использовать в зависимости от продолжительности светового дня.

Разработку концепции и поставку оборудования выполнила компания «Мастерская света».

elec.ru  
26.10.2018