

# Как определить видимую высоту освещенной области на фасаде?

**Дмитрий Сукачев,**  
заместитель директора по развитию ООО «Марбел»,  
приглашенный лектор Факультета ДПО НИУ ВШЭ,  
приглашенный лектор Факультета садоводства  
и ландшафтной архитектуры РГАУ-МСХА имени  
К.А. Тимирязева

## ВВЕДЕНИЕ

Нередко заказчики интересуются, какой высоты на фасаде «достигает» луч настенного светильника.

И чтобы ответить на этот вопрос, приходилось моделировать в Dialux. Расчеты занимали минут 20, однако хотелось упростить процесс и выполнять их быстрее. В результате пришел к этой формуле:

$$h = \sqrt[3]{I \cdot \frac{r \cdot 0,75}{k \cdot E_{\phi}}}$$

где  $h$  – видимая высота освещенной области на фасаде, м;  $r$  – расстояние от стены до продольной оси светильника, м;  $k$  – пороговый контраст яркости;  $I$  – сила света в направлении  $3-6^\circ$  КСС светильника, Кд;  $E_{\phi}$  – фоновая освещенность, лк.

Формула применима, если продольная ось светильники отстоит от стены на расстояние до 30 см, что справедливо для большинства настенных декоративных светильников. И видимая «длина луча» в темное время суток составляет 2 м и более (рис. 1).

Например, для светильника, КСС которого приведена на рисунке 2, при фоновой освещенности 0,4 лк (полнолуние, луна освещает фасад) и расстоянии от продольной оси светильника до фасада  $r = 0,2$  м видимая высота ос-

вещенной светильником области составит:

$$h = \sqrt[3]{I \cdot \frac{r \cdot 0,75}{k E_{\phi}}} = \sqrt[3]{1300 \cdot \frac{0,2 \cdot 0,75}{0,65 \cdot 0,4}} = \sqrt[3]{750} = 9,0 \text{ м.}$$

Теперь, чтобы оценить видимую высоту освещенной области на фасаде, потребуется «научный калькулятор» на мобильном телефоне и 3–4 минуты. Особенности ночного зрения человека определяют, какой в темное время суток будет видимая высота освещенной области на фасаде. Рассмотрим эти особенности.

## ОСОБЕННОСТИ НОЧНОГО ЗРЕНИЯ

Вечером в условиях темновой адаптации возможность зрительно обнаружить одноцветный с фоном объект наблюдения или различить его форму определяется пороговым значением яркостного контраста. Элементарное зрительное обнаружение или видимость объекта определяются минимальной (пороговой) разностью яркости  $\Delta L_{\text{пор}}$  двух смежных участков поля зрения наблюдателя. Отношение  $\Delta L_{\text{пор}}$  к яркости фона называют пороговым контрастом яркости объекта наблюдения с фоном:

$$K_{\text{пор}} = \Delta L_{\text{пор}} / L_{\phi} \quad (1)$$

$$K = (L_o - L_{\phi}) / L_{\phi} = \Delta L / L_{\phi} \quad (2)$$

где  $L_o$ ,  $L_{\phi}$  – яркости объекта и фона,  $\Delta L$  – разность яркостей объекта и фона.

Условия обнаружения объекта, одноцветного с фоном, можно записать следующими неравенствами:

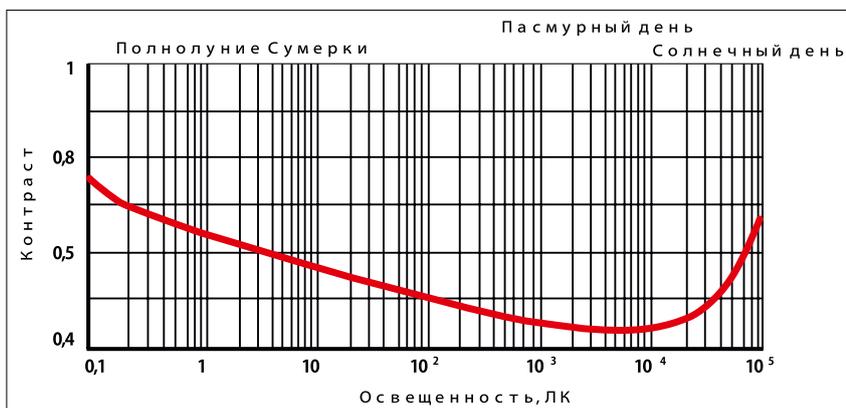


Рис. 1. Видимая высота освещенной области на фасаде

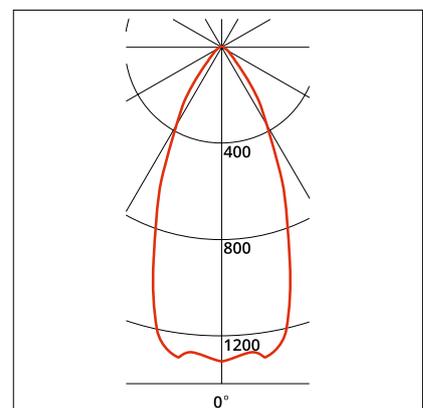
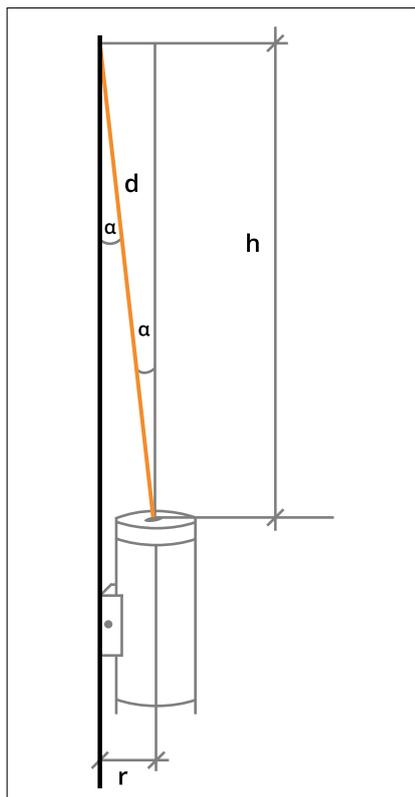
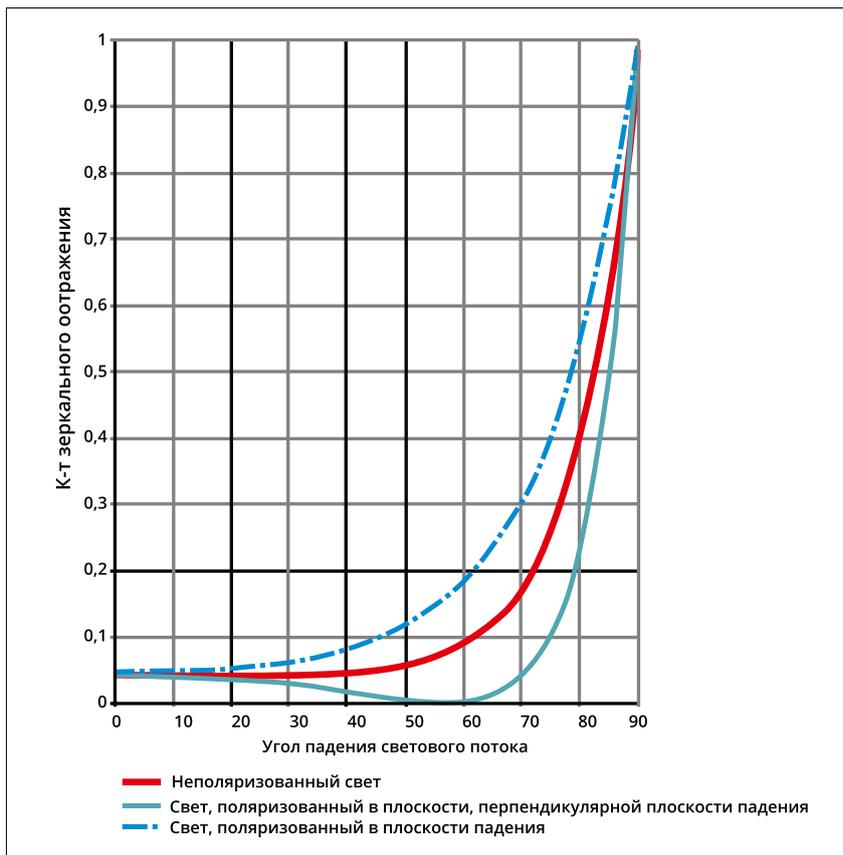


Рис. 2. КСС светильника



**Рис. 3. Определение контраста между предметом и фоном для обеспечения его видимости в зависимости от условий природного освещения**



**Рис. 4. Яркости освещенной области на фасаде  $L_0$  и яркость фасада от фоновой освещенности**

$$\Delta L \geq \Delta L_{пор} \text{ или } K \geq K_{пор}. \quad (3)$$

При низкой освещенности контрастная чувствительность резко уменьшается, для различения яркости смежных поверхностей необходимо, чтобы перепад между ними был не менее 55%, то есть яркости поверхностей должны отличаться одна от другой более чем в 1,5 раза [1].

Более точные значения  $K_{пор}$  приведены в диаграмме, опубликованной в учебнике «Архитектурная физика» [2] (рис. 3, 4).

Яркость диффузно отражающей (далее по тексту – матовой) поверхности составляет:

$$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения,  $E$  – освещенность.

Для матовых поверхностей коэффициент отражения освещенной и темной областей фасада одинаковые, и яркость освещенной области составит:

$$L_0 = \frac{(E_{\phi} + E_{св}) \cdot \rho}{\pi}, \quad (5)$$

где  $L_0$  – яркость освещенной области,  $E_{\phi}$  – фоновая освещенность,  $E_{св}$  – освещенность от светильника,  $\rho$  – коэффициент отражения поверхности.

$$L_{\phi} = \frac{E_{\phi} \cdot \rho}{\pi}, \quad (6)$$

где  $E_{\phi}$  – фоновая освещенность.

Запишем соотношение (2) с учетом выражений (5) и (6):

$$K = \frac{L_0 - L_{\phi}}{L_{\phi}} = \frac{\frac{\rho}{\pi} \cdot (E_{\phi} + E_{св} - E_{\phi})}{\frac{E_{\phi} \cdot \rho}{\pi}} = \frac{E_{\phi} + E_{св} - E_{\phi}}{E_{\phi}} = \frac{E_{св}}{E_{\phi}} \quad (7)$$

или

$$E_{св} = K \cdot E_{\phi}. \quad (8)$$

Однако гладкий и матовый фасад, имеющий полностью диффузное отражение, встречается довольно редко. Чаще всего мы имеем дело либо с текстурными или даже рельефными поверхностями, либо с глянцевыми отделочными материалами. Для таких материалов соотношение (7) не выполняется.

### ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ НА ЯРКОСТЬ ФАСАДА

Текстурные или рельефные отделочные материалы, когда световой поток падает на них под малым углом к поверхности материала (или большим углом по отношению к нормали к поверхности материала), выглядят темнее по сравнению с гладкими материалами даже при одинаковом  $\rho$ .

Текстура и светлота неразрывно связаны между собой. Свет, падающий на текстурную поверхность, создает высокие контрасты между освещенными элементами текстуры и элементами в тени, относительные размеры и плотность

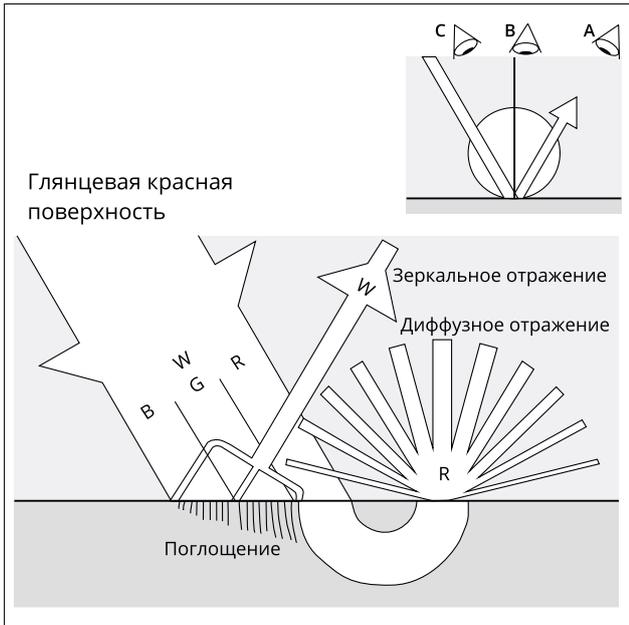


Рис. 5. Видимая яркость текстурных материалов с одинаковым коэффициентом отражения и разной текстурой при боковом освещении

текстурных элементов увеличивают или уменьшают светлоту пропорционально эффекту затенения [3] (рис. 5).

Этот эффект хорошо виден на рисунке 4. Три образца с разной текстурой покрасили из аэрозольного баллончика серой краской. Влияние текстуры оказалось значительным. Левый, текстурный образец выглядит значительно темнее, правого гладкого.

Назовем этот эффект – **эффектом текстурного затемнения**.

Эффект текстурного затемнения зависит от угла падения светового потока на материал. Чем меньше угол падения светового потока к поверхности материала, тем сильнее тени и тем более темной будет выглядеть поверх-

ность. Если световой поток направлен на материал под углами, близкими к нормали, теней на текстурных элементах не образуется и поверхность выглядит более светлой.

Свет от фасадного светильника падает на поверхность под малым углом, на текстурных элементах образуются глубокие тени, и поверхность выглядит темнее. Эффект текстурного затемнения учтем с помощью коэффициента текстурного затемнения  $k_{\text{текст}}$ .

Коэффициент отражения текстурной поверхности при падении светового потока под малым углом к поверхности запишем так:

$$\rho_t = \rho \cdot k_{\text{текст}}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – коэффициент диффузного отражения материала фасада.

Световой поток от фасадного светильника падает на фасад под малым углом к поверхности. Фоновое освещение, как правило, падает на фасад под значительно большими углами, близкими к нормали, и фоновое освещение теней на текстурных элементах почти не образует. Для фонового освещения эффектом текстурного затемнения можно пренебречь.

Для текстурных фасадов выражение (7) запишем следующим образом:

$$K = \frac{\rho \cdot (E_{\text{ф}} + E_{\text{св}} \cdot k_{\text{текст}} - E_{\text{ф}})}{E_{\text{ф}} \cdot \frac{\rho}{\pi}} = \frac{E_{\text{ф}} + E_{\text{св}} \cdot k_{\text{текст}} - E_{\text{ф}}}{E_{\text{ф}}} = \frac{E_{\text{св}} \cdot k_{\text{текст}}}{E_{\text{ф}}}$$

или

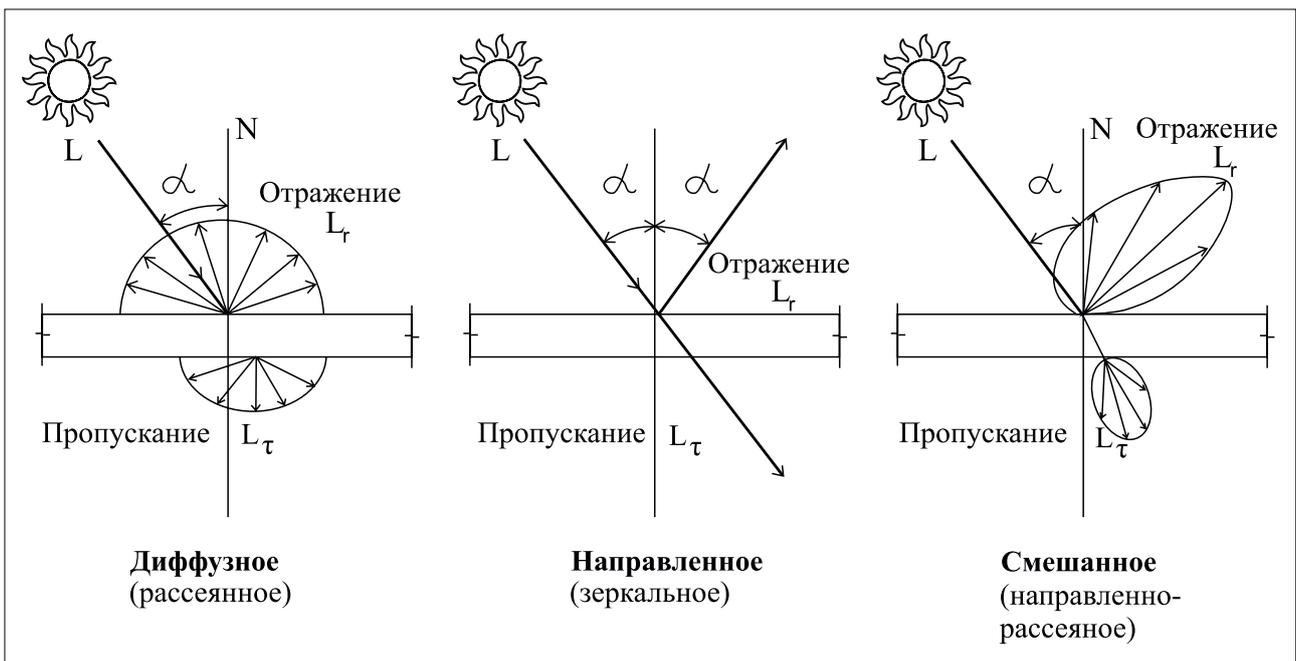


Рис. 6. Виды отражения света от поверхностей

$$E_{св} = \frac{E_{ф} \cdot K}{k_{текст}} \quad (11)$$

Исследований, определяющих  $k_{текст}$ , найти не удалось. При работе над проектами освещения фасадов, облицованных текстурными отделочными материалами, вместе с партнерами мы проверяли эту формулу и определили, что при значении  $k_{текст} = 0,7-0,8$  оценка видимой высоты освещенной области на фасаде звучала «где-то примерно так».

Но видимая высота освещенной области на фасаде уменьшается не только на текстурных отделочных материалах. Глянцевые отделочные материалы также сокращают видимую высоту освещенной области (рис. 6).

### ГЛЯНЦЕВЫЕ ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОЭФФИЦИЕНТ ДИФFUЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ

На глянцевых отделочных материалах присутствует смешанное (направленно-рассеянное) отражение. Более подробно направленно-рассеянное освещение рассмотрено в [4] (рис. 7).

При смешанном отражении часть падающего светового потока зеркально отражается и «улетает» в небо или в землю. А оставшийся световой поток отражается диффузно. Именно диффузное отражение светового потока светильника определяет видимую высоту освещенной области на фасаде.

Коэффициент зеркального отражения зависит от угла падения светового потока. Для стекла эта зависимость представлена на рисунке 8.

Световой поток от светильника падает на стекло под острым углом (большим углом к нормали), например, если световой поток падает под углом  $10^\circ$  к поверхности, коэффициент зеркального отражения будет 0,4. Для глянцевых отделочных материалов таких графиков, увы, не существует. Но подобная зависимость для глянцевых отделочных материалов и материалов из полированного природного камня также выполняется.

При этом фоновое освещение падает на фасад под углами, близкими к нормали, коэффициент зеркального отражения не превышает 4%, и зеркальным отражением для фонового освещения можно пренебречь.

Таким образом, диффузно отражается только оставшаяся после зеркального отражения часть светового потока. Учтем это уменьшение коэффициентом  $k_{глянц}$ .

Запишем выражение (7) с учетом потери части светового потока:

$$k = \frac{\rho \cdot (E_{ф} + E_{св} \cdot k_{глянц} - E_{ф})}{E_{ф} \cdot \frac{\rho}{\pi}} \quad (12)$$

$$= \frac{E_{ф} + E_{св} \cdot k_{глянц} - E_{ф}}{E_{ф}} = \frac{E_{св} \cdot k_{глянц}}{E_{ф}}$$

$$E_{св} = \frac{E_{ф} \cdot K}{k_{глянц}} \quad (13)$$

Уменьшения видимой высоты освещенной области

на глянцевом фасаде оценивал, как и для текстурных фасадов, обсуждая результаты с партнерами. При значении  $k_{глянц} = 0,7-0,8$  оценка видимой высоты освещенной области на фасаде звучала «где-то примерно так».

Физика отражений на текстурном и глянцевом фасадах разная, но значения коэффициентов, учитывающих влияние отделочных материалов фасадов, одинаковые –  $0,7-0,8$ .

### РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ФАСАДЕ ОТ СВЕТИЛЬНИКА

Теперь поговорим о расчете освещенности от светильника на фасаде (рис. 9).

Вертикальная освещенность на фасаде рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$E_v = (I/d^2) \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

Но она не очень удобна, поскольку в ней присутствует  $\sin \alpha$ . Чтобы упростить расчеты, лучше заменить его отношением сторон треугольника (рис. 10).

У многих настенных светильников продольная ось отстоит от стены на 20–30 см.

Если высота освещенной области на фасаде равна 2 м и продольная ось светильника отстоит от фасада на 30 см, значение угла  $\alpha$  составит  $\arctg(0,3/2) = 8,5^\circ$ .

Значения  $\sin \alpha$  и  $\operatorname{tg} \alpha$  для углов меньше  $6^\circ 45'$  различаются только четвертым знаком. А при значении до  $10^\circ$  есть незначительные различия в третьем знаке. Известно, что для инженерных расчетов достаточно точности до третьего знака, поэтому в формуле (14) для нашего частного случая можно заменить  $\sin \alpha$  на  $\operatorname{tg} \alpha$ .

$$\text{Известно, что } \operatorname{tg} \alpha = r/h, \quad (15)$$

где  $\alpha$ ,  $r$  и  $h$  указаны (рис. 9).

Тогда формулу (14) можно записать:

$$E_v = (I/d^2) \cdot \operatorname{tg} \alpha = (I/d^2) \cdot (r/h) = E_{св}, \quad (16)$$

где  $r$  – расстояние от продольной оси светильника до стены,  $h$  – высота видимой на фасаде освещенной области, а  $E_{св}$  – вертикальная освещенность от светильника на фасаде.

Вертикальные освещенности  $E_{св}$  в формулах (11) и (16), или (13) и (16) – это одна и та же величина. Поэтому:

$$E_{св} = K \cdot E_{ф}/k_{текст} (\text{глянц}) = (I/d^2) \cdot (r/h), \quad (17)$$

где  $k_{текст}$  (глянц) – коэффициент, учитывающий уменьшение коэффициента диффузного отражения для текстурных или глянцевых фасадов, который, как раньше мы видели, составляет  $0,7-0,8$ .

Преобразуем равенство (17) и получим:

$$h = (I/d^2) \cdot (r \cdot k_{текст} (\text{глянц})) / (K \cdot E_{ф}) \quad (18)$$

Определим  $d^2$ :



Рис. 9. Определение вертикальной освещенности, создаваемой точечным источником света

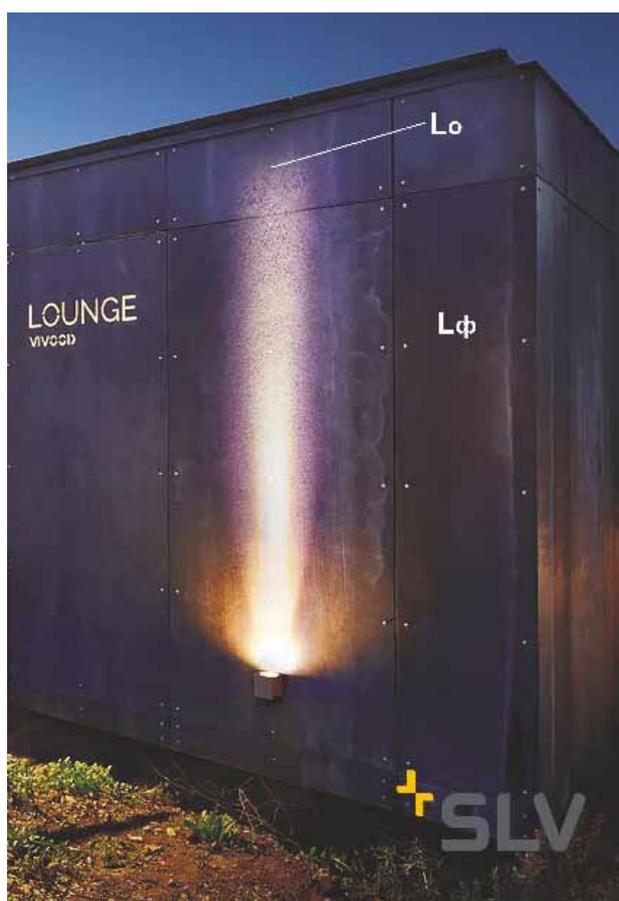


Рис. 10. Определение видимой высоты освещенной области на фасаде

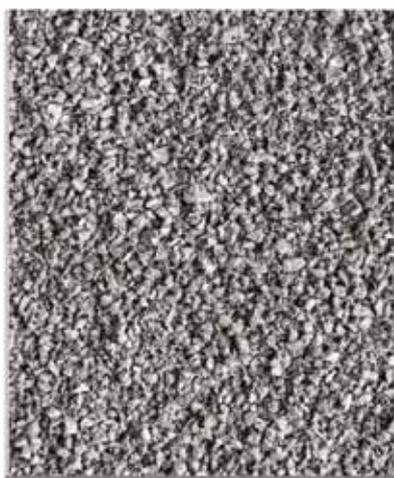


Рис. 7. Смешанное отражение

Рис.8. Зависимость коэффициента зеркального отражения светового потока на границе раздела «воздух-стекло» от угла падения (угол между направлением падающего светового потока и нормалью к плоскости раздела «воздух-стекло»)

$$d^2 = r^2 + h^2. (19)$$

Оценим вклад  $r$  и  $h$  для нашего случая, когда высота освещенной области на фасаде значительно больше, чем расстояние от продольной оси светильника до стены. Например,  $r = 0,3$  м и  $h = 2$  м:  $r^2 = 0,09$  и  $h^2 = 4$ .  $d^2 = 4,09$ , а  $d = 2,02$ . Как видим,  $r$  значительно меньше  $h$  и для нашего частного случая им можно пренебречь. Тогда (18) можно записать:

$$h = \frac{I}{h^2} \cdot \frac{r \cdot k_{\text{текст(глянц)}}}{K \cdot E_{\text{ф}}}. (20)$$

Путем несложных преобразований получаем:

$$h^3 = I \cdot \frac{r \cdot k_{\text{текст(глянц)}}}{K \cdot E_{\text{ф}}}, (21)$$

$$h = \sqrt[3]{I \cdot \frac{r \cdot k_{\text{текст(глянц)}}}{K \cdot E_{\text{ф}}}}, (22)$$

где  $k_{\text{текст(глянц)}} = 0,75$ .

Это формула справедлива, когда светильник отстоит от стены не более чем на 30 см и отношение рассчитанной высоты освещенной области на фасаде к расстоянию продольной оси светильника от стены превышает 10.

Высоту освещенной области на фасаде на практике лучше оценивать следующим образом:

- рассчитываем видимую высоту освещенной области по формуле (22);
- умножаем результат на 0,8 и округляем в меньшую сторону;
- сообщаем заказчику, что видимая высота освещенной области будет от «...» до «...».

У всех людей зрение немного различается, и каждый увидит «свою» высоту освещенной области. Уменьшение/округление учитывает эти индивидуальные особенности. Формула позволяет оперативно оценить видимую высоту освещенной области на фасаде с достаточной точностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щепетков Н.И. Световой дизайн города. М.: Архитектура-С, 2006.
2. Архитектурная физика. Под ред. Оболенского Н.В.М.: Архитектура-С, 2007.
3. Michel L. Light: The Shape of Space. Designing with space and light. Jon Willey & Sons, New York, 1996.
4. Cuttle C. Lighting by design. Architectural press, London, 2003.