

## Выводы

1. Разработана статистическая модель работы кремниевой солнечной батареи. Выведены уравнения, с помощью которых по измеренным в лабораторных условиях характеристикам и справочным метеоданным можно оценить вырабатываемую мощность с погрешностью до 5 %.
2. Выполнен анализ долговременных испытаний кремниевых солнечных батарей и обоснован комплекс климатических и аппаратных факторов, оказывающих влияние на их работу.
3. Спроектирована и изготовлена мобильная станция мониторинга работы солнечной батареи, контролирующая ее основные электрофизические характеристики совместно с температурой, влажностью, давлением воздуха, скоростью ветра, суммарной солнечной радиацией.
4. С использованием мобильной станции проведены испытания кремниевой солнечной батареи в различных регионах Сибири и Дальнего Востока. Создана база данных, состоящая из метеопараметров и параметров исследуемых батарей.
5. На примере г. Томска спрогнозированы и определены оптимальные режимы работы солнечной батареи. Показано, что кремниевая солнечная батарея в течение года способна выработать 160 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-5765.2008.8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Н.Н. Прямое преобразование энергии для автономной энергетики // Энергия: экономика, техника, экология. — 2000. — № 8. — С. 23–34.
2. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. и др. Автоматический пост для мониторинга малых газовых составляющих атмосферного воздуха // Метеорология и гидрология. — 1999. — № 3. — С. 110–118.
3. Yurchenko A., Kozlov A., Volkov A. Climatic and hardware factors influencing the output performances of silicon modules in Siberia and the far east conditions // Proc. of 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference. — Valencia, Spain, 4–8 September 2008. — P. 2989–2991.

Поступила 02.04.2009 г.

УДК 628.93.000.25

## СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ ОБЩЕГО И КОМБИНИРОВАННОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

В.Д. Никитин, К.П. Пашник, А.В. Трубач

Томский политехнический университет  
E-mail: ksandra007@mail2000.ru

Рассматриваются общая и комбинированная системы освещения с энергетической и экономической точек зрения. Предложено математическое описание области, где целесообразно применение местного освещения. Исследуется соотношение показателей общего и местного освещения для создания «единичной освещенности».

### Ключевые слова:

Нормирование освещения, общее освещение, местное освещение, комбинированное освещение, освещенность.

## Введение

Российские осветительные нормы [1] регламентируют 2 системы освещения: общее (ОО, равномерное или локализованное) и комбинированное (КО, общее + местное); при КО освещенность  $E_{КО} > E_{ОО}$ , но по качеству освещения — распределению яркости в поле зрения — оно уступает ОО. Поставлена задача сравнить системы ОО и КО по показателям:

- энергетическим — мощности источников света общего и местного освещения;
- экономическим — капитальным и эксплуатационным затратам.

## 1. Энергетические показатели

1.1. Д.П. Матев [2] высказал мнение, что при использовании местного освещения (МО) снижается мощность, затрачиваемая на освещение. В ряде отечественных изданий появились «вторичные» материалы, повторявшие доводы и формулы Д.П. Матева (иногда и без ссылки на его авторство).

Анализ показал ошибочность предложенной Д.П. Матевым методики расчета экономии мощности, поскольку уязвимо само исходное предположение в [2]: «При некоторых допущениях можно считать, что отношение уровней освещенности, создаваемой светильниками общего освещения в системах комбинированного и общего освещения, равно

отношению соответствующих мощностей...». При современных уровнях ОО проектировщик может расположить световой прибор (СП) на наивыгоднейших (или близких к ним) расстояниях и брать коэффициент минимальной освещенности  $z=1,15$ , т. е. минимальным (рис. 1); но в системе КО, когда регламентируется  $E_{OK} \approx 10\%$  от  $E_n$  (рис. 2), СП «верхнего света» заведомо расположены редко; с увеличением шага СП  $\lambda=L/h$  ( $L$  – расстояние между СП или рядами СП,  $h$  – расчетная высота) значение  $z$  резко возрастает [3]. (Известны установки, где минимальное значение прямой составляющей освещенности выражалось процентами от среднего значения; учет отраженной составляющей «сглаживал» эту ситуацию лишь незначительно).

**1.2.** Помимо уязвимого исходного предположения, в работе [2] есть и другие недостатки; фрагмент анализа приведен в табл. 1 ( $P_{OO}$ ,  $P_{OK}$  и  $P_{MK}$  – мощности соответственно одного общего, общего и местного и местного освещения в системе комбинированного).

Таблица 1. Критическая оценка статьи Д.П. Матеева

| Принципиальные недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Другие замечания                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| С учетом коэффициента минимальной освещенности надо говорить о соотношении $(E_{OK} \cdot z') / (E_{OO} \cdot z)^{-1}$ , где $z'$ и $z$ берутся по рис. 1 [3], а $E_{KO}$ и $E_{OO}$ – по рис. 2 [4]. <b>Фактически Д.П. Матеев принял <math>z'/z=1</math></b> , хотя, реально, $z'$ может быть на порядок больше значения $z$ . | В замене ясного решения с точными значениями мощности $P_{OO}$ , $P_{OK}$ и $P_{MK}$ на «косвенные» данные нет необходимости: реально расчетчик всегда (при новом проектировании, реконструкции и др.) имеет дело с числом СП и потребляемой мощностью как базовой информацией [5]. |

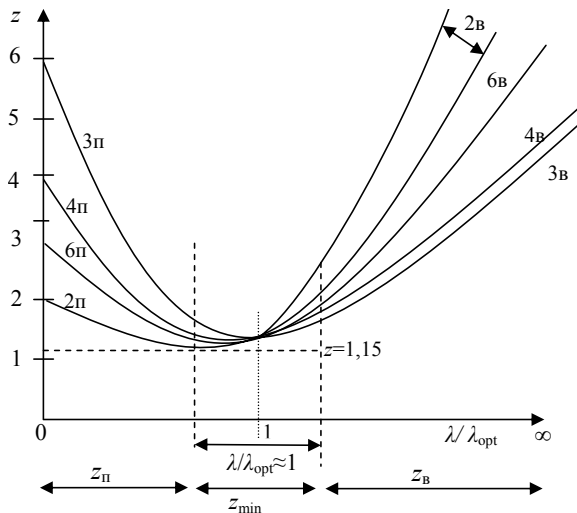


Рис. 1. Зависимость коэффициента минимальной освещенности от шага светильников. Области неравномерности:  $z_n$  – периферийной,  $z_b$  – внутрипольной,  $z_{min}$  (при  $\lambda/\lambda_{opt} \approx 1$ ) – минимальной. Светотехнические поля: 2 – у стены; 3 – треугольное (ромбическое); 4 – прямоугольное; 6 – гексагональное

Следует учитывать, что мощность лампы (или лампы) в СП МО при реальном проектировании определяется не только и не столько формально требуемыми значениями освещенности от МО, но

и иными факторами: размерами (протяженностью) освещаемой зоны, положением СП относительно рабочей поверхности (расстояние, высота) и возможностью тонких светотехнических эффектов. Так, при МО можно создать определенное направление светового потока для повышения контраста, видимости дефектов, предотвращения отраженной блескости и т. п., что обычно лишь в малой степени реализуется при локализованном ОО и практически недоступно – при равномерном.



Рис. 2. Удельный вес ОО в системе КО  $\alpha$  (анализ СНиП 23-05-95\*)

**1.3.** Перейдем к выводу. Мощность лампы при ОО («верхний свет») можно выразить, применив метод коэффициента использования (табл. 2; справа дана мощность для МО). Примем как естественное (и наиболее вероятное) решение, что для ОО в системе КО используются те же лампы и СП, что и в системе одного ОО.

Таблица 2. Расчет мощности ламп для разных видов освещения\*

| Общее освещение                                                                                                                                                                                                                                                                           | Местное освещение                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P_{OO} = p_n n N = \frac{E z S k}{\eta \eta_v}, \quad (1)$                                                                                                                                                                                                                               | $P_{MO} = p_{n2} m M = \frac{\Phi}{\eta_{v2}} m S q, \quad (2)$                                                                                                                                                                   |
| где $p_n$ – мощность лампы, Вт;<br>$N$ – количество светильников;<br>$n$ – число ламп в СП;<br>$S$ – площадь помещения, м <sup>2</sup> ;<br>$E$ – нормируемая освещенность, лк;<br>$k$ – коэффициент запаса;<br>$\eta$ – коэффициент использования;<br>$\eta_v$ – световая отдача, лм/Вт. | где $p_{n2}$ – мощность лампы МО, Вт;<br>$m$ – число ламп в СП МО;<br>$q$ – плотность расположения рабочих мест, м <sup>2</sup> ;<br>$\Phi$ – требуемое значение потока ИС, лм;<br>$\eta_{v2}$ – световая отдача лампы МО, лм/Вт. |

\*При разрядных лампах для определения мощности осветительной установки (ОУ) необходимо  $P_{OO}$  и  $P_{MO}$  умножить на соответствующие коэффициенты, учитывающие мощность пускорегулирующего аппарата,  $K_{ПРА} > 1$ .

В соответствии с формулами (1, 2), возможную экономию мощности при переходе от одного ОО к КО предлагаем оценивать критерием:

$$\Delta = 1 - a b - c d, \quad (3)$$

где  $a = p_m / p_o$  и  $b = S \cdot q / N \cdot n$  – отношение мощностей и отношение числа ламп местного и (одного) общего

освещения;  $c=E'/E$  и  $d=z'/z$  – отношение освещенностей от СП «верхнего света» и отношение коэффициентов минимальной освещенности в системе комбинированного и (одного) общего освещения.

Формула (3) позволяет, после преобразований, получить критическое (предельное) значение плотности рабочих мест

$$q_{\text{крит}} = p_0 n N (p_m m S)^{-1} [1 - (E_{\text{ок}} \cdot z') (E_{\text{оо}} \cdot z)^{-1}], \quad (4)$$

и если  $q > q_{\text{крит}}$  по (4), то целесообразен отказ от МО (по энергетическим соображениям; но в пользу МО могут быть и иные доводы, например, технологические).

## 2. Экономические показатели

Формулы для расчета затрат хорошо известны (табл. 3).

**Таблица 3.** Расчет капитальных и эксплуатационных затрат на освещение

| Характеристика затрат                                                                                                         | Одно общее                                                                                                                    | Комбинированное                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Капитальные затраты $\Sigma K$ на приобретение и монтаж СП и других элементов осветительной установки (в год – обычно 15 %)   | Формула (1.3.14) [4] для установок внутреннего освещения: капитальные затраты зависят от числа ламп, ОП ... и др.             | Суммируются значения капитальных затрат, определенных отдельно для каждого типа СП                       |
| Эксплуатационные затраты $\Sigma Э$ (стоимость электроэнергии, заменяемых ламп, чистки приборов и амортизационные отчисления) | Формула (1.3.15) [4], эксплуатационные расходы зависят от тарифа на электроэнергию, стоимости лампы, ОП, мощности лампы и др. | Значения годовых эксплуатационных расходов определяются отдельно для каждого типа СП и затем суммируются |
| Приведенные затраты для каждого СП $Q_n = 0,15 \Sigma K + \Sigma Э$                                                           | Формулы (1.3.2–1.3.7) [4] – для помещений с естественным освещением, (1.3.8–1.3.13) [4] – без естественного света             |                                                                                                          |

В любой данный момент времени существует значительный **разброс** цен и стоимостей:

|                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| в товаропроводящей сети – цен на СП, ИС, кабельную продукцию, аппараты управления, защиты, магистральные пункты, групповые щитки и другое электротехническое оборудование, различные монтажные конструкции. | в не- и (особенно заметно) специализированных монтажных организациях – стоимостей монтажных и связанных с ними общестроительных работ (скидки, часто крупные, по неформальным основаниям). |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

На этот разброс накладывается – нередко очень существенная – динамика, т. е. временная зависимость (цен на элементы ОУ, электрическое оборудование, стоимость монтажа), обусловленная политикой производителей, рыночной конъюнктурой, изменениями в финансово-кредитной системе и др.

В силу разброса цен и стоимостей и их динамики ограничимся сравнением экономических показателей ОО и КО в общем виде, чтобы получить целесообразное соотношение ОО и МО в системе КО.

**2.2.** В качестве первого приближения рассмотрим случай, когда  $E = \text{const}$ . От удельного веса ОО в КО зависят контрастная чувствительность, ско-

рость различения, другие функции и многие технико-экономические показатели, в частности, производительность труда. Это делает целесообразным разработку технико-экономического обоснования значения  $\alpha$  как решения многопараметрической задачи вместо жесткого нормирования (значения  $\alpha$  по СНиП даны на рис. 2). Производительность труда, установленная (расчетная) мощность, капитальные затраты, стоимость обслуживания, приведенные затраты, себестоимость продукции, количество брака и др. параметры в общем виде можно представить уравнением:

$$\Pi_i = A_0 + B_0 E \cdot \alpha + A_M + B_M \cdot E \cdot (1 - \alpha) = \Sigma A + B_M \cdot E + \Delta B \cdot E \cdot \alpha, \quad (5)$$

где фактор  $B$  относится к той части параметра, которая зависит ( $A$  – не зависит) от уровня освещенности; индексы  $_0$  и  $_M$  обозначают общее и местное освещение.

При  $\alpha = 1 \Sigma A$  в (5) претерпевает разрыв – превращается в  $A_0$ , т. к. все расходы, связанные с МО, обращаются в нуль, и тогда максимальное рентабельное значение

$$\alpha_p = 1 - A_M / (\Delta B \cdot E).$$

Решение в первом приближении (используются графические построения на рис. 3) представлено в табл. 4.

**Таблица 4.** Уравнение функций  $Y_j(\alpha)$ ,  $j=1,2,3$ , и выбор системы освещения с учетом  $\alpha$

| Функция                         | Уравнение $Y_j(\alpha)$                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Y_1$ на рис. 3, а              | $A_0 + B_0 \cdot E \cdot \alpha$                                                                                                                                                              |
| $Y_2$ на рис. 3, б              | $A_M + B_M \cdot E \cdot (1 - \alpha)$                                                                                                                                                        |
| $Y_3$ на рис. 3, в              | $\begin{cases} A_0 + A_M + B_M \cdot E + E \cdot (B_0 - B_M) \cdot \alpha, & \text{при } 0 \leq \alpha < \alpha_p \\ A_0 + B_0 \cdot E & \text{при } \alpha_p \leq \alpha \leq 1 \end{cases}$ |
| Значения $\alpha^*$             | Целесообразен выбор системы                                                                                                                                                                   |
| $0,1 \leq \alpha \leq \alpha_p$ | КО (выбор параметра $\Pi_i = \Pi_i(A_0, B_0, A_M, B_M)$ влияет на $\alpha_p$ )                                                                                                                |
| $\alpha_p < \alpha \leq 1$      | Одного ОО (использование МО возможно по иным основаниям)                                                                                                                                      |

\*В общем случае  $\alpha_p$  зависит от плотности рабочих мест, см. ур. (4), и выбора параметра  $\Pi_i$

Рассмотрим случай раздельного учета освещенности от системы общего ( $E_0$ ) и комбинированного ( $E_K$ ) освещения.

По аналогии с ур. (5) имеем

$$A_0 + B_0 \cdot E_K \cdot \alpha + A_M + B_M \cdot E_K \cdot (1 - \alpha) = A'_0 + B'_0 \cdot E_0,$$

и полагая, что  $A'_0 \approx A_0$ , придем к уравнению

$$\alpha \cdot (B_0 \cdot E_K - B_M \cdot E_K) = B_0 \cdot E_0 - A_M - B_M \cdot E_K.$$

Окончательно получим

$$\alpha_p = (B_0 - B_M)^{-1} [B_0 \cdot (E_{00}/E_{K0}) - A_M / (E_K - B_M)],$$

где функция  $E_{00}/E_{K0}$  показана на рис. 2.

**2.3.** Следует отметить важное обстоятельство: на рис. 3  $\alpha_1 > |\alpha_2|$  (или  $\text{tg} \alpha_1 > |\text{tg} \alpha_2|$ ). Если при МО (почти) весь поток падает на рабочую зону, с площадью  $S'$  (в англоязычной светотехнической литературе – «область зрительной задачи», термин

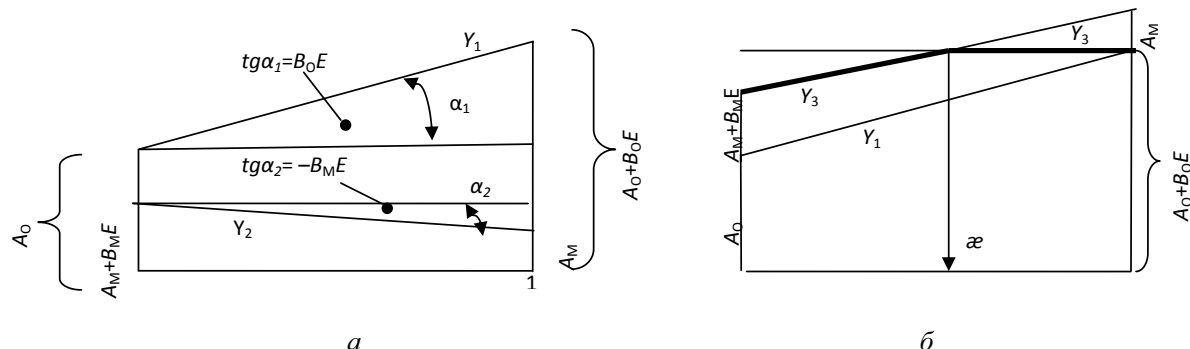


Рис. 3. Зависимость от  $\alpha$  стоимости освещения: а) общего и местного; б) комбинированного. (Решение  $Y_3$  выделено жирной линией)

вдвое длиннее, но не лучше), то при ОО часть потока ложится на:

- стены (потери растут с увеличением высоты подвеса СП и при переходе от концентрированной КСС к глубокой и косинусной);
- грузоподъемные механизмы, оборудование, самого человека, и, в результате затенений, снижается поток на рабочую зону;
- расчетную поверхность вне рабочей зоны ( $q^{-1} \gg S'$ ; потери тем больше, чем меньше  $S'$  и ниже плотность рабочих мест).

В результате для МО «1 лк» обходится существенно дешевле, чем для общего. В табл. 5 указано соотношение мощностей, необходимых для создания расчетной освещенности 1 лк при МО и ОО, это соотношение  $\delta=24$ .

Таблица 5. Соотношения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  при системе КО показателей общего ( $E_{OK}=E_1$ ) и местного ( $E_{MK}=E_2$ ) освещения (параметры в примерах:  $\eta_1=\eta_2$ ;  $k_1=k_2$ ;  $z_1=0,5z_2$ ;  $\eta_1=0,4$ ;  $\eta_2=0,7$ ;  $S'=0,36$  м<sup>2</sup>;  $q=0,1$ ;  $\alpha=0,12$ )

| Соотношение                                           | Формула                                                                                                        | Пример                                                                                           |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Освещенностей $E_1/E_2$                               | $\alpha = \frac{\eta_1}{1-\eta_1} \cdot \frac{S'}{S/N}$                                                        | $\frac{0,4}{0,7} \cdot \frac{0,36}{S/N}$                                                         |
| Мощностей $P_1/P_2$ (при $E=\text{const}$ )           | $\beta = \frac{\eta_1}{1-\eta_1} \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1} \cdot \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{1}{S' \cdot q}$ | $\frac{0,12}{0,88} \cdot \frac{0,7}{0,4} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,36 \cdot 0,1} = 3,31$          |
| Значений потоков $\Phi_1/\Phi_2$                      | $\gamma = \frac{E_K \cdot \eta_1 \cdot z_1}{\Phi_2 \cdot \eta_2 \cdot z_2} \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1}$        | $\frac{E_K \cdot \eta_1 \cdot 0,7}{\Phi_2 \cdot \eta_2 \cdot 0,1} \cdot \frac{0,7}{2 \cdot 0,4}$ |
| $(P \cdot E^{-1})_1/(P \cdot E^{-1})_2$ («цена» 1 лк) | $\delta = \frac{z_1 K_1 \eta_1 \eta_2}{z_2 K_2 \eta_1 \eta_1 S' q}$                                            | $\frac{0,7}{2 \cdot 0,4 \cdot 0,36 \cdot 0,1} = 24,2^{**}$                                       |

Эту ситуацию в терминах теоретической светотехники можно объяснить (несколько огрубляя) так: при прочих равных условиях мера множества лучей («геометрический фактор» в [5]) будет больше у излучателя, который расположен ближе к объекту. Другим проявлением того же по существу эффекта является на порядок меньшая «цена» 1 кд·м<sup>-2</sup> искусственного светлого фона на просвет в сравнении с фоном, работающим на отражение (например, в рекламном освещении): близко расположенный источник экономнее. Чисто монтаж-

ные соображения здесь не учитываются, но они, как правило, также в пользу МО; эксплуатационные достоинства МО очевидны.

### Заключение

Математическое описание области, где целесообразно МО и, следовательно, оправдан выбор КО, представлено в ур. (4), табл. 4 и на рис. 4; возможно расширение этой области для достижения светотехнических эффектов, повышающих качество освещения.

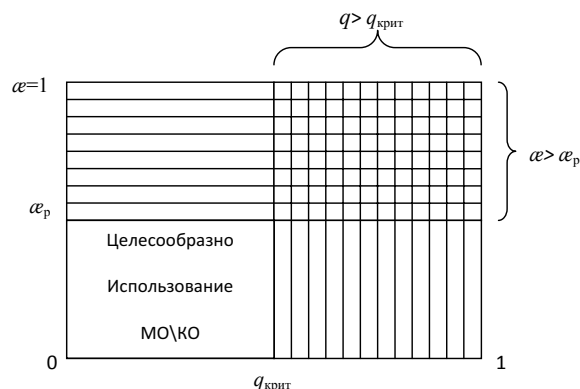


Рис. 4. Область целесообразного выбора МО\КО в зависимости от  $\alpha_p$  и  $q_k$

### Выводы

1. Выявлены неточности в предложенной Д.П. Матеевым методике расчета экономии мощности при использовании местного освещения.
2. Показаны достоинства местного освещения, получены точные выражения для оценки возможной экономии мощности при его использовании.
3. Предложено математическое описание области целесообразного применения местного освещения с учетом плотности рабочих мест и доли общего освещения в системе комбинированного освещения. Оптимизировано соотношение показателей местного и комбинированного освещения, в частности, мощностей для создания единичной освещенности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительные нормы и правила РФ «Естественное и искусственное освещение», СНиП 23-05-95 // Светотехника. – 2004. – № 2. – С. 42–44.
2. Матев Д.П. Анализ возможностей экономии электрической энергии в системе комбинированного освещения // Светотехника. – 1998. – № 4. – С. 42–44.
3. Вайнштейн В.Б., Никитин В.Д. Расчет освещения комбинированным методом. – Томск: Изд-во ТПИ, 1974. – 103 с.
4. Никитин В.Д., Серикова Г.Н. Экономика осветительных установок. – Томск: Изд-во ТПИ, 1988. – 78 с.
5. Сапожников Р.А. Теоретическая фотометрия. – М.: Энергия, 1977. – 264 с.

*Поступила 19.01.2009 г.*