

УДК 628.931

МНОГОФАКТОРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Е. В. СОБОЛЕВ, Е. Н. ПОДДЕНЕЖНЫЙ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

В связи с тем, что расход электроэнергии на освещение значителен и составляет 11–14 % от всей потребляемой электроэнергии в стране, а экономия энергетических ресурсов является актуальной проблемой, то применение энергоэффективных, обеспечивающих минимальный расход электроэнергии, источников света является важнейшей задачей. На сегодняшний день наиболее перспективными источниками света являются светодиоды (СД), которые характеризуются низким энергопотреблением и фантастическим сроком службы (до 100000 ч), однако обладают относительно высокой стоимостью.

В настоящее время в продаже появилось огромное количество различных светодиодных источников света (СИС), отличающихся по своему назначению, светотехническим характеристикам, а также энергетическим характеристикам. Все вышеперечисленные характеристики влияют на стоимость СИС. С другой стороны, при разработке систем освещения (СО) проектировщик сталкивается с неограниченным количеством помещений, каждое из которых обладает своими характеристиками (габаритные размеры, коэффициенты отражения от поверхностей и т. д.). И поэтому возникает вопрос, какие же СД необходимо и наиболее выгодно использовать для разработки СО в данном помещении?

Проектирование СО на основе СИС затруднено также из-за отсутствия методов расчета и систематизированной информации по световой эффективности СИС, которое обусловлено недостаточным прогрессом в международной стандартизации этого направления и доступного по ценам измерительного оборудования. Поэтому возникает важная задача разработки метода расчета электрического освещения (ЭО) с применением СИС.

Постановка задачи

Необходимо разработать метод расчета ЭО с применением СИС, учитывающий как характеристики СИС, так и характеристики помещения. Также разрабатываемый метод должен определять экономическую целесообразность использования данного СИС для создания рассматриваемой СО.

Состояние вопроса

Светотехнические расчеты позволяют выполнить следующее:

- 1) определить количество и единичную мощность источников света осветительной установки, обеспечивающей требуемую освещенность в помещении (на рабочей поверхности);
- 2) для существующей (спроектированной) осветительной установки рассчитать освещенность в любой точке поверхности освещаемого помещения;

3) определить качественные показатели осветительной установки (коэффициент пульсации, цилиндрическую освещенность, показатели ослепленности и дискомфорта).

Основной светотехнический расчет освещения заключается в решении задач по приведенным выше п. 1 и 2. Для этой цели применяются два метода расчета электрического освещения: метод коэффициента использования светового потока и точечный метод.

Метод коэффициента использования светового потока применяется для расчета общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей, в основном для расчета светового потока источника (источников) света. Этот метод позволяет рассчитывать также среднюю освещенность горизонтальной поверхности с учетом всех падающих на нее потоков, как прямых, так и отраженных. Он не применим при неравномерном размещении светильников, расчете освещенности в характерных точках как негоризонтальных, так и горизонтальных поверхностей.

Упрощенной формой метода коэффициента использования светового потока является метод удельной мощности на единицу освещаемой площади. Применяется этот метод для ориентировочных расчетов общего равномерного освещения. Максимальная погрешность расчета по методу удельной мощности составляет $\pm 20\%$.

Точечный метод расчета освещения позволяет определить освещенность в любой точке поверхности освещаемого помещения при любом равномерном или неравномерном размещении светильников. Он часто используется как проверочный метод для расчета освещенности в характерных точках поверхности. С помощью точечного метода можно проанализировать распределение освещенности по всему помещению, определить минимальную освещенность не только на горизонтальной, но и наклонной поверхности, рассчитать аварийное и местное освещение.

Основной недостаток точечного метода расчета заключается в неучете отраженного светового потока от стен, потолка и рабочей поверхности помещения.

Таким образом, для решения поставленной задачи, т. е. разработки метода расчета ЭО с применением СИС, учитывающего как характеристики СИС, так и характеристики помещения, может быть использован метод коэффициента использования светового потока. Однако для этого необходим предварительный расчет коэффициентов использования для СИС.

Оценку эффективности энергосберегающих мероприятий в рыночных условиях функционирования, в соответствии с концепцией дисконтирования потоков реальных денег, производят с использованием различных показателей, к которым относятся: чистый дисконтированный доход (ЧДД), индекс доходности, динамический срок окупаемости и др. [1].

Сравнение нескольких вариантов, как правило, производят по ЧДД.

Чистый дисконтированный доход – прибыль, полученная за весь срок реализации энергосберегающего мероприятия и дисконтированная к году вложения инвестиций, определяется как превышение интегральных результатов над интегральными затратами.

Если $\text{ЧДД} > 0$, то прибыль инвестиций выше нормы дисконтирования, мероприятие является эффективным и может рассматриваться вопрос о его принятии. Чем больше ЧДД, тем эффективнее мероприятие (при сравнении нескольких вариантов). Если $\text{ЧДД} < 0$, то мероприятие неэффективно, является убыточным для инвестора.

Таким образом, рассчитав ЧДД, можно оценить эффективность спроектированной СО. При сравнении нескольких СО наиболее экономически целесообразной является та, у которой больше ЧДД.

Способ решения

Для решения поставленной задачи необходимо разработать метод, который должен:

- 1) проводить светотехнический расчет с применением СИС согласно [2];
- 2) проводить анализ соответствия светотехнических характеристик спроектированной СО и требуемых;
- 3) определять экономическую целесообразность использования данного СИС для создания рассматриваемой СО.

Из перечисленных требований к методу расчета его можно рассматривать как задачу оптимизации следующего типа: из m типов СИС определить количество n СИС данного типа необходимое для создания равномерного освещения в рассматриваемом помещении ($a \times b \times H$) и обеспечивающее минимум затрат на создание СО.

Исходя из формулировки задачи оптимизации представим предлагаемый метод в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ЧДД}_{ij} \rightarrow \max; \\ E_p = E_{\min}; \\ \Delta\Phi = \overline{-10\%;20\%}; \\ i = \overline{1, m}; \\ j = \overline{1, m-1}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где ЧДД_{ij} – чистый дисконтированный доход при использовании j -го СИС вместо i -го для создания СО в данном помещении; E_p, E_{\min} – расчетное и минимальное (согласно [2]) значения освещенности для данного помещения соответственно; $\Delta\Phi$ – отклонение расчетного светового потока от требуемого.

Согласно [3] отклонение не должно превышать $-10\dots+20\%$.

В развернутом виде система (1) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Пр}_{ij} \sum d_t - \Delta Z_{ij} \rightarrow \max; \\ n_{jp} = \frac{E_{\min} \cdot k_3 \cdot S \cdot z}{\Phi_{\text{сис}} \cdot \eta_c \cdot \eta_n}; \\ \frac{\Phi_{\text{сис}} \cdot \eta_c \cdot \eta_n \cdot n_{jnp}}{E_{\min} \cdot k_3 \cdot S \cdot z} = \overline{-10\%;20\%}; \\ i = \overline{1, m}; \\ j = \overline{1, m-1}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где Пр_{ij} – чистая прибыль при использовании j -го СИС вместо i -го, р.; d_t – коэффициент дисконтирования на каждый месяц; ΔZ_{ij} – начальные капитальные вложения, р.; η_c, η_n – КПД светильника и помещения соответственно, о. е.; η_n, n_{jnp} – расчетное и принятое значения количества СИС соответственно

Особенности предлагаемого метода:

1) при расчете ЧДД за начальные капитальные вложения принимаем стоимостную разницу между СО, выполненной с использованием j -го СИС, и СО, выполненной с использованием i -го СИС, т. е. сумму денег, которую необходимо доплатить, чтобы для создания требуемой СО вместо i -го СИС использовать j -й СИС;

2) при отсутствии данных КПД светильников принимаем 0,7 (для светильников с углом излучения $\alpha > 80^\circ$) и 0,9 (для светильников с углом излучения $\alpha \leq 80^\circ$ с учетом полного угла отражения стекла);

3) КПД помещения рассчитываются по методике, изложенной в [3], [4] для различных углов излучения СИС с типом диаграммы направленности по Ламберту.

Алгоритм многофакторного метода расчета ЭО с применением СИС представлен на рис. 1 (светотехническая часть) и рис. 2 (экономическое обоснование использования данного СИС).

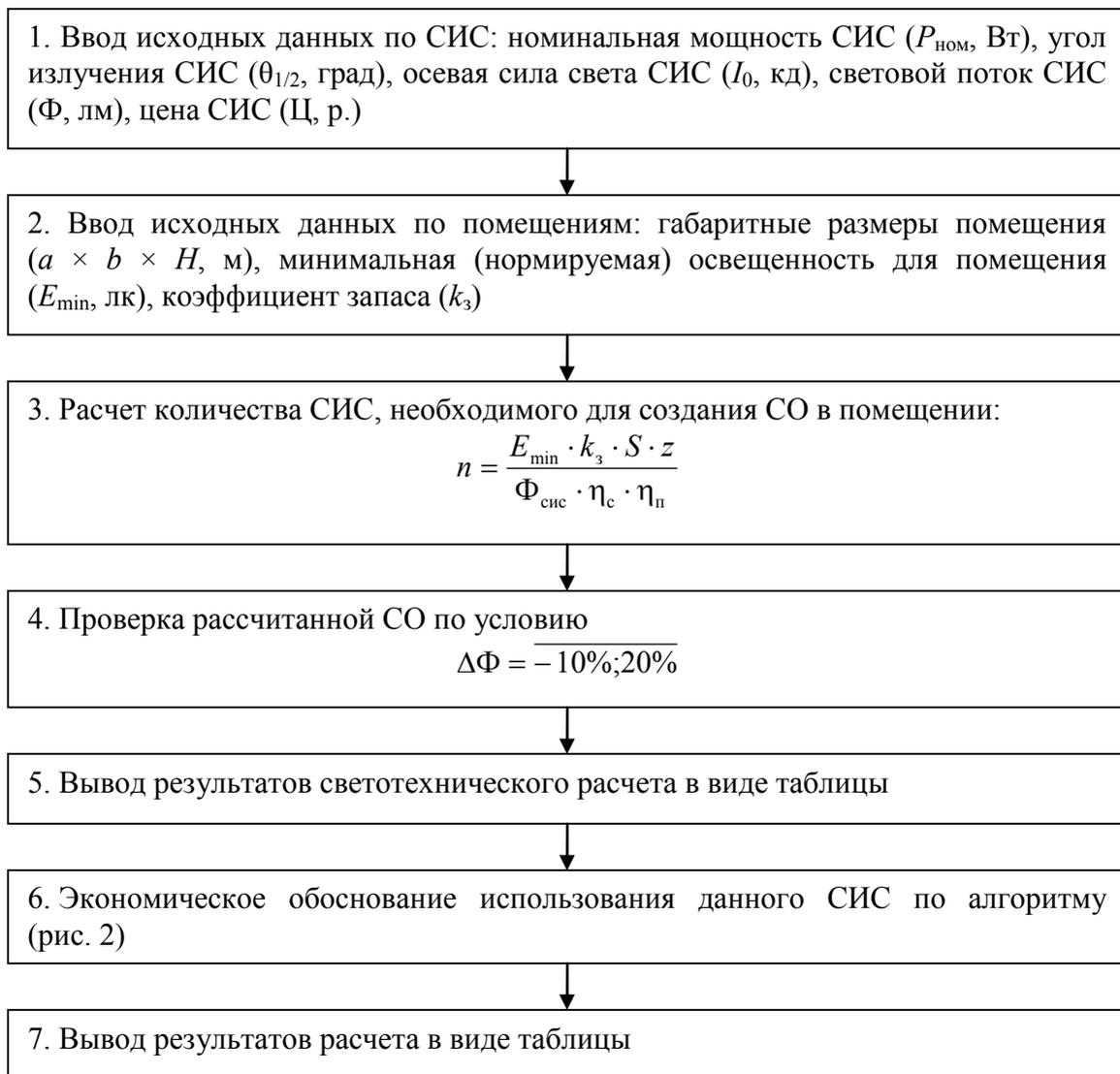


Рис. 1. Алгоритм светотехнического расчета

Особенности алгоритма светотехнического расчета:

1) если производитель СИС в качестве паспортных данных приводит только угол излучения и осевую силу света, то световой поток СИС рассчитывается по методике, изложенной в [5];

2) расчет по п. 3 и проверка по п. 4 (рис. 1) производятся для всех m типов СИС;
 3) результаты светотехнического расчета (рис. 1, п. 5), представленные в виде таблицы для $(m-g)$ СО, где g – количество СО, не удовлетворяющих условию п. 4, являются исходными данными для экономического обоснования.

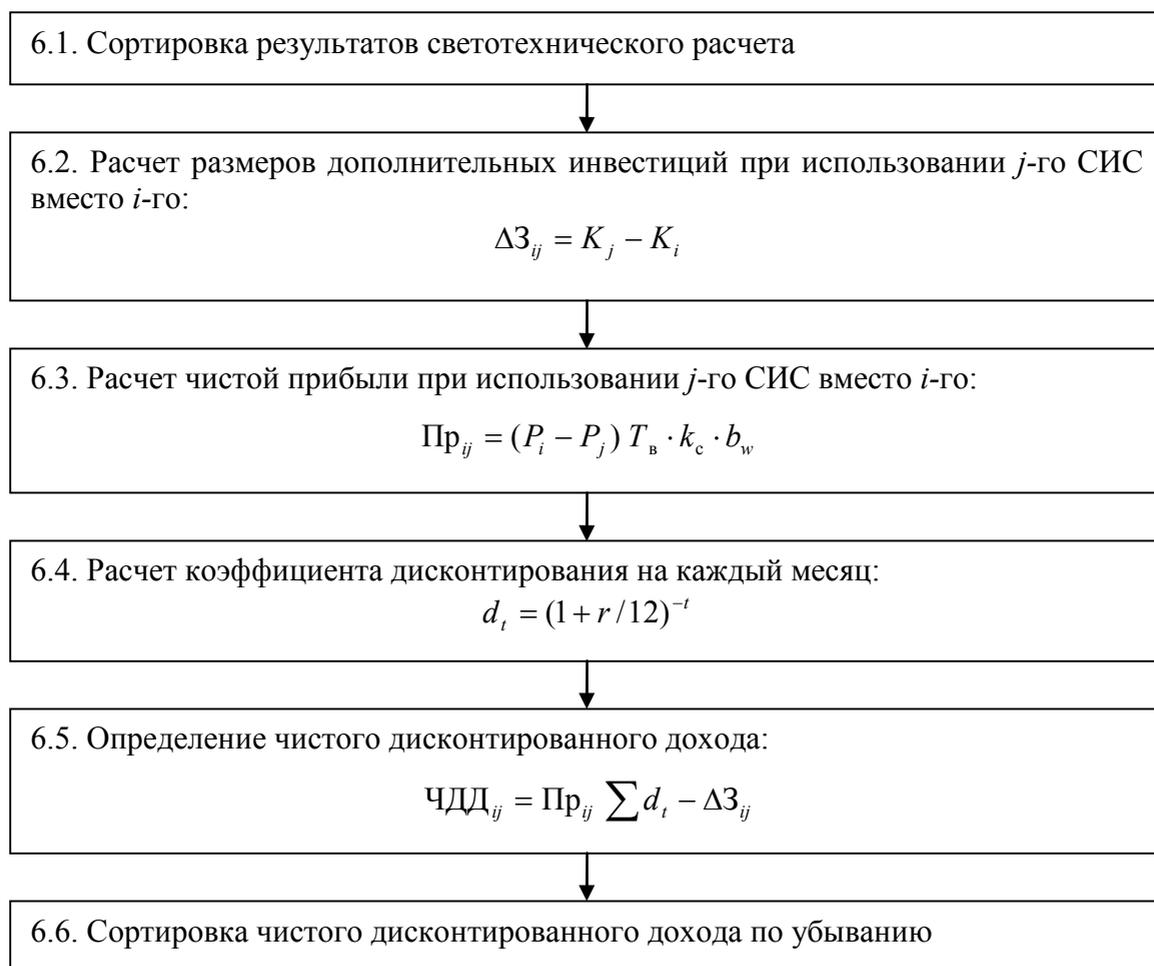


Рис. 2. Алгоритм экономического обоснования использования данного СИС

Особенности алгоритма экономического обоснования использования данного СИС:

1. Сортировка результатов светотехнического расчета (рис. 2, п. 6.1) осуществляется по условиям:

$$\begin{cases} K_i < K_j; \\ P_i > P_j, \end{cases} \quad (3)$$

где K_i , K_j – капитальные вложения для создания СО на основе i -го и j -го СИС соответственно; P_i , P_j – мощности i -го и j -го СИС соответственно.

2. За норму дисконтирования принимается банковская ставка рефинансирования согласно [6].

Результаты исследований и их обсуждение

На основе предлагаемого метода и алгоритмов разработана программа для ПЭВМ в приложении Microsoft Excel. Программа позволяет производить

светотехнические расчеты с применением СИС и получать результаты в виде таблиц, характеризующих целесообразность использования данного СИС для создания рассматриваемой СО.

На основе разработанной программы предложен проект ЭО жилищно-коммунального сектора с применением СИС. Объектами исследования выступали поэтажные коридоры, лифтовые холлы, лестницы и лестничные площадки жилого дома.

В качестве исходных данных были выбраны в произвольном порядке из существующей базы данных СД с различными светотехническими, энергетическими и ценовыми характеристиками.

Исходные данные по помещениям представлены в таблице.

Исходные данные по помещениям

Вид помещения	a , м	b , м	H , м	E_{\min} , ЛК	k_z
Помещение 1 (коридор)	1,6	6	3	20	1,25
Помещение 2 (лифт)	1,5	1,5	2,2	20	1,25
Помещение 3 (лестничная площадка)	1,5	3	3	10	1,25

Работу программы рассмотрим на примере помещения 2 (лифт).

Исходные данные по помещениям и СИС поступают в расчетно-логическую часть программы, где происходит светотехнический расчет для всех выбранных типов СИС из базы данных. Также подсчитываются капитальные вложения на приобретение СИС для всех спроектированных СО.

Фрагмент результатов светотехнического расчета для помещения 2 (лифт) представлен на рис. 3.

№ п/п	Тип светодиода	Помещение 2 (лифт)					$\Delta\Phi$	$\Delta\Phi$, %
		N , шт.	$N_{\text{окр}}$, шт.	$\Phi_{\text{св}}$, лм	$P_{\text{св}}$, Вт	Стоимость проекта, р.		
16	ARPL-Star-1W Warm White X01W	4,667	5	225,00	5,00	21752,835	0,071	7,130
17	ARPL-Star-1W White (WC61E)	4,2	4	200,00	4,00	17402,268	-0,048	-4,773
18	FYLP-1W-WWB	4,667	5	225,00	5,00	26549,614	0,071	7,130
19	FYLP-1W-UWB	4,667	5	225,00	5,00	26549,614	0,071	7,130
23	FYLP-3W-WWL	2,334	2	180,00	6,00	15617,420	-0,143	-14,296
24	FYLP-3W-UWL	2,334	2	180,00	6,00	15617,420	-0,143	-14,296
35	3w white 120deg	2,8	3	225,00	9,00	36678,626	0,071	7,130
39	5w white 120deg	1,4	1	150,00	5,00	20213,404	-0,286	-28,580
26	ARPL-TO3 5W White-NS	2,063	2	280,00	10,00	87457,552	-0,030	-3,042
37	3w white 180deg	3,397	3	255,00	9,00	36678,626	-0,117	-11,699
42	LiTK-5W WHITE 180deg	1,75	2	330,00	10,00	40426,807	0,143	14,272
38	3w white 60deg	1,474	1	65,00	3,00	12226,209	-0,322	-32,174
41	5w white 60deg	0,661	1	145,00	5,00	20213,404	0,513	51,304

Рис. 3. Результаты светотехнического расчета для помещения 2 (лифт) (фрагмент)

Как видно из рис. 3, некоторые из спроектированных СО не проходят по $\Delta\Phi$. Такие СО отбрасываются и в дальнейшем расчете не участвуют. Для оставшихся СО производится экономическое обоснование.

Сортировка результатов светотехнического расчета (рис. 2, п. 6.1) для помещения 2 (лифт) представлена на рис. 4.

Помещение 2 (лифт)

№ п/п	Тип светодиода	$P_{св}$, Вт	Кап вложения, р.
17	ARPL-Star-1W White (WC61E)	4,000	17402,268
54	HPL-H44LW1BA	3,000	22190,466
58	HPL-H77LN1BA	3,000	23104,343
62	HPL-H77FN1BA	3,000	23104,343
59	HPL-H77LN1BA	3,000	23902,376

Рис. 4. Сортировка результатов светотехнического расчета

Как видно из рис. 4, условию сортировки результатов светотехнического расчета (3) удовлетворяют только два первых СД. Однако использование СД № 54 вместо СД № 17 не целесообразно, так как срок окупаемости составит более трех лет. Окончательно принимаем для помещения 2 (лифт) СО с применением четырех СД типа ARPL-Star-1W White (WC61E), при этом капитальные вложения на приобретение СД для проектирования СО в помещении 2 (лифт) составят 17400 р.

Аналогично для помещения 1 (коридор) была принята СО с применением шести СД типа 3w white 60deg, при этом капитальные вложения составят 73400 р., для помещения 3 (лестничная площадка) – четыре СД типа ARPL-Star-1W White (WC61E), капитальные вложения составят 17400 р.

Капитальные вложения на приобретение СД для реконструкции жилого дома составят 3478000 р. Для сравнения, при использовании для проектирования СО во всех трех помещениях СД типа ARPL-Star-1W White (WC61E) капитальные вложения составят 3697900 р. Следовательно, применение разработанной программы уже на стадии проектирования СО жилого дома позволяет получить экономию в размере 219900 р.

Для подтверждения достоверности результатов светотехнического расчета был проведен расчет ЭО помещения 2 (лифт) в программе DIALux. Для этого предварительно был представлен СИС используемый для освещения помещения 2 (лифт) в формате IES [7]. По результатам расчета отклонение средней освещенности от требуемой составило 5 % при равномерности освещения 0,81.

Заключение

На основе существующих методов разработан многофакторный метод расчета ЭО с применением СИС, учитывающий как характеристики СИС, так и характеристики помещения. Также разработанный метод определяет экономическую целесообразность использования данного СИС для создания рассматриваемой СО.

Разработаны алгоритмы анализа многофакторного метода расчета ЭО с применением СИС. На основе предлагаемого метода и алгоритмов разработана программа для ПЭВМ в приложении Microsoft Excel. Программа позволяет производить светотехнические расчеты с применением СИС и получать результаты в виде таблиц, характеризующих целесообразность использования данного СИС для создания рассматриваемой СО.

Предложен проект ЭО жилищно-коммунального сектора с применением разработанной программы, использование которой уже на стадии проектирования СО жилого дома позволило получить экономию в размере 219900 р. При этом экономия платы за электроэнергию при реконструкции одного жилого дома составит 2536137,82 р. при сроке окупаемости 2,08 года.

Литература

1. Полозова, О. А. Методы экономического обоснования энергосберегающих мероприятий / О. А. Полозова // Организация и проведение энергетического обследования субъектов хозяйствования Республики Беларусь : материалы семинара. – Гомель, 2001. – С. 112–118.
2. ТКП 45-2.04-153–2009 (02250). Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва, 2010. – 108 с.
3. Епанешников, М. М. Электрическое освещение : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / М. М. Епанешников. – Изд. 4-е, перераб. – Москва : Энергия, 1973.
4. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.
5. Соболев, Е. В. Техничко-экономическая оценка эффективности использования светодиодных источников света / Е. В. Соболев, А. В. Иванейчик // Актуальные проблемы энергетики : сб. материалов 63 науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов (апрель 2007 г.). – Минск, 2008. – С. 198–200.
6. Национальный банк Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Минск, 2003. – Режим доступа: <http://www.nbrb.by>.
7. IESNA Recommended Standard File Format for Electronic Transfer of Photometric Data. IESNA LM-63-95. – New York: Illuminating Engineering Society of North America, 1995.

Получено 12.04.2010 г.