

УДК 628.981

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

Кухарчук А.В., Ромодин А.В., Лейзгольд К.А., Каширин А.С., Захаров А.А.
*ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический институт», Пермь,
e-mail: kuharchuk@msa.pstu.ru*

Выполнен анализ современных подходов к описанию состояния «среднего» неба. Предложен метод учета распределения яркости по небосводу, наличия установившегося снежного покрова и различного состояния облачности по сезонам в стандартных моделях. Выполнен сбор и систематизация данных по состоянию облачности в г. Перми. С помощью статистических данных строительной климатологии получена модель «среднего» неба по временам года и дана оценка использования естественного света в типовом помещении. В результате выполненной работы получена количественная оценка влияния естественной освещенности на освещение помещения и рассчитан потенциал снижения потребления электрической энергии при применении автоматизированного управления. Полученные в работе результаты могут быть использованы для оценки эффективности использования систем регулирования искусственной освещенности в помещениях зданий населенных пунктов, расположенных на 58-й широте северного полушария.

Ключевые слова: модель естественного освещения, коэффициент естественной освещенности, яркость неба, суммарная освещенность, регулирование освещенности, экономическая эффективность

THE VALUATION OF ECONOMIC EFFICIENCY OF INDOOR LIGHTING REGULATION SYSTEMS

Kukharchuk A.V., Romodin A.V., Leyzgold K.A., Kashirin A.S., Zakharov A.A.
Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: kuharchuk@msa.pstu.ru

This article presents analysis of modern approaches to the description of the distribution of natural light. Authors proposes the method of accounting brightness distribution across the sky, the availability of a steady snow cover and the status of various seasonal cloud cover in the standard models. Gathered Data of cloud cover are processed in the city of Perm during the period in question. The averaged model of sky is obtained by statistical data manuals on building climatology, quantitative assessment is given of the use of natural light in typical room. As a result of work is obtained the quantitative assessment of the impact of natural light in the room and potential of energy saving is estimated by use of automated control. The results can be used to assess the effectiveness of the control systems of artificial lighting in the buildings located in the city of Perm.

Keywords: model of natural light, the ratio of natural light, the brightness of the sky, the total illuminance, the total light regulation, economic efficiency

По действующим в Российской Федерации нормам все помещения, предназначенные для длительного пребывания людей, должны иметь естественное освещение. Одним из средств энергосбережения в системах освещения научное сообщество и компании-интеграторы автоматизированных систем управления освещения (в том числе «Умный дом») рекомендуют зонное регулирование искусственного освещения [3, 4, 5]. Объект освещения разбивается на зоны в зависимости от условий обеспечения естественным освещением. На рабочих поверхностях каждой зоны обеспечивается поддержание требуемых уровней освещенности, создаваемых естественным и искусственным освещением, что позволяет снижать световой поток от источников искусственного освещения в зонах с повышенным естественным освещением.

Существенный интерес представляет анализ эффективности применения систем регулирования освещенности за счет использования естественного света. Есте-

ственное освещение помещений поддается количественным и качественным оценкам, зависящим от облачности неба, географического расположения, ориентации светопропускающих проемов по сторонам света, способа и вида освещения, времени суток и др. Этим обуславливается сложность оценки эффективности использования естественного освещения системами автоматизированного управления освещенностью.

Для решения этой задачи необходимо оценить степень влияния естественного света и количественно оценить его использование в течении года.

В данной работе рассмотрен расчет потенциала использования систем регулирования освещенности для типовой учебной аудитории.

Параметры исследуемой аудитории: тип помещения – учебная аудитория, длина – 5 м, глубина – 5,5 м, высота – 3 м, ширина окна – 2 м, высота окна – 2 м, высота подоконника – 0,8 м, высота рабочих поверхностей – 0,8 м, число окон в помещении – 2 шт.,

тип естественного освещения – боковое левое. План помещения представлен на рис. 1.

Параметры системы освещения аудитории: количество светильников – 9 шт., мощность одного светильника – 40 Вт, тип ламп – люминесцентные, расстояние между светильниками – 1,5 м, расстояние от боковой стены до крайнего ряда светильников – 1 м, расстояние от стены с окнами до ближайшего ряда светильников – 1,5 м. Ряд светильников около стены с окнами обозначим как «Ряд А», средний ряд – «Ряд Б», дальний от окна – «Ряд В». График работы в помещении: с 8:00 до 18:00. План расположения светильников представлен на рис. 1. Цифрами 1..6 показаны расчетные точки для определения освещенности.

В ряде работ [6, 7] разработаны подходы, использующие уточненные модели «среднего» неба. Используется допущение о плавном переходе между равномерным и облачным небом. При этом в качестве критерия наличия облачности предлагается использование данных о наблюдении соотношения диффузионной и прямой солнеч-

ной радиации [8], либо оценки облачности на рассматриваемой территории [1]. Предложенная в [2, 6] модель «среднего» неба может быть уточнена для регионов с установившимся снежным покровом.

Для учёта наличия установившегося снежного покрова используем следующее выражение:

$$g' = (1-t_{\text{УСП}}) g_{\text{без УСП}} + t_{\text{УСП}} g_{\text{УСП}} \quad (1)$$

где $g_{\text{без УСП}}$ – соотношение яркости небосвода в период без установившегося снежного покрова; $g_{\text{УСП}}$ – соотношение яркости небосвода в период установившегося снежного покрова; $t_{\text{УСП}}$ – отношение средней продолжительности периода с установившимся снежным покровом и периода без установившегося снежного покрова за год либо другой период работы системы освещения в рассматриваемом помещении.

С учетом стандартных распределений яркости по пасмурному небу (закон Муна и Спенсер) и ясному небу (распределение яркости по закону Киттлера), с учётом (1) получаем следующее выражение для определения соотношений яркости небосвода:

$$g' = (1-t_{\text{УСП}}) \left(\frac{(1-Nh_{\text{без УСП}})(1-e^{-0,32\sec Z})(b+ce^{-3\gamma}+\text{dcos}^2\gamma)}{0,274(b+ce^{-3Z_0}+\text{dcos}^2Z_0)} + \frac{Nh_{\text{без УСП}}(1+2\sin\alpha)}{3} \right) + t_{\text{УСП}} \left(\frac{(1-Nh_{\text{УСП}})(1-e^{-0,32\sec Z})(b+ce^{-3\gamma}+\text{dcos}^2\gamma)}{0,274(b+ce^{-3Z_0}+\text{dcos}^2Z_0)} + \frac{Nh_{\text{УСП}}(3+2\sin\alpha)}{5} \right) \quad (2)$$

где $Nh_{\text{без УСП}}$ – средняя облачность в период без установившегося снежного покрова; $Nh_{\text{УСП}}$ – средняя облачность в период с установившимся снежным покровом.

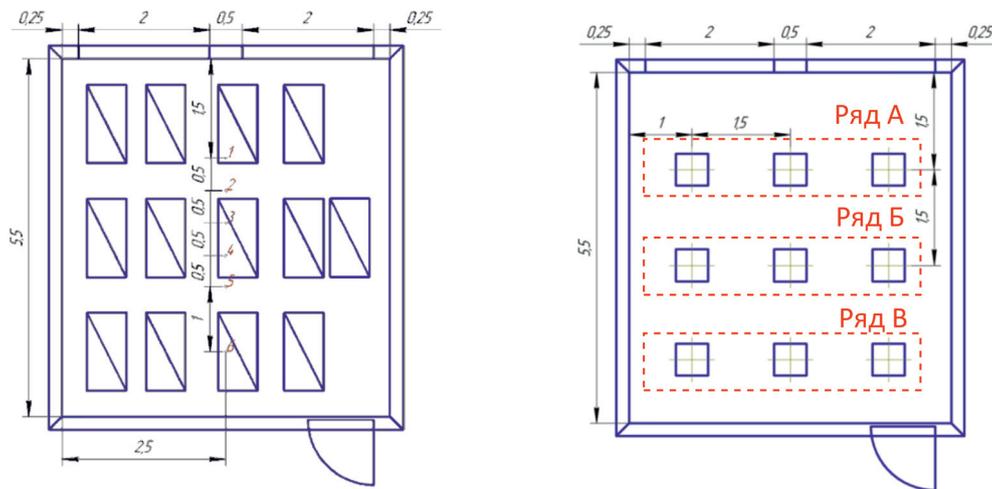


Рис. 1. План типовой учебной аудитории (слева). План расположения светильников в типовой учебной аудитории (справа)

$$Z_o = \frac{\pi}{2} - h_o, \quad Z = \frac{\pi}{2} - h,$$

h_o – угловая высота солнцестояния, рад; α – угловая высота центра рассматриваемого участка, рад; γ – угловое расстояние между солнцем и рассматриваемым элементом на полусфере, рад, определяемое из следующего выражения [8]:

$$\gamma = \arccos(\sin h_o \cdot \sin \alpha + \cos h_o \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma'),$$

γ' – горизонтальная проекция угла γ , рад; b , c и d – эмпирические параметры, определяющие форму индикатрисы рассеяния и зависящие от прозрачности атмосферы p . В случае г. Перми: $p = 0,6$, при этом $b = 0,856$; $c = 16$; $d = 0,3$.

Полученное расчетное выражение довольно сложно для выполнения практических расчетов и требует разработки специализированного программного обеспечения, в связи с чем предлагается использовать данные СП 23-102-2003 (наружная горизонтальная освещенность) для оценки ресурсов естественной освещенности при пасмурном и ясном небе. Данные по освещенности поверхности для 58 с.ш. (г. Пермь), полученные путем интерполяции табличных значений,

представлены в табл. 1, 2 (прямой солнечный свет для ясного неба не учитывался).

Так как при оценке ресурсов естественной освещенности необходимо учитывать переход от ясного неба к пасмурному, используем подход, предложенный в работе [2], в котором средняя прозрачность атмосферы принимается, как средний балл облачности рассматриваемой территории в относительных единицах от 0 до 1, соответственно при 0 и 100% облачности.

Средний балл облачности для города Перми в рассматриваемые временные интервалы и фазовая функция перехода от ясного неба к пасмурному, соответствующая нормальному распределению предлагаемому в [6], представлены в табл. 3 с учётом временных интервалов.

Таким образом, на протяжении рассматриваемого периода освещенность горизонтальной поверхности от модели «среднего» неба может быть определена как [6]:

$$E_{cp} = \xi \cdot E_{я} + (1 - \xi) \cdot E_{п}. \quad (3)$$

Сводные данные результатов расчетов выражения (3) с учётом временных интервалов представлены в табл. 4.

Таблица 1

Данные по горизонтальной освещенности при сплошной облачности

Географическая широта, град. с. ш.	Месяц	Освещенность горизонтальной поверхности $E_{п}^{\circ}$ при сплошной облачности, кЛк															
		Время суток, ч															
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
58	III	–	2,21	4,70	6,41	7,85	9,11	9,31	9,25	8,26	6,41	4,84	2,79	0,56	–	–	
	VI	5,94	8,41	10,85	12,73	14,77	16,11	16,55	16,11	14,76	12,73	10,70	8,50	5,94	3,80	1,75	
	IX	0,80	3,20	5,20	6,58	8,76	10,11	10,20	9,76	8,62	6,94	4,84	2,56	0,15	–	–	
	XII	–	–	–	0,70	1,55	2,11	2,70	2,11	1,55	0,56	–	–	–	–	–	

Таблица 2

Данные по горизонтальной освещенности при ясном небе

Географическая широта, град. с. ш.	Месяц	Освещенность горизонтальной поверхности $E_{я}$ при ясном небе, кЛк															
		Время суток, ч															
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
58	III	–	–	2,70	6,34	9,35	11,32	12,90	13,58	13,58	12,18	10,21	7,45	4,05	–	–	
	VI	4,98	7,97	11,58	14,59	16,54	17,88	18,70	18,97	18,64	18,03	16,54	14,59	11,70	7,69	4,86	1,10
	IX	–	1,40	4,54	7,51	10,38	12,60	13,97	14,30	13,83	12,32	10,10	6,94	3,83	0,42	–	–
	XII	–	–	–	–	1,41	2,81	3,87	4,75	3,87	2,81	–	–	–	–	–	–

Таблица 3

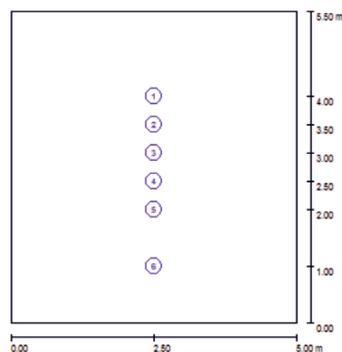
Результаты анализа облачности г. Пермь

Месяцы	Средний балл облачности, %	Облачность K_o , о.т.е.	Фазовая функция перехода от ясного неба к пасмурному, ξ
II, III, VI	77	0,77	0,13
V, VI	56	0,56	0,41
IX, X	85	0,85	0,05
XI, XII, I	90	0,9	0,02

Таблица 4

Горизонтальная освещенности за период с учётом принятой модели «среднего» неба

Географическая широта, град. с. ш.	Месяц	Освещенность горизонтальной поверхности E_{cp} под средним небом, клк															
		Время суток, ч															
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
58	II, III, VI	–	–	2,27	4,91	6,79	8,30	9,60	9,87	9,81	8,77	6,90	5,18	2,95	0,49	–	–
	V, VI	2,04	6,77	9,71	12,38	14,29	16,05	17,17	17,54	17,15	16,10	14,29	12,29	9,81	6,66	4,23	1,48
	IX, X	–	0,83	3,27	5,32	6,77	8,95	10,30	10,41	9,96	8,81	7,10	4,95	2,62	0,16	–	–
	XI, XII, I	–	–	–	–	0,71	1,58	2,15	2,74	2,15	1,58	0,55	–	–	–	–	–



Масштаб 1 : 63

Список расчетных точек

№	Обозначение	Тип	Позиция [м]			Вращение [°]			Значение [лк]
			X	Y	Z	X	Y	Z	
1	Горизонтальная расчетная точка 1	по горизонтали, Ровный	2.500	4.000	0.800	0.0	0.0	0.0	1070
2	Горизонтальная расчетная точка 2	по горизонтали, Ровный	2.500	3.500	0.800	0.0	0.0	0.0	769
3	Горизонтальная расчетная точка 3	по горизонтали, Ровный	2.500	3.000	0.800	0.0	0.0	0.0	574
4	Горизонтальная расчетная точка 4	по горизонтали, Ровный	2.500	2.500	0.800	0.0	0.0	0.0	442
5	Горизонтальная расчетная точка 5	по горизонтали, Ровный	2.500	2.000	0.800	0.0	0.0	0.0	380
6	Горизонтальная расчетная точка 6	по горизонтали, Ровный	2.500	1.000	0.800	0.0	0.0	0.0	288

Рис. 2. Расчет сцены освещения помещения, естественное освещение

Учитывая, что степень влияния естественного света на освещенность внутри зависит от величины коэффициентов естественной освещенности (КЕО), их определение проводилось в пакете *DiaLux*. Дата и время при расчете выбраны таким образом, чтобы наружная горизонтальная освещенность при сплошной облачности составляла 10 клк, учитывая метод Данилюка. Таким образом, в качестве расчетного времени выбрано 12.03.2015 13:30. Результаты расчета освещенности от естественного света представлены на рис. 2.

При использовании автоматизированной системы управления освещенностью возможно поддержание необходимого уровня освещенности на рабочих поверхностях за счет датчиков освещенности. Экономия в Лк, % и кВт в средней зоне помещения и в зоне вдоль стены с окнами необходимо определять с учетом влияния

светильников соседних зон. Функциональные возможности пакета *DiaLux* позволяют выполнять снижение яркости групп светильников. Изменяя яркость светильников ряда «А» и «Б» добиваемся освещенности на рабочих местах больше требуемой (рис. 1).

В результате выполненных расчетов КЕО для светильников ряда А и Б составил соответственно 7,68 и 3,6%.

Величина естественной освещенности в ряде «В» незначительная (рис. 2), принимаем, что светильники ряда светят на 100% (не регулируются), т.е. $E_B = 400$ люкс, тогда для расчетных точек под рядом «Б»

$$E_B = E_{ест} + E'_B, \tag{4}$$

где E_B – освещенность в ряде «Б», $E_{ест}$ – естественная освещенность ряда «Б», E'_B – освещенность от светильников ряда «В» в рассматриваемой точке.

Таблица 5

Результаты расчета экономии электрической энергии

Месяц	Ряд	Освещенность, создаваемая естественным светом, Лк															
		Время суток, ч															
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
II, III, VI	А	–	–	175	377	522	638	737	758	754	674	530	398	227	37	–	–
V, VI		157	520	746	951	1098	1232	1319	1347	1317	1237	1098	944	754	511	325	114
IX, X		–	64	251	408	520	688	791	799	765	676	545	380	201	13	–	–
XI, XII, I		–	–	–	–	55	121	165	211	165	121	42	–	–	–	–	–
II, III, VI	Б	–	–	82	177	245	299	346	355	353	316	249	186	106	18	–	–
V, VI		74	244	350	446	515	578	618	632	617	580	515	443	353	240	152	53
IX, X		–	30	118	191	244	322	371	375	359	317	256	178	94	6	–	–
XI, XII, I		–	–	–	–	26	57	77	99	77	57	20	–	–	–	–	–
		Освещенность, создаваемая естественным светом и источниками света ряда «Б», Лк															
II, III, VI	А	–	–	226	428	573	689	788	809	805	725	581	449	278	88	–	–
V, VI		208	571	797	1002	1149	1283	1370	1398	1368	1288	1149	995	805	562	376	165
IX, X		–	115	302	459	571	739	842	850	816	727	596	431	252	64	–	–
XI, XII, I		–	–	–	–	106	172	216	262	216	172	93	–	–	–	–	–
II, III, VI	Б	–	–	242	337	405	459	506	515	513	476	409	346	266	178	–	–
V, VI		234	404	510	606	675	738	778	792	777	740	675	603	513	400	312	213
IX, X		–	190	278	351	404	482	531	535	519	477	416	338	254	166	–	–
XI, XII, I		–	–	–	–	186	217	237	259	237	217	180	–	–	–	–	–

Таблица 6

Потенциал экономии электрической энергии

Месяц	Ряд	Экономия электрической энергии, %															
		Время суток, ч															
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
II, III, VI	А	–	–	57	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	22	–	–
V, VI		52	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94	41	
IX, X		–	29	76	100	100	100	100	100	100	100	100	100	63	16	–	–
XI, XII, I		–	–	–	–	27	43	54	66	54	43	23	–	–	–	–	–
II, III, VI	Б	–	–	61	84	100	100	100	100	100	100	100	87	67	45	–	–
V, VI		59	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	78	53
IX, X		–	48	70	88	100	100	100	100	100	100	100	85	64	42	–	–
XI, XII, I		–	–	–	–	47	54	59	65	59	54	45	–	–	–	–	–

Аналогично для ряда «А» дополнительно с учетом влияния светильников ряда «Б»:

$$E_A = E_{\text{ест}} + E'_B + E'_B \quad (5)$$

Учитывая, что световой поток пропорционален величине потребляемой мощности, величину экономии электрической энергии, например для зоны «Б», определим как

$$\mathcal{E}_{B\%} = \frac{E_B}{E_{\text{норм}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

$E_{\text{норм}}$ – нормируемая освещенность (400 лк для рассматриваемого помещения). Результат 100% или более – светильники отключены, не используются.

Результаты расчетов выражений (4–6) по исследуемым периодам представлены в табл. 5, 6.

Анализ табл. 6 показывает, что при принятых условиях использование системы естественного освещения рассматриваемого помещения в период с 8:00 до 18:00 покрывает значительный интервал времени, а применение диммирования представляется целесообразным только в ноябре, декабре и январе, в прочие периоды достаточно использования дискретного принципа управления.

На оценку реального эффекта экономии электрической энергии от регулирования источников искусственного света в зависимости от естественной освещенности влияют следующие факторы:

1. Точность настройки и чувствительность датчиков освещенности, используемых для системы управления освещенно-

стью, зависимостью показаний, принципов обработки сигналов с датчиков.

2. Сложность учета ресурсов неравнояркого неба и необходимость использования светозащитных устройств.

3. Необходимость учета ориентации окон рассматриваемого помещения по сторонам света и затенения от зданий.

4. Влияние снежного покрова, загрязнения окон и светильников.

Экономический эффект, полученный с учётом указанных факторов, может быть значительным. Определенного снижения капитальных затрат на внедрение подобных систем возможно добиться при использовании алгоритмов управления источниками искусственного света по точной модели помещения с измерением только наружной освещенности и оптимальном выборе принципов управления группами светильников. Учитывая сложность этих расчётов требуется проработка подходов к определению эффектов и разработка специализированного программного обеспечения.

Список литературы

1. Егорченков В.А. Определение яркости земной поверхности при расчете естественного освещения зданий // Светотехника. – 2008. – № 3. – С. 56–57.
2. Егорченков В.А. Оценка естественного освещения зданий в условиях полужасного небосвода и биоритмы человека // Український світотехнічний журнал «Світло люкс». – К.: 2011. – № 4. – С. 49–53.
3. Кориковский А.П., Курапов Ю.В. Снижение расхода электроэнергии при использовании автоматического регулирования в осветительных установках // Науч. тр. НИИСФ. Исследования по вопросам экономии энергии при строительстве и эксплуатации зданий. – М., 1982. – С. 81–84.
4. Семенихин Н.И. Энергоэкономичность автоматического управления освещением учебных зданий. // Светотехника. – 1987. – № 2. – С. 23–25.
5. Соловьёв А.К. Автоматическое регулирование дополнительного искусственного освещения и его эффективность // Светотехника. – 1999. – № 3. – С. 2–4.
6. Соловьёв А.К. Обоснование модели «Среднестатистического небосвода» и её использование в расчётах естественного освещения // ACADEMIA. Архитектура и строительство. Журнал Российской Академии архитектуры и строительных наук. – 2010. – № 3.

7. Соловьёв А.К. Учёт распределения яркости безоблачного неба в расчётах естественного освещения зданий. // ACADEMIA. Архитектура и строительство. Журнал Российской Академии архитектуры и строительных наук. – 2010. – № 3. – С. 462–471.

8. Gillete G.Pe., Treado S. The issue of sky conditions // Lighting Design and Application. – March, 1985. – P. 22–27.

References

1. Egorchenkov V.A. Opredelenie jarkosti zemnoj poverhnosti pri raschete estestvennogo osveshhenija zdaniy // Svetotehnika. 2008. no. 3. pp. 56–57.
2. Egorchenkov V.A. Ocenka estestvennogo osveshhenija zdaniy v uslovijah polujasnogo nebosvoda i bioritmy cheloveka // Ukraïns'kij svitotekhnichnij zhurnal «Svitlo ljuks». K.: 2011. no. 4. pp. 49–53.
3. Korikovskij A.P., Kurapov Ju.V. Snizhenie rashoda jelektrojenergii pri ispolzovanii avtomaticheskogo regulirovanija v osvetitelnyh ustanovkah // Nauch.tr. NIISF. Issledovanija po voprosam jekonomii jenergii pri stroitelstve i jekspluatácii zdaniy. M., 1982. pp. 81–84.
4. Semehin H.I. Jenergojekonomichnost avtomaticheskogo upravlenija osvshheniem uchebnyh zdaniy. // Svetotehnika. 1987. no. 2. pp. 23–25.
5. Solovjov A.K. Avtomaticheskoe regulirovanie dopolnitelnogo iskusstvennogo osvshhenija i ego jeffektivnost // Svetotehnika. 1999. no. 3. pp. 2–4.
6. Solovjov A.K. Obosnovanie modeli «Srednestatisticheskogo nebosvoda» i ejo ispolzovanie v raschjotah estestvennogo osvshhenija // ACADEMIA. Arhitektura i stroitelstvo. Zhurnal Rossijskoj Akademii arhitektury i stroitelnyh nauk. 2010. № 3.
7. Solovjov A.K. Uchjot raspredelenija jarkosti bezoblachnogo neba v raschjotah estestvennogo osvshhenija zdaniy. // ACADEMIA. Arhitektura i stroitelstvo. Zhurnal Rossijskoj Akademii arhitektury i stroitelnyh nauk. 2010. no. 3. pp. 462–471.
8. Gillete G.Pe., Treado S. The issue of sky conditions // Lighting Design and Application. March, 1985. pp. 22–27.

Рецензенты:

Бочкарев С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Казанцев В.П., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.