

Оптимизация солнцезащитных устройств и повышение энергоэффективности искусственного освещения учебного здания*

Г. БАЙРАМ, Т. КАЗАНАСМАЗ

Измирский технический институт, Измир, Турция

Email: gozebayram@gmail.com, tugcekanasmaz@iyte.edu.tr

Аннотация

Высокий уровень естественного освещения имеет решающее значение для повышения успеваемости и производительности труда студентов и преподавателей, находящихся в учебных зданиях, которые используются, главным образом, в дневное время. Новые проектные решения способны обеспечить оптимальные условия освещения и минимизировать потребление электроэнергии, и задачами данного исследования были проведение оценок и разработка проекта энергоэффективного освещения учебного здания. Целью работы был выбор оптимального солнцезащитного устройства, имеющего требуемые углы наклона пластин, и коэффициента пропускания остекления, а также типов и расположения светильников. При помощи программы «*DIALux*» различные комбинации этих входных параметров были рассмотрены применительно к аудиториям, офисам и лабораториям, которые отличаются друг от друга своими ориентацией, размерами, характеристиками окон и конструкцией фасадов. Были охвачены все важные дни года (дни зимнего и летнего солнцестояния и весеннего и осеннего равноденствия). Подобный обобщённый подход будет полезен при проектировании освещения и модернизации зданий.

Ключевые слова: модернизация, солнцезащитное устройство, энергия, естественное освещение, искусственное освещение, моделирование.

1. Введение

Окружающая среда оказывает существенное влияние на успеваемость и внимательность студентов, находящихся в учебных зданиях, которые

используются, в основном, в дневное время [1, 2]. Главная задача состоит в том, чтобы эффективно использовать естественное освещение, исключая при этом зрительно некомфортные условия (например, блёскость из-за избыточной освещённости) и реализуя энергоэффективные варианты освещения. Особое внимание следует уделять проектированию освещения и его последующей модернизации.

Хотя энергоэффективные светильники и источники света обычно выбирают и размещают должным образом, неправильно спроектированные учебные здания, не удовлетворяющие требованиям к уровням и равномерности освещённости, допускают нерациональное использование искусственного освещения. Согласно нормативным документам, в аудиториях и офисах горизонтальная освещённость на рабочей поверхности должны быть в пределах от 300 до 500 лк. Более высокие, от 500 до 750 лк, освещённости должны обеспечиваться в лабораториях [3]. Согласно *DIN5034*, равномерность освещённости должна превышать 0,67 [4]. В качестве примера неправильного проектирования можно привести неконтролируемое попадание через остекление фасада, не имеющего никаких устройств солнцезащиты, прямого солнечного света, бороться с которым можно только при помощи штор, полностью блокирующих попадание дневного света внутрь помещения. С другой стороны, избыточное количество дневного света внутри помещения и его неравномерное распределение приводят к возникновению блёскости. В этих случаях солнцезащитные устройства обеспечивают возможность управления солнечным светом для регулирования уровня освещённости.

Влияние солнцезащитных устройств и ориентации зданий на эф-

фективность естественного и энергоэффективность искусственного освещения исследовалось в целом ряде работ [5, 6]. В одном исследовании проведён анализ влияния остекления фасадов на оценку пользователями зрительного комфорта и были высказаны рекомендации в части независимого управления естественным освещением с целью уменьшения энергопотребления в офисном здании [7]. В другом исследовании рассмотрены несколько вариантов модернизации освещения холла в университетском городке. В нём для каждого из вариантов были проведены расчёты энергопотребления при использовании СД и нескольких типов люминесцентных ламп (ЛЛ) [8]. В ещё одном исследовании предложен упрощённый метод прогнозирования экономии энергии, расходуемой на искусственное освещение, при разных вариантах естественного освещения [9], тогда как другие исследования были посвящены влиянию внешних солнцезащитных устройств на проникновение дневного света и его эффективность [10].

Целью данного исследования была модернизация освещения учебного здания посредством выбора типа солнцезащитного устройства и углов наклона его пластин, которые были бы оптимальны для ориентированных по-разному помещений. Ещё одной задачей было выявление энергоэффективных типов и расположений светильников, обеспечивающих как требуемые равномерность освещённости и уровень освещённости в глубине помещений, так и минимальное энергопотребление. Так что в этой работе естественное и искусственное освещение рассматриваются совокупно. Влияние (характеристик углов наклона пластин и типов солнцезащитных устройств, коэффициентов пропускания остекления, а также типов ламп и типов и местоположения светильников) определяли и сравнивали применительно к различным вариантам освещения учебного здания.

2. Методика

2.1. Описание помещений и измерений

Было рассмотрено учебное здание Измирского технического института (38° северной широты, 26° восточной

* Перевод с англ. Е.И. Розовского

Геометрические характеристики выбранных помещений

		Помещение А	Помещение В	Помещение С	Помещение D	Помещение E	Помещение F
Ориентация		Юго-восток	Юго-запад	Северо-запад	Северо-восток	Юго-запад	Юго-восток
Описание	Тип	Аудитория	Аудитория	Офис	Лаборатория	Офис	Лекционный зал
	Кол-во рядов светильников/Общее кол-во светильников	3/9	3/9	6/18	3/30–3/24	3/3	4/24
	Ширина, м	6,40	6,40	6,50	22,90	3,10	13,00
	Глубина, м	9,80	9,80	12,40	12,10	6,60	9,85
	Высота, м	3,60	3,60	3,30	3,30	2,60	3,40
	Площадь пола, м ²	61,13	62,83	80,36	268,82	19,70	128,19
Окна	Ширина, м	2,90	2,90	2,90	2,90	0,95	0,95 и 1,40
	Высота, м	2,55	2,55	1,80	1,80	2,50	2,35
	Высота от уровня пола, м	1,05	1,05	1,05	1,05	0,10	1,05
	Полная площадь остекления, м ²	14,80	14,80	10,44	36,54	4,75	18,92
	Отношение площади окон к площади стены, %	63	63	49	48	59	43

долготы). Для моделирования в программе «DIALux» [11] были выбраны шесть помещений этого здания. Их физические и геометрические характеристики, местоположение и технические характеристики системы искусственного освещения были взяты из архитектурных чертежей, схем электрического освещения и результатов наблюдений (табл. 1, рис. 1).

Измерения горизонтальной освещённости, создаваемой естественным освещением на рабочей поверхности, производились 4 декабря в 14:30 при помощи цифрового люксметра с приёмной головкой с кремниевым фотодиодом. Диапазон измерений этого прибора – 0,01–299900 лк. Небо было частично облачным. Оптические характеристики остекления и материалов поверхностей были измерены и рассчитаны при помощи люксметра и яркомера по методике, описанной ранее [12]. Коэффициенты отражения стен, пола и потолка были равны, соответственно, 68, 25 и 87%. Измеренный коэффициент пропускания остекления оказался равным 36%. Измеренные значения были введены в программу «DIALux» до рассмотрения разных вариантов освещения, для



Рис. 1. Вид на окна помещения В изнутри (а) и снаружи (б)

обеспечения соответствия реальным условиям.

2.2. Альтернативные варианты освещения, рассмотренные при помощи программы «DIALux»

«DIALux» проводит расчёты освещённости, создаваемой в дневное время, учитывая при этом естественное освещение, наружные препятствия, искусственное освещение и его энергопотребление [11]. Моделирование осуществлялось применительно к разным солнцезащитным устройствам, светильникам и остеклениям рассматриваемых помещений. Были предложены альтернативные варианты

модернизации освещения ($S1-S9$), соответствующие разным комбинациям входных параметров. Этими входными параметрами являлись коэффициент пропускания остекления, тип солнцезащитного устройства, угол наклона пластин, тип светильников и их расположение. При моделировании использовались три коэффициента пропускания остекления (GT): высокий – 90% ($GT1$), средний – 70% ($GT2$) и низкий – 50% ($GT3$). При расчётах считалось, что поверхность стены отражает свет лучше, чем в реальности (был принят коэффициент отражения 80%). Базовый вариант ($S0$) был реализован с использованием реальных измеренных значений.

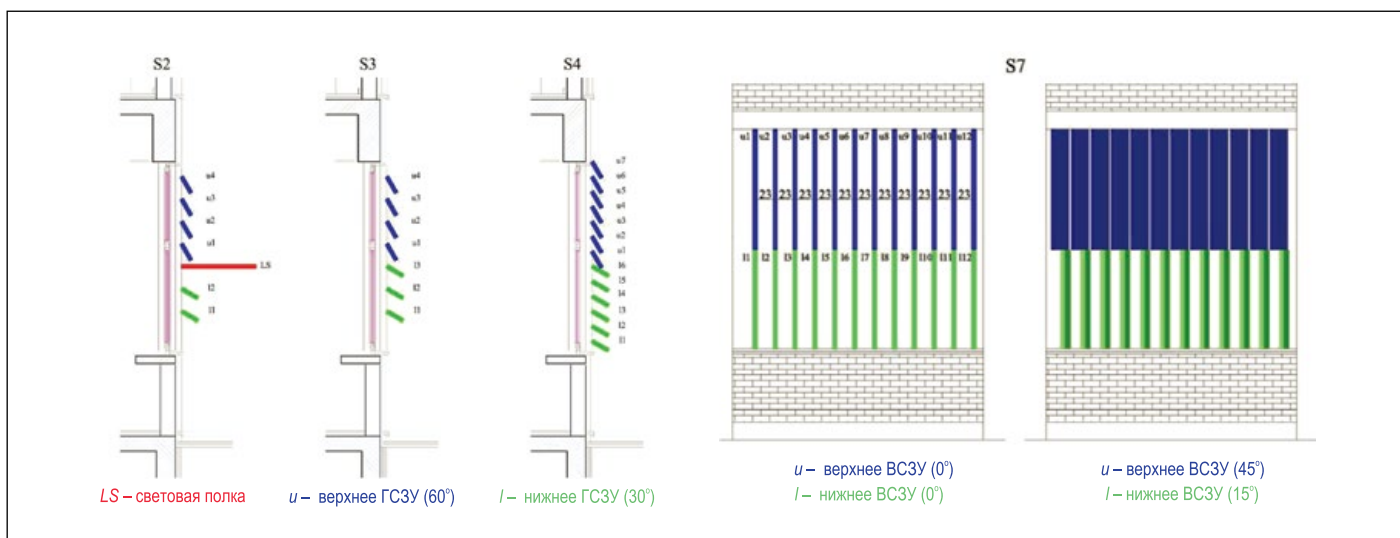


Рис. 2. Примеры солнцезащитных устройств

Солнцезащитное устройство служит для обеспечения равномерности распределения освещённости на горизонтальной рабочей поверхности, препятствуя попаданию в помещение избыточного солнечного света для предотвращения перегрева. Для каждого из окон были предложены три типа солнцезащитных систем (световые полки, горизонтальные солнцезащитные устройства (ГСЗУ) и вертикальные солнцезащитные устройства (ВСЗУ)) с разными углами наклона пластин и разными расстояниями между пластинами (рис. 2). Углы наклона пластин можно было изменять в интервале 0–90° с шагом 15°, где 0° считается закрытым состоянием, а 90° – открытым. Эти углы наклона использовались как применительно к ГСЗУ, так и к ВСЗУ. Ширина пластин считалась равной 25 см. Верхние и нижние пластины двигаются независимо друг от друга. Например, в варианте 3 (S3) рассматривалось ГСЗУ с расстоянием между пластинами 30 см и всеми углами наклона (0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90°).

В реальности в этом здании использовались встроенные светильники с 4 ЛЛ TLD мощностью 18 Вт. Полная мощность такого светильника равна 70 Вт, а его полный световой поток равен 3834 лм. Варианты модернизации предусматривали замену существующих светильников на светильники с СД. Общая мощность создающей аналогичный световой поток (3400 лм) панели с СД была равна 41 Вт. Учитывая важность минимизации плотности расходуемой на освещение энергии [13], для мо-

дернизации были выбраны именно светильники с СД, создающие аналогичный световой поток. Расположение светильников определялось в соответствии с количеством рядов включённых светильников. Например, один из вариантов расположения светильников предусматривал один ряд работающих светильников, расположенный около задней стены, при выключенных остальных светильниках, тогда как в другом варианте количество рядов работающих светильников равнялось двум.

Выходными параметрами являлись освещённость (лк), равномерность освещённости, количественный показатель энергетической эффективности искусственного освещения здания *LENI* (*Lighting Energy Numeric Indicator*) (кВт·ч/(год·м²)) и годовое потребление энергии на освещение (кВт·ч/год). Согласно европейскому стандарту *EN-15193*, в учебных зданиях, освещение которых удовлетворяет основным нормативным требованиям, значения *LENI* должны лежать в диапазоне 27–34,9 кВт·ч/(год·м²) [14].

Так как в лабораториях освещённость должна быть выше, чем в аудиториях (500–750 и 300–500 лк соответственно) [3], то для них значение *LENI* должно составлять 41,8–51,9 кВт·ч/(год·м²) при удовлетворении основных нормативных требований к освещению [14]. Согласно *DIN5034* [4], равномерность освещённости должна превышать 0,67. В целом, на освещение расходуется почти 10–50% от общего количества энергии, потребляемой зданиями, а в офисных

зданиях эта доля составляет 30–40%. Последние исследования, направленные на поиск новых проектных и технических решений в области освещения зданий, ставили целью снижение *LENI* ниже 10 кВт·ч/(год·м²) [13, 15]. Для расчёта энергопотребления зданий в Турции были утверждены «Требования к энергоэффективности зданий» (2008 г.) и «Метод проведения энергетических расчётов», в основу которых был положен европейский стандарт *EN-15193* [14], в котором и был введён параметр *LENI*. Известно, что *LENI* зависит от наличия и характера изменения естественного освещения, а так как в Измире этот характер отличается от европейского, то и рекомендуемые в *EN-15193* значения *LENI* могут не соответствовать реальной ситуации в Измире. Проводя исследования, подобные описанным в данной статье, можно получать полезную информацию для разработки новых стандартов и рекомендаций, важных для реальных турецких климатических условий.

Потребление энергии было рассчитано для трёх трёхчасовых периодов (9:00–12:00, 12:00–15:00 и 15:00–18:00) дней зимнего и летнего солнцестояния и весеннего и осеннего равноденствия. Год был разделён на четыре периода в соответствии с сезонами. Принятое нами допущение состоит в том, что результаты, полученные применительно к одному важному дню, такому как день зимнего солнцестояния, применимы и к остальным дням соответствующего (то есть зимнего) периода. Каждый из сезонов, характеризующихся дня-

ми зимнего и летнего солнцестояния и весеннего и осеннего равноденствия, охватывает 75 рабочих дней. Годовое потребление электроэнергии соответствует 300 дням. Поэтапная последовательность проведения расчётов приведена на рис. 3.

Если говорить подробно, то модернизация состоит из нескольких этапов. Во-первых, при помощи программы «DIALux» были рассчитаны базовые варианты для 21 декабря и 21 июня и для 21 марта и 21 сентября. На втором этапе для одного дня (21 декабря) было проведено моделирование применительно ко всем семи вариантам улучшения естественного освещения и энергоэффективности. Все расчёты проводились применительно к условиям чистого неба. На третьем этапе были выбраны один вариант, предусматривающий использование ГСЗУ, позволившее получить оптимальные значения освещённости и равномерности освещённости, и ещё один вариант, предусматривающий использование ВСЗУ. На четвертом этапе в этих двух оптимальных вариантах используемые в настоящее время светильники с ЛЛ были заменены на светильники с СД. Полученные варианты были обозначены как S8 и S9 соответственно, и применительно к ним были проведены расчёты энергоэффективности и сравнение освещённости и равномерности освещённости. Расчёт годового потребления энергии (формулы (1) – (3)) был упрощён в соответствии с EN-15193. Он учитывает количество работающих светильников и продолжительность их работы в день зимнего солнцестояния применительно к вариантам S8 и S9. Например, один ряд состоит из трёх светильников, которые включают только на 3 ч, а именно, в полдень.

$$\begin{aligned} \text{Суточное потребление} \\ \text{энергии} = (\text{Мощность} \\ \text{светильника}) \times (\text{Количество} \\ \text{работающих светильников}) \times \\ \times (\text{Время работы}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Сезонное потребление энергии} = \\ (\text{Суточное потребление энергии}) \times (75 \text{ дней}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Значение } LENI \text{ для сезона} = \\ (\text{Сезонное потребление энергии}) / \\ (\text{Площадь пола}) \end{aligned} \quad (3)$$

Произведённое выше упрощение расчётов делает их более гибки-

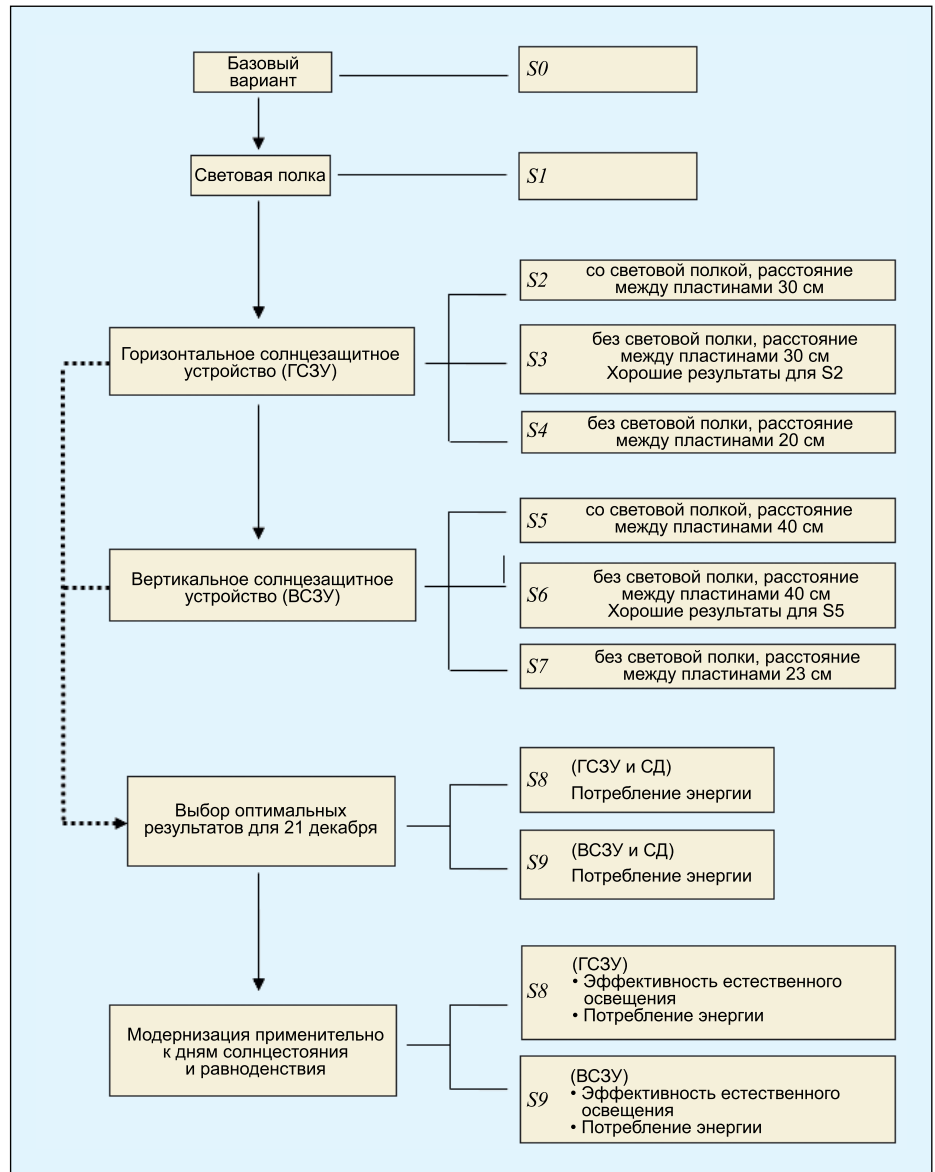


Рис. 3. Последовательность проведения расчётов

ми и позволяет производить быстрые оценки. Суммирование сезонных потреблений энергии позволяет определять годовое потребление энергии.

На пятом этапе для дней весеннего и осеннего равноденствия и летнего солнцестояния было проведено моделирование оптимальных вариантов с ГСЗУ (S8) и с ВСЗУ (S9), в которых использовались не светильники с СД, а светильники с ЛЛ. На шестом этапе были модернизированы варианты, приводящие к неравномерному распределению естественного света, для чего были использованы вертикальные и горизонтальные пластины, имеющие разные углы наклона. И наконец, результаты, полученные применительно к дням солнцестояния и равноденствия, позволили выбрать усовершенствованные вариан-

ты, включающие в себя оптимальные солнцезащитные устройства, углы наклона пластин и расположение и тип осветительных приборов. Расчёты позволили получить значения энергии, потребляемой светильниками с ЛЛ и СД во все сезоны. Приведённые здесь сезонные значения $LENI$ ($sLENI$) необходимы для оценки каждого из вариантов в отдельности с учётом их соответствия сезонным условиям. В рамках описанной методики, выбор оптимальных ГСЗУ и ВСЗУ был основан на условиях, соответствующих дням солнцестояния и равноденствия, и выраженных показателем $LENI$ уровнях энергопотребления. Оптимальное использование ГСЗУ и/или ВСЗУ обеспечивает требуемые условия естественного освещения (освещённость и равномер-

ность освещённости), которые играют решающую роль при определении расположения работающих в дневное время светильников. Полученные результаты позволили определить светильники, которые следует учитывать при расчёте энергопотребления, и, между прочим, при расчёте *LENI*. Последующие этапы позволили определить наименьшее значение энергии, которое можно обеспечить в результате замены светильников с ЛЛ на светильники с СД.

3. Результаты исследования

Полевые измерения проводились для определения реальных характеристик естественного освещения и подтверждения правильности базового варианта посредством сравне-

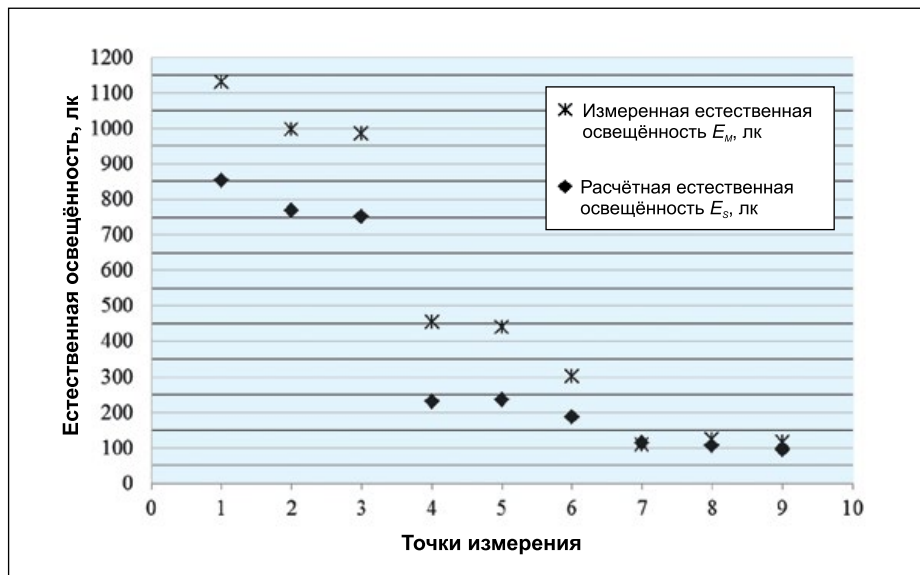


Рис. 4. Сравнение измеренных и расчётных значений естественной освещённости в помещении В

Таблица 2

Результаты, полученные применительно к ГСЗУ, установленному в помещении А, выходящем на юго-восток

СЗУ: Солнцезащитное устройство (длина = 25 см) КС: Компоновка светильников Панель: Длина = 25 см Вертикальная Высота: высота окна		Угол: u – верхнее СЗУ; l – нижнее СЗУ n – Количество рядов светильников (включённых)		Местоположение: верх каждой из сторон окна				
Время	Дни солнцестояния и равноденствия	Угол СЗУ	n	Освещённость, лк			Равномерность освещённости	
				$E_{ср}$	$E_{мин}$	$E_{макс}$	$\frac{U_1}{E_{мин}/E_{ср}}$	$\frac{U_2}{E_{мин}/E_{макс}}$
9:00	21 декабря	$u = 30^\circ$ $l = 75^\circ$	2	487	396	591	0,81	0,67
	21 марта	$u = 60^\circ$ $l = 75^\circ$	2	513	459	605	0,89	0,76
	21 июня	$u = 0^\circ$ $l = 90^\circ$	1	478	300	589	0,63	0,51
	21 сентября	$u = 45^\circ$ $l = 75^\circ$	2	504	442	597	0,88	0,74
12:00	21 декабря	$u = 75^\circ$ $l = 75^\circ$	2	487	394	598	0,81	0,66
	21 марта			446	326	577	0,73	0,57
	21 июня	$u = 75^\circ$ $l = 45^\circ$		547	500	657	0,91	0,76
	21 сентября	$u = 75^\circ$ $l = 75^\circ$		450	338	579	0,75	0,58
15:00	21 декабря	$u = 15^\circ$ $l = 60^\circ$	2	507	439	602	0,87	0,63
	21 марта			566	520	642	0,92	0,81
	21 июня			508	438	612	0,86	0,72
	21 сентября	$u = 45^\circ$ $l = 90^\circ$		488	387	593	0,79	0,65

ния значений освещённости и равномерности освещённости. При оценке солнцезащитных устройств расчётные значения освещённости и равномерности освещённости были выбраны равными 500 лк и 0,6 в соответствии с рекомендациями [12–14]. В помещении В была отмечена неравномерность естественного освещения. Равномерность освещённости была очень низкой (почти 0,1–0,2), а освещённость примерно в половине точек была ниже нормируемой (500 лк). Прилегающий к окну участок был очень ярким по сравнению с отдалённой от окна частью помещения (рис. 4). Так что требовалось предложить солнцезащитное устройство, которое позволило бы обеспечить равномерное распределение естественного освещения.

Для проверки правильности моделирования в программе «DIALux» были использованы методы линейной регрессии. Коэффициент детерминации R^2 и линейное уравнение регрессии были получены при помощи Excel. Значение R^2 оказалось равным 0,97, что говорит о большой точности модели. То есть расчётные значения позволяли прогнозировать реальные значения с вероятностью 97%. Соответственно, результаты моделирования очень хорошо согласуются с результатами измерений. Обычно измеренные значения освещённости были несколько больше расчётных (рис. 4).

Расчёты проводились применительно к 9:00, 12:00, 15:00 и 18:00 дней зимнего и летнего солнцестояния и весеннего и осеннего равноденствия и безоблачному небу. В «DIALux» были реализованы все возможные сочетания углов наклона пластин, остекления и светильников в рамках вариантов, о которых упоминалось выше. Так что для каждого из рассматривавшихся помещений было выполнено почти 250 расчётов. Так как это было сделано для всех шести помещений, то в целом при проведении оценок использовались результаты 1500 расчётов.

Если говорить о результатах, полученных применительно к помещению А, то в нём имела место неравномерность распределения естественной освещённости, обусловленная тем, что 21 декабря в это помещение попадал солнечный свет. Этот день соответствует наихудшему варианту, так

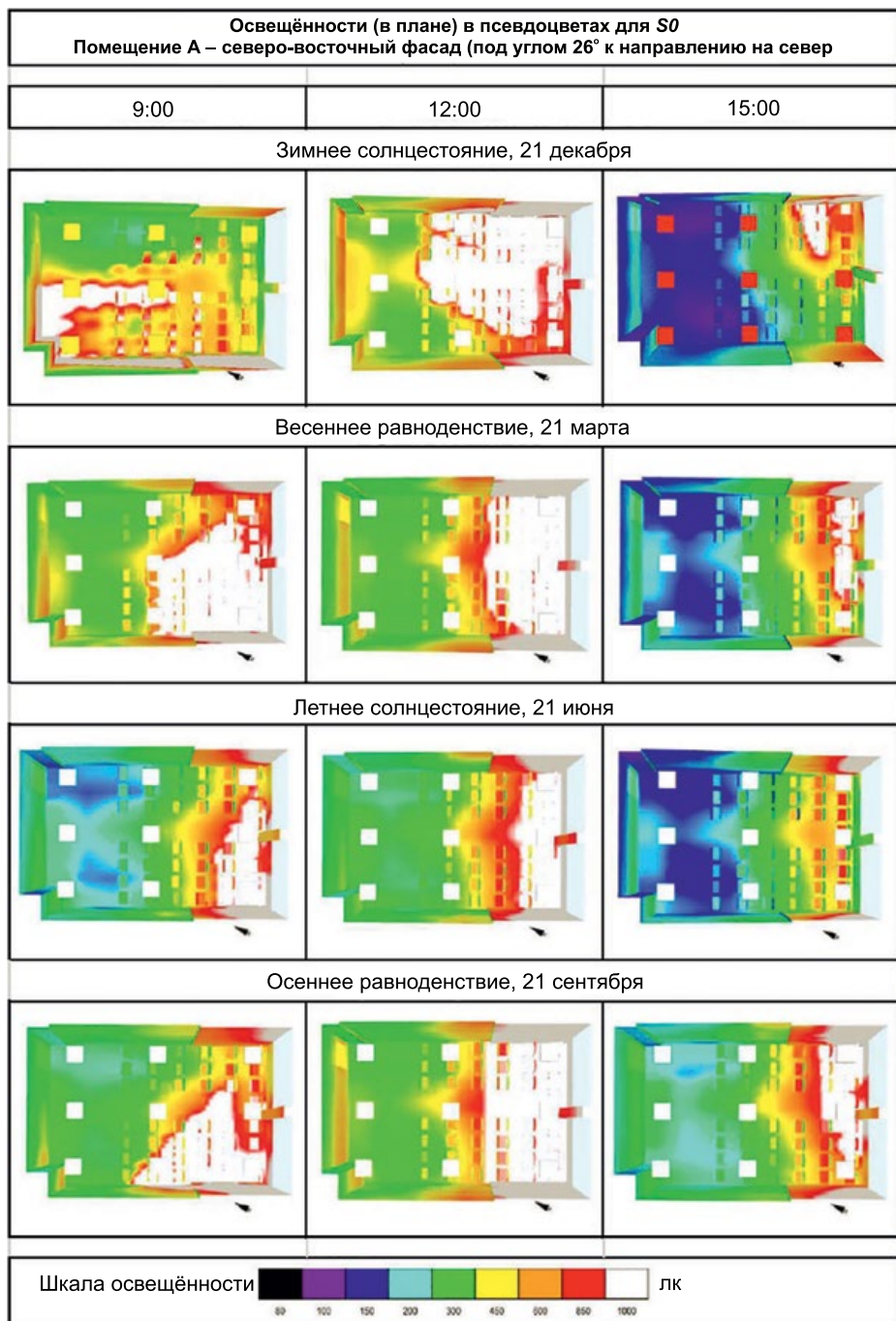


Рис. 5. Распределение естественной освещённости в помещении А для S0

как высота солнца обеспечивает наименьшие углы падения солнечного света. Дальней стены прямой солнечный свет может достигать в утренние часы, а середины помещения – в полдень (рис. 5). Естественная освещённость превышает примерно 1000 лк на протяжении большей части дня. Даже в летний период неприятно яркая область утром и в полдень занимала почти треть общей поверхности пола. В наиболее тёмную часть этого помещения на протяжении всего года попадало очень мало естественного света. В условиях этой аудитории

для защиты от солнечного света нужны были шторы. Однако они приводят к необходимости использования искусственного освещения в дневное время.

Для улучшения этих неблагоприятных условий освещения, в варианте S4 были использованы ГСЗУ, расстояние между пластинами которых было равно 20 см (табл. 2). Они регулировали поступление солнечного и дневного света, а равномерность распределения освещённости лежала при этом в интервале от 0,46 до 0,89. Это обеспечило комфортную и бод-

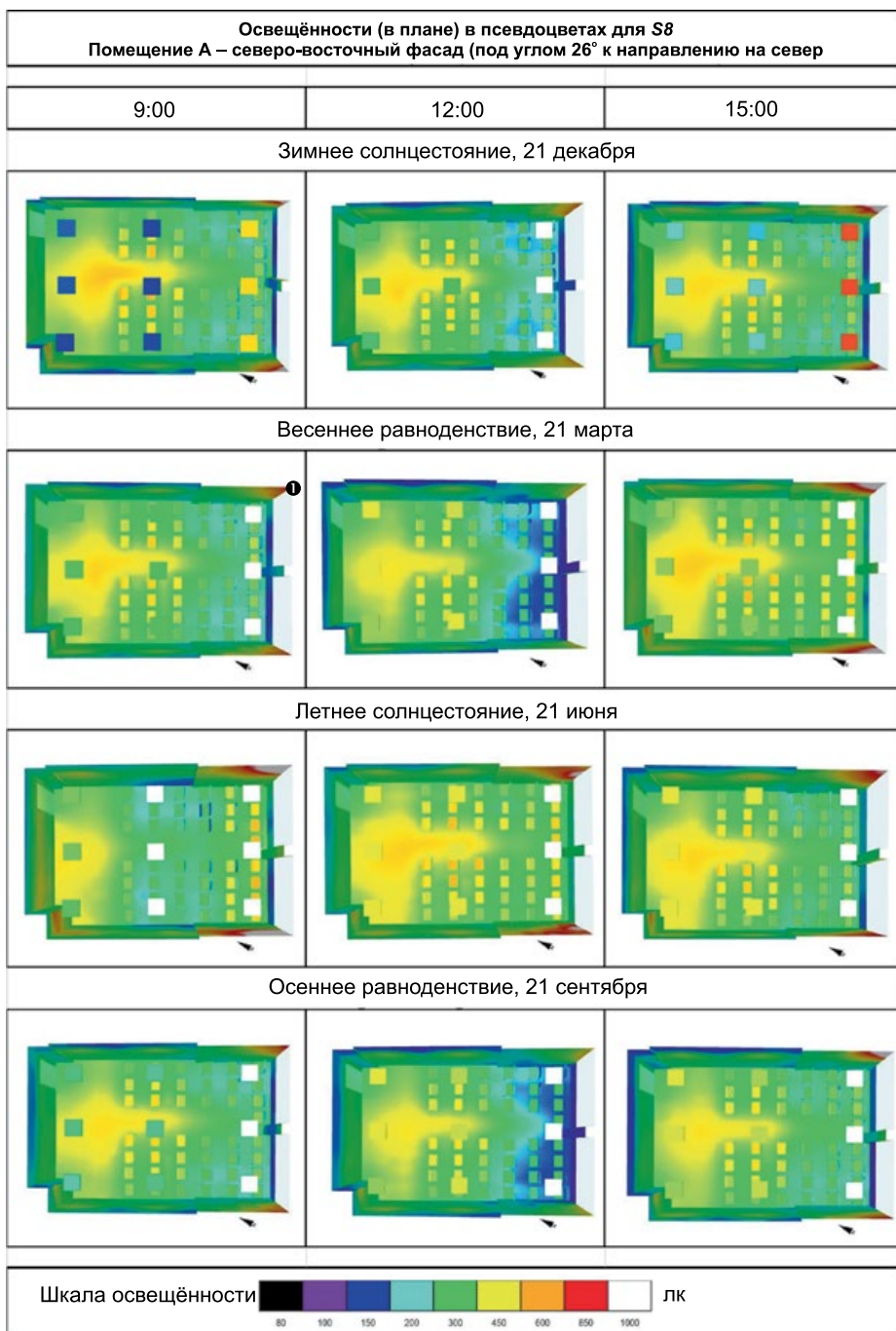


Рис. 6. Представленное в псевдоцветах распределение освещённости (в плане) в помещении А для модернизированного варианта S8

рящую зрительную среду. При всех коэффициентах пропускания остекления (*GT1*, *GT2* и *GT3*) естественная освещённость оставалась в нормируемом диапазоне (300–500 лк). С точки зрения равномерности в случае ГСЗУ наилучшим решением оказалось *S4-GT1*. В этом варианте углы наклона верхних и нижних пластин утром были равны 30 и 75° соответственно. В полдень углы наклона всех пластин равнялись 75°, и были включены два ряда светильников. После полудня углы наклона верхних и ниж-

них пластин равнялись, соответственно, 15 и 60°, и были включены два ряда светильников.

Вариант *S7-GT3* был предложен как самый оптимальный из всех вариантов использования ВСЗУ. В нём углы наклона верхних и нижних пластин утром равнялись 45 и 30° соответственно, и были включены два ряда светильников. В полдень углы наклона верхних и нижних пластин были, соответственно, 45 и 75°, а для поддержания нормированного уровня освещения у задней стены требо-

вался только один ряд светильников. Так как после полудня углы наклона всех пластин солнцезащитной установки были равны 75°, то полученные в результате очень низкие уровни освещённости были увеличены посредством включения всей установки искусственного освещения.

В вариантах *S4-GT1* и *S7-GT3* светильники с ЛЛ были заменены на светильники с СД. Первый из получившихся вариантов мы обозначили как *S8*, а второй – как *S9*. Фотометрические характеристики светильников с СД обеспечили увеличение равномерности. В полдень равномерность возросла с 0,79 (*S4-GT1*) до 0,92 (*S8*) (рис. 6). Утром она увеличилась до 0,82 (*S9*).

На рис. 7 приведены значения *sLENI* для оптимальных вариантов с ГСЗУ и ВСЗУ, которые удовлетворяют всем требованиям к освещённости и равномерности освещённости. Так как и вариант с ГСЗУ, и вариант с ВСЗУ с успехом обеспечивают комфортные условия зрительной работы, то для дальнейшего обсуждения этих вариантов применительно к потребляемой в них энергии следовало определить, какому из решений (ГСЗУ или ВСЗУ) соответствует меньшее значение *sLENI*. Сначала это было сделано применительно ко дню зимнего солнцестояния, а затем, для выяснения того, окажется ли решение, оптимальное для самого неблагоприятного времени года, удачным для других времён года, и для всего года в целом. В результате было получено, что то 21 декабря для помещения В оптимальными оказались варианты *S4-GT3* в случае ГСЗУ и *S7-GT3* в случае ВСЗУ; для помещения С – варианты *S4-GT1* в случае ГСЗУ и *S7-GT2* в случае ВСЗУ; для помещения D – варианты *S4-GT1* в случае ГСЗУ и *S7-GT3* в случае ВСЗУ; для помещения E – варианты *S4-GT3* в случае ГСЗУ и *S7-GT3* в случае ВСЗУ; для помещения F – варианты *S4-GT2* в случае ГСЗУ и *S7-GT3* в случае ВСЗУ. В целом, можно сделать вывод, что *sLENI* зависит от ориентации помещения. С другой стороны, обычная модернизация будет полезна для всех помещений на протяжении всего года. В частности, варианты с ГСЗУ оказались энергоэффективными решениями для юго-восточного и юго-западного фасадов с учётом всех рассматривавшихся в этом ис-

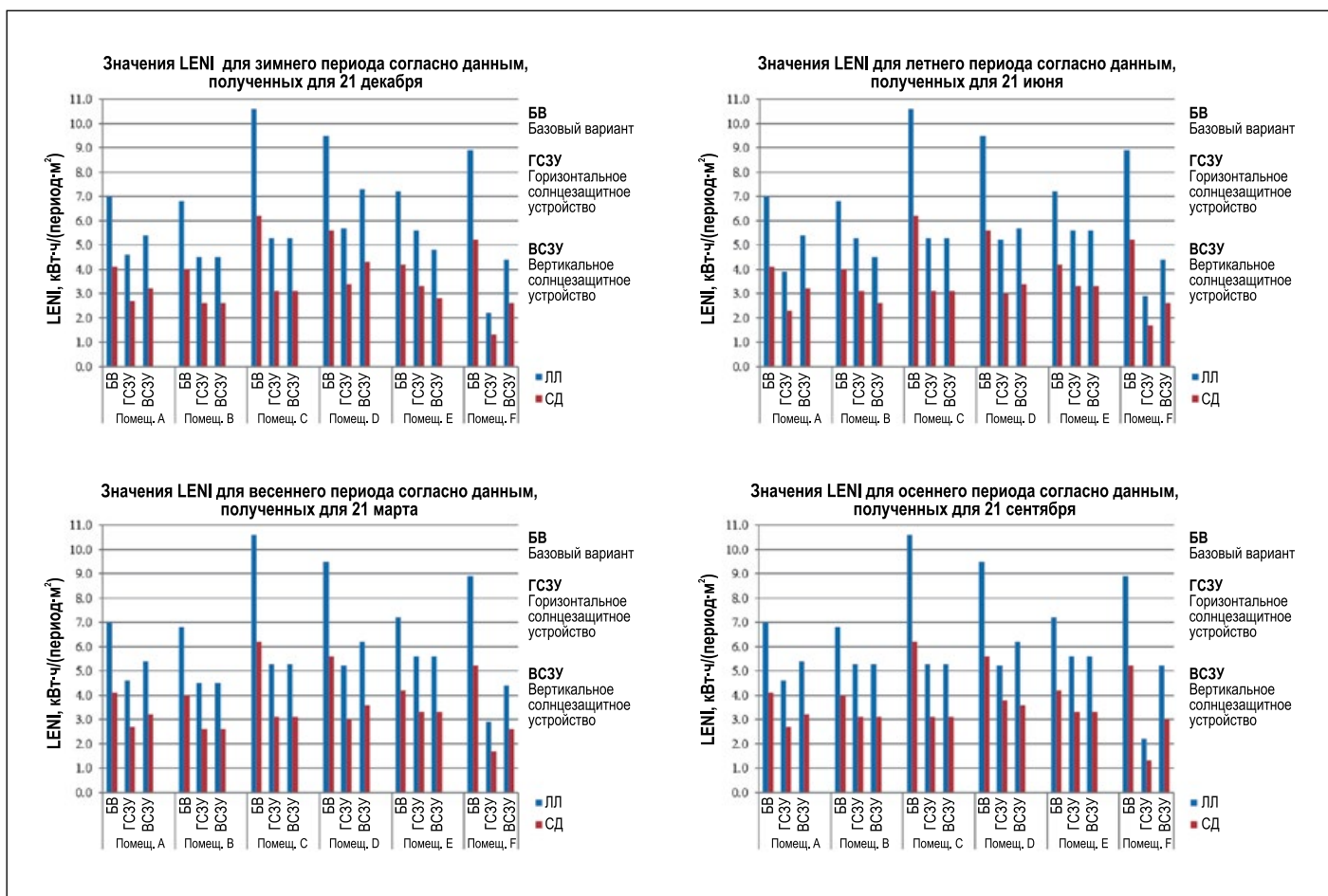


Рис. 7. Значения $sLENI$ для всех рассмотренных помещений в дни солнцестояния и равноденствия

следовании характеристик помещений (глубина, ширина).

4. Обсуждение и выводы

Ниже перечислены причины неудовлетворительности освещения рассматривавшихся помещений:

- Реальная конфигурация фасада никак не связана с его ориентацией и размерами. В то время как на северном фасаде имеются большие нависающие элементы, препятствующие попаданию рассеянного света, на южном фасаде никаких солнцезащитных устройств нет, что приводит к попаданию в помещения чрезмерно большого количества прямого солнечного света.
- Хотя отношение площади окна к площади стены и соответствует нормативным требованиям, помещение имеет слишком большую глубину. Это приводит к дефициту естественного освещения в больших помещениях.
- Тонированное остекление, которое препятствует попаданию солнечного света в помещение (коэффициент пропускания стёкол со-

ставлял почти 36%), препятствует и прохождению через стекло дневного света.

Для исправления вышеперечисленных недостатков, в данном исследовании предложены варианты солнцезащитных устройств и энергоэффективного освещения, в основу которых положены условия освещения в дни солнцестояния и равноденствия.

Освещённости, полученные в случаях оптимальных решений ($S4-GT1$ и $S7-GT3$), 21 декабря лежали в интервале 480–532 лк, и оставались в этом интервале на протяжении всего года, кроме нескольких имевших место в полдень исключений, когда были зарегистрированы более низкие значения освещённости. Причиной этих исключений могла быть высокая степень защиты, обеспечиваемая солнцезащитными устройствами при больших углах наклона пластин. Равномерность освещённости изменялась на протяжении года в пределах от 0,46 до 0,89. Установка светильников с СД привела к увеличению равномерности освещённости (0,63–0,92),

но не к существенному изменению уровня освещённости.

Оценка потребления энергии в рассматриваемые периоды производилась на основе $sLENI$. Использование в освещаемом светильниками с ЛЛ помещении E оказалось 21 декабря более энергоэффективным (4,8 кВт·ч/(период·м²)), чем использование в этом же помещении ГСЗУ (5,5 кВт·ч/(период·м²)). В дни летнего солнцестояния и равноденствия значение $sLENI$ не зависело от того, какое – вертикальное или горизонтальное – солнцезащитное устройство было установлено в помещении (5,5 кВт·ч/(период·м²)). Однако хотя и помещение E , и помещение B выходили на юго-запад (то есть имели одинаковую ориентацию), в случае освещаемого светильниками с ЛЛ помещения B наблюдалась диаметрально противоположная картина. В этом случае 21 июня ВСЗУ оказалось более энергоэффективным, чем ГСЗУ (4,5 и 5,2 кВт·ч/(период·м²) соответственно), тогда как в день зимнего солнцестояния ($sLENI = 4,5$ кВт·ч/(период·м²)) и в дни равноденствия ($sLENI = 4,5$

и 5,2 кВт·ч/(период·м²)) значение $sLENI$ не зависело от типа применяемого солнцезащитного устройства. Причина такого расхождения связана с высотой солнца и глубиной помещения. Зимой, когда солнце стоит низко над горизонтом, для помещений относительно малой глубины энергоэффективным становится использование ВСЗУ. Летом к наименьшему энергопотреблению приводит установка ВСЗУ и в относительно глубоких помещениях. Эти результаты совпадают с литературными данными. Для помещений *A*, *D* и *F*, выходящих на юго-восток и северо-восток, оптимальным решением оставалось использование ГСЗУ.

Лучшим для выходящих на юго-запад помещений *B* и *E* были ВСЗУ. В выходящем на северо-запад помещении *C* можно использовать как ГСЗУ, так и ВСЗУ, причём ни те, ни другие не влияют на потребление энергии в дни солнцестояния и равноденствия. Потребление энергии становится постоянным на протяжении всего года.

Суммы значений $sLENI$, полученных применительно к светильникам с ЛЛ (27–34,9 кВт·ч/(год·м²)), оказались в пределах, допустимых для энергоэффективного освещения [14]. Использувавшиеся в этом исследовании входные параметры соответствовали не всем рекомендациям в части уменьшения потребления электроэнергии при модернизации осветительных установок [15], однако они включали в себя многие другие параметры, связанные с установками искусственного освещения и использованием естественного освещения. В любом случае благодаря переходу на светильники с СД, выбору расположения светильников, изменению коэффициента пропускания остекления и использованию солнцезащитных устройств, потребление электроэнергии сократилось на 56–83%. Дополнительное уменьшение энергопотребления будет достигнуто после установки датчиков и светорегуляторов и при удельном учёте глубины помещения, высоты потолка и площади окон при проектировании осветительной установки.

Оптимальные варианты обеспечивают высокий уровень зрительного комфорта и низкое энергопотребление благодаря использованию больших углов наклона пластин

(60° или 75°). При этом в значительной степени перекрывается вид из окон. Не вызывает сомнения важность обеспечения зрительного комфорта и низкого энергопотребления без ущерба для зрительной связи с внешним миром. Для этого можно уменьшить ширину пластин и изменить их форму.

Угол наклона пластин лучше всего задавать при помощи автоматизированной системы, включающей в себя интеллектуальные датчики, осуществляющие регулирование в соответствии с уровнем естественной освещённости. Возможности воплощения разных вариантов модернизации будут положены в основу дальнейших исследований. Тем не менее, настоящее исследование позволило получить информацию о недостатках существующего базового варианта и об оптимальных решениях, позволяющих обеспечить энергоэффективное освещение. Методика и результаты этого предварительного исследования должны обеспечить базу для проектирования энергоэффективных осветительных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Theodosiou, T.G., Ordoimpozanis, K.T.* Energy, comfort and indoor air quality in nursery and elementary school buildings in the cold climatic zone of Greece// *Energy & Buildings*. – 2008. – Vol. 40. – P. 2207–2214.
2. *Bellia, L., Pedace, A., Barbato, G.* Lighting in educational environments: an example of complete analysis of the effects of daylight and electric light on occupants// *Building & Environment*. – 2013. – Vol. 68. – P. 50–65.
3. Chartered Institution of Building Services Engineers CIBSE. Code for lighting. London: CIBSE; 2002.
4. *Licht UB.* Lighting design, detail practice. Munich: Birkhauser, 2006.
5. *Krüger, E.L., Dorigo, A.L.* Daylighting analysis in a public school in Curitiba, Brazil// *Renewable Energy*. – 2008. – Vol. 33. – P. 1695–1702.
6. *Li, D. H., Tsang, E. K.* An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong// *Building & Environment*. – 2008. – Vol. 43. – P. 1446–1458.
7. *Konis, K.* Evaluating daylight effectiveness and occupant visual comfort in side-lit open plan office buildings in San Francisco, California// *Building & Environment*. – 2013. – Vol. 59. – P. 662–677.
8. *Nayyar, R.A.* Assessing the potential for energy and economic savings from lighting retrofits at Illick Hall. Master's Thesis,

New York, State of University of New York College of Environmental Science and Forestry. 2010.

9. *Krarti, M., Erickson, P.M., Hillman, T.C.* A Simplified method to estimate energy Savings of artificial lighting use from daylighting// *Building & Environment*. – 2005. – Vol. 40. – P. 747–754.

10. *Li, D.H., Cheung, K. L., Wong, S. L., Lam, T.L.* An analysis of energy-efficient light fittings and lighting controls// *Applied Energy*. – 2010. – Vol. 87. – P. 558–567.

11. DIALux version 4.9. User manual. Software standard for calculating lighting layouts, Lüdenscheid; 2011.

12. *Fontoyont, M.* Daylight performance of buildings. New York, USA: Earthscan, 2013.

13. International Energy Agency (IEA). Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings, (Annex45), Aalto University School of Science and Technology, 2010.

14. PrEN15193–1, Energy performance of buildings; Energy requirements for lighting, 2007.

15. *Dubois M.C., Blomsterberg, A.* Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review// *Energy & Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – P. 2572–2582.



Гёзе Байрам (Göze Bayram),

Ph D. (архитектура, 2015 г.). Руководитель архитектурных проектов компании TARKEM, работающей в области социального и экономического

обновления базара Камералты – исторического центра г. Измира. Область научных интересов: энергоэффективность зданий, архитектурное освещение и компьютерное моделирование



Туйче Казанмаз (Tuiçe Kazanmaz),

Ph D. Доцент архитектурного факультета Измирского технического института. Область научных интересов: архитек-

турное освещение, физика зданий и энергоэффективное проектирование