АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

УДК 628.92

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.180-200

Оценка естественного освещения зданий с учетом солнцезащитных конструкций при реальных состояниях облачности

Нгуен Тхи Хань Фыонг, А.К. Соловьев

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Светотехника — комплексная научная область, которая требует обобщения знаний при оценке визуального комфорта, конструктивного, архитектурного решения, а также других областей, включая гуманитарные науки. Глобальные экологические проблемы и движение за устойчивое развитие требуют от архитектурного проектирования достижения максимальной энергоэффективности. Задачи проектирования систем естественного освещения (ЕО) в реальных условиях неба не могут быть решены без рассмотрения проблем инсоляции и солнцезащитных устройств (СЗУ). В российских и зарубежных стандартах давно поставлены вопросы совершенствования методики расчета ЕО с учетом дополнительного света, отраженного от прилегающих поверхностей при ясном и частично облачном небе. Цель исследования — анализ и совершенствование методики расчета систем ЕО с учетом СЗУ в условиях промежуточного неба.

Материалы и методы. Использованы методы поиска и отбора соответствующей литературы в международных реферативных базах, имеющих проработанные инструменты для тематического поиска, а также аналитические методы.

Результаты. Предложена методика расчета системы ЕО с учетом СЗУ в условиях промежуточного неба. Анализ полученных формул подтвердил предлагаемую теорию: под влиянием прямого освещения солнца отражение от прилегающих поверхностей значительно повышает уровень ЕО в помещении.

Выводы. Оценка ЕО в помещении при промежуточном небе должна учитывать отражение прямой солнечной освещенности. Корректирование задачи при пасмурном небе в расчете связано с доступностью базы данных о световом климате. Это позволяет сформулировать критерии динамической оценки ЕО. Сочетание системы искусственного освещения с режимом автоматического управления гарантирует внутреннюю освещенность и экономию энергии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: системы естественного освещения, солнцезащитное устройство, промежуточное небо, отражение естественного освещения, световой климат, коэффициент неравномерной яркости, коэффициент естественного освещения, моделирование естественного освещения, энергосбережение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Нгуен Тхи Хань Фыонг, Соловьев А.К. Оценка естественного освещения зданий с учетом солнцезащитных конструкций при реальных состояниях облачности // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 180–200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.180-200

Assessment of building daylight systems considering sunscreens under real conditions of the sky

Nguyen Thi Khanh Phuong, Aleksey K. Solovyev

*Moscow State University of Civil Engineering (Aleksey Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Lighting engineering is a complex scientific field which requires the generalization of knowledge in visual comfort evaluation, design and architectural solutions as well as in other areas including the humanities. Global ecological problems and the drive for Sustainable Development require achieving maximum energy efficiency from architectural designers. The tasks of designing daylight systems under real sky conditions cannot be solved without considering the problems of insolation and sunscreens. Russian and foreign standards cover long-put questions about the need to improve the daylight calculation method considering additional light reflected from adjacent surfaces under the clear and partially cloudy skies. The objective of the study is analysis and improvement of the daylight system calculation method considering sunscreens under intermediate sky conditions.

Materials and methods. The methods of searching and selecting relevant literature in international abstract databases with well-developed tools for thematic search as well as analytical methods are described.

Results. A method for calculating daylight system considering sunscreens under the intermediate sky conditions is suggested. The analysis of the obtained formulae confirmed the proposed theory: under the influence of direct sunlight, reflection from adjacent surfaces significantly increases the daylight level in a room.

Conclusions. Assessment of daylight in a room under the intermediate sky conditions should take into account a reflection of the direct sunlight. Correcting the problem under conditions of the CIE overcast sky model in the calculation is associated with the availability of a light climate database. This approach makes it possible to formulate the criteria for a dynamic daylight assessment. Combination of an artificial lighting system with an automatic control mode guarantees the requirements of indoor illuminance and energy saving.

KEYWORDS: daylight systems, sunscreens, intermediate sky, daylight reflection, daylight climate, coefficient of uneven brightness, daylight factor, daylight simulation, energy saving

FOR CITATION: *Nguyen Thi Khanh Phuong, Solovyev A.K.* Assessment of building daylight systems considering sunscreens under real conditions of the sky. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(2):180-200. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.180-200 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Ограждающие конструкции со светопроемами играют важную роль в регулировании микроклиматической среды в помещениях. При этом расчеты по требованиям к естественному освещению (ЕО) и по тепловому комфорту должны быть обеспечены в процессе проектирования. Польза ЕО для здоровья, деятельности, визуального комфорта и производительности труда человека доказана во многих исследованиях [1–9]. Совершенствованием методов расчета ЕО в помещении, параметрами распределения яркости неба в расчетах ЕО и их применением в различных световых климатических условиях, а также проблемами светотехнических характеристик солнцезащитных устройств (СЗУ) занимались авторы Н.М. Гусев, Н.В. Оболенский, Н.Н. Киреев, В.В. Воронов, З.А. Скобарева, С.В. Стецкий, В.А. Земцов, Т.А. Глаголева, Л.Т. Белова, А.К. Соловьев, Nguyen Sanh Dan, Nguyen Van Muon, Pham Duc Nguyen, Tran Dinh Bac, R. Hopkinson, P. Neufert, S. Darula, R. Kittler, R. Perez, A. Habil, J. Mardaljevic, P. Tregenza, J.A. Veich, I.V. Lim и др.

По-прежнему методы расчета и оценки ЕО построены на основе расчетов коэффициента естественной освещенности (КЕО), которые характерны только для пасмурного неба (Международная комиссия по освещению — МКО, International Commission on Illumination) при расчетах диффузного освещения. Фактически, это небо не является типичным и затрудняет сравнение результатов расчета с экспериментом. Особенно это заметно в жарком климате и в тропических регионах, где суммарная освещенность значительно варьируется. В тропических или субтропических регионах для расчетов ЕО необходимо учитывать дополнительный отраженный свет от прямого света солнца при промежуточном небе. В современных методиках оценка ЕО также определяется в соответствии с абсолютной освещенностью. Тем не менее, эта оценка ос-

вещенности все еще выявляет много нерешенных проблем. Значение освещенности является мгновенным, поэтому трудно установить связь между оценкой и архитектурным дизайном проемов.

Архитектурные решения фасадов зданий в жарком климате с использованием СЗУ показаны на рис. 1. Широко проводятся исследования зеленой архитектуры, устойчивой архитектуры в жарком климате Азии — в Сингапуре, Малайзии, Таиланде и др. Оценка эффективности СЗУ при повышении теплового и визуального комфорта была изучена авторами S. Mirrahimi, Al-Tamimi, A. Kirimtat, F.H. Abdullah, K.H. Cheong, V. Mettananant и др. [10–15]. В данных работах используется эмпирическое моделирование или симуляция для анализа воздействия излучения тропического неба и потребления энергии. В трудах Y.W. Lim, H. Lee, S.M. Al-Masrani и др. более подробно [16–18] рассматривается влияние отражающей полки на ЕО в помещении при разных ориентациях по условиям промежуточного неба с показателем «уровень естественного освещения» (Daylight Ratio). Экспериментальные результаты показывают, что ЕО в помещении значительно увеличивается под воздействием отражения солнечного света. Однако исследования проводились только на экспериментальных или смоделированных оценках. Полной теории для расчета ЕО при промежуточном небе не разработано.

Оценка ЕО зависит от двух главных факторов: местных климатических характеристик дневного света и архитектурных особенностей системы ЕО. Для жаркого климата с промежуточными типами неба основа расчета ЕО

Основной целью исследования является расчет ЕО в промежуточном небе с использованием СЗУ с решением конкретных задач:

- предложить коэффициент, учитывающий влияние СЗУ на ЕО в помещениях;
- разработать методику расчета ЕО при наличии СЗУ при промежуточном небе.

Рис. 1. Методы повышения энергоэффективности в Малайзии, на Филиппинах, в Сингапуре
Fig. 1. Methods of enhancing energy efficiency in Malaysia, Philippines, Singapore

Рис. 2. Схема расчетов системы ЕО в условиях промежуточного неба

Fig. 2. The calculation scheme for a daylight system under intermediate sky conditions

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Диффузная радиация так же, как и диффузная освещенность, характеризуется свойством стабильности. Поэтому в нормах и стандартах проектирования ЕО используется только диффузная освещенность для оценки ЕО.

Прямая радиация отличается динамическими свойствами. Она быстро изменяется во времени и зависит от ориентации, поэтому при нормировании и проектировании светопроемов мы не рассматриваем прямую солнечную освещенность.

Прямой солнечный свет дает блики и большую тепловую нагрузку в помещении. Наоборот, диффузная освещенность обеспечивает ЕО высокого качества. Блокирование прямой солнечной радиации СЗУ уменьшает диффузную освещенность от неба, но повышает отраженный свет от СЗУ в помещениях.

Проектирование СЗУ зависит от требований инсоляции и солнцезащиты. В исследовании рассматривается влияние СЗУ на уровень ЕО в помещениях при боковом освещении, прямое освещение в помещение не пропускается. Влияние СЗУ на изменение ЕО в помещении характеризуется следующими свойствами, которые предполагается определять по коэффициентам:

- уменьшение ЕО с приближением к поверхности окна при затенении части неба СЗУ, которое характеризуется коэффициентом затенения диффузной радиации и диффузной освещенности от неба СЗУ, K_{shad} ;
- увеличение ЕО с приближением к поверхности окна при отражении света от СЗУ, которое характеризуется коэффициентом отраженного света от разных поверхностей СЗУ, K_{ref} .

В исследовании используются поиск и анализ мировой литературы, расчет и анализ норм, стандартов для расчета и оценки ЕО в России и зарубежных странах по критериям КЕО и абсолютной освещенности. Кроме того, применяются аналитические методы для разработки коэффициентов влияния СЗУ при предложении методики расчетов систем ЕО в промежуточном небе.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ОБЗОРА

Стандартизация ЕО

Доступ к дневному и солнечному свету — важный аспект в проектировании зданий на протяжении нескольких веков. Ранее использовались эмпирические правила, такие как отношение высоты окна и глубины комнаты [19]. Важность ЕО впервые была признана в Великобритании в законе о предписаниях 1832 г., известном как «Закон о праве на

свет» (Act Right of Light) [20, 21], согласно нему любой владелец недвижимости имеет право и должен иметь свой доступ к дневному свету в течение 20 лет. Эти единые правила основаны на геометрической конфигурации окон и окружающих зданий.

Сформулированный в Великобритании показатель оценки ЕО, средний КЕО — это простое отношение внутренней освещенности E_{in} к беспрепятственной диффузной горизонтальной освещенности E_{out} при стандартных условиях облачного неба МКО, где вклад прямых солнечных лучей исключен. КЕО не чувствителен как к преобладающему местному климату, так и к ориентации здания [22]. Он выражается формулой

$$КЕО = \frac{E_{in}}{E_{out}} 100 \%, \quad (1)$$

где E_{in} — внутренняя освещенность, лк; E_{out} — наружная диффузная горизонтальная освещенность, лк.

Качество внутренней среды зависит в основном от факторов, влияющих на восприятие человеком света, тепла, шума и воздуха. Для создания хороших и удовлетворительных визуальных условий для работы, отдыха и различных видов деятельности, оценки использования естественного и искусственного света в зданиях должны быть определены критерии и правила проектирования систем освещения, строительства зданий и т.д. [23–28]. Некоторые страны (табл. 1) приняли национальные правила, стандарты для проектирования и оценки ЕО [24].

Новый европейский стандарт ЕО в зданиях EN 17037

Прогресс в инженерных исследованиях увеличивает роль ЕО как важного фактора для здоровья и труда человека [29, 30]. В Европе здоровье людей и эффективное использование природных источников высоко ценятся, поэтому принят новый стандарт с критериями для оценки ЕО в зданиях. Рабочая группа CEN¹/TC 169/WG 11 по ЕО была создана с целью разработки стандарта «Дневной свет зданий» (Daylight of buildings). Предлагаемый стандарт по ЕО [31] одобрен экспертами стран CEN. В нем предпринята попытка изменить текущие относительные критерии КЕО на единицы абсолютной освещенности, предписанные для определенных категорий визуальных задач, аналогичных тем, которые используются при искусственном освещении в освещаемых пространствах [24]. Из-за географического охвата территории Европы от Средиземноморья до дальних северных стран этот стандарт вводит новую концепцию медианной внешней рассеянной

¹ CEN — European Committee for Standardization (Европейский комитет по стандартизации — ассоциация, которая объединяет национальные органы по стандартизации в 33 странах Европы).

Табл. 1. Отдельные стандарты и документы, содержащие требования и рекомендации для оценки ЕО в зданиях**Table 1.** Separate standards and documents containing requirements and recommendations for assessing daylight in buildings

Страна / Country	Обозначение стандарта / Standard designation	Описание / Description
Австралия / Australia	AS 1680.1-2006	Interior lighting — General principles and recommendations
Бельгия / Belgium	NBN L13-002:1972	Dagverlichting van gebouwen — Voorafbepaling van de daglichtverlichtingssterkte bij overtrokken hemel (benaderende grafische methode)
Бразилия / Brazil	NBR15215-1	Iluminação natural — Parte 1: Conceitos básicos e definições
	NBR 15215-2	Iluminação natural — Parte 2: procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural
	NBR 15215-3	Iluminação natural — Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos
	NBR 15215-4	Iluminação natural — Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição
Канада / Canada	PWGSC 1989	PWC Daylighting manual, Ottawa
Страны-члены Европейского комитета по стандартизации (CEN) / Member countries of European Committee for Standardization (CEN)	EN 17037	Daylight of building
Китай / China	GB 50033-2013	建筑采光设计标准
Чехия / Czechia	ČSN 73 0580-1	Denní osvětlení budov — Část 1: Základní požadavky
	ČSN 73 0580-2	Denní osvětlení budov — Část 2: Denní osvětlení obytných budov
	ČSN 73 0580-3	Denní osvětlení budov. Část 3: Denní osvětlení škol
	ČSN 73 0580-4	Denní osvětlení budov. Část 4: Denní osvětlení průmyslových budov
Эстония / Estonia	EVS 894: 2008	Loomulik valgustus elu- ja büroorumides
Германия / Germany	DIN 5034-1	Tageslicht in Innenräumen — Teil 1: Allgemeine Anforderungen
	DIN 5034-2	Tageslicht in Innenräumen; Grundlagen
	DIN 5034-3	Tageslicht in Innenräumen — Teil 3: Berechnung
	DIN 5034-4	Tageslicht in Innenräumen — Teil 4: Vereinfachte Bestimmung von Mindestfenstergrößen für Wohnräume
	DIN 5034-5	Tageslicht in Innenräumen — Teil 5: Messung
	DIN 5034-6	Tageslicht in Innenräumen — Teil 6: Vereinfachte Bestimmung zweckmäßiger Abmessungen von Oberlichtöffnungen in Dachflächen
Великобритания / Great Britain	BS 8206: Part 2	Lighting for buildings: Code of practice for daylighting
Гонконг / Hong Kong	Regulation APP-130	Lighting and Ventilation Requirements — Performance-based Approach
Япония / Japan	JIES-008-1999	Indoor Lighting Standard
Нидерланды / Netherlands	NEN 2057	Daglichtopeningen van gebouwen
Норвегия / Norway	Regulation No. 77, 14. June 1985	Technical regulations to the Planning and Building. Updated by the regulation No. 1069, 29th August 2001
Польша / Poland	Regulation of Ministry for Infrastruktura, (Dz. U. Poz. 1422)	W sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie
Россия / Russia	СП 23-102-2003	Естественное освещение жилых и общественных зданий
	СП 52.13330.2016	Естественное и искусственное освещение

Страна / Country	Обозначение стандарта / Standard designation	Описание / Description
Сербия / Serbia	SRPS U.C9.100:1963	Дневно и електрично осветљење просторија у зградама
Словакия / Slovakia	STN 73 0580-1	Denné osvetlenie budov. Časť 1: Základné požiadavky
	STN 73 0580-2	Denné osvetlenie budov. Časť 2: Denné osvetlenie budov na bývanie
	STN 73 0580-1/Z2	Denné osvetlenie budov. Časť 1: Základné požiadavky
	Regulation No. 541/2007 Z.z.	o podrobnostiach o požiadavkách na osvetlenie pri práci.
Словения / Slovenia	Rule UL. RS, No. 43, 3.6.2011	Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravlja delavcev na delovnih mestih
	Rule UL. RS, No. 61, 2.11.2017	Pravilnik o minimalnih tehničnih zahtevah za graditev stanovanjskih stavb in stanovanj
Швеция / Sweden	SS 91 42 01	Byggnadsutformning — Dagsljus — Förenklad metod för kontroll av erforderlig fönsterglasarea
Украина / Ukraine	ДБН В.2.5-28	Природне і штучне освітлення

освещенности $E_{v,d,med}$ представляющей достаточную дневную доступность освещения в течение полугода, в качестве замены неопределенного облачного неба. Этот стандарт охватывает все основные предметы, связанные с дизайном и оценкой естественной визуальной среды, т.е. ЕО, солнечный свет и блики [32–35]. Стандарт может применяться ко всем помещениям, регулярно занятыми людьми в течение длительных периодов времени, за исключением помещений, где ЕО мешает выполнению работы.

Сертификация устойчивости зданий BREEAM², LEED³ — рекомендации по ЕО

Метод экологической оценки эффективности зданий BREEAM³ [36] — руководящие принципы, которые описывают два способа соответствия для получения единого критерия доступного для дневного освещения. При этом критерии основаны на КЕО и ЕО:

- КЕО, % (Daylight factor — DF): необходимо достичь минимального среднего КЕО на 80 % «соответствующей площади помещения» на высоте рабочей плоскости;
- ЕО, лк (Daylight illuminance — DI): необходимо достичь в среднем не менее 200 лк для 2650 ч в год или более, а также не менее 60 лк для 2650 ч в год или более в «наиболее неблагоприятной» точке (в обоих случаях на 80 % «соответствующей площади помещения» на высоте рабочей плоскости).

Указанные средние значения КЕО зависят от ширины местонахождения здания и колеблются от 1,5 %

для широт менее 40° и до 2,2 % для широт больше или равных 60°. Фактически целью ЕО является вариант дневной автономии (Daylight autonomy — DA). Дневная автономия была первой из ряда ежегодных метрик дневного света, которые теперь обычно называют «динамическими метриками дневного света» [37]. Исследование, проведенное авторами Reinhart и Weissman, показало, что высокая освещенность 300 лк хорошо согласуется с оценками студентов как «хорошо освещенное пространство» [38].

Статическая автономность дневного света основана на оценке фактора ЕО в рассматриваемой точке, при условии пасмурного неба МКО. В то время как динамическая автономность дневного света основана на прогнозе достаточной освещенности в рассматриваемой точке на определенном временном шаге (по часам или меньше) в течение года⁴ [39–40]. Автономность дневного света дает процентную долю года, когда минимальный порог освещенности достигается с помощью дневного света [41–43]:

1. Значение пространственной автономности ЕО (sDA)⁵ описывает, сколько света доступно в стандартные рабочие часы. В частности, описывается доля площади, которая получает не менее 300 лк (для офисов) в течение не менее чем 50 % рабочего времени в год. Значение sDA между 55 и 74 % указывает на пространство, в котором обычно используется ЕО.

2. Одним из показателей вероятности визуального дискомфорта является количество часов, в те-

² BREEAM — The Building Research Establishment Environmental Assessment Method.

³ LEED — Leadership in Energy and Environmental Design.

⁴ Waldram P.J. The Measurement of Illumination; Daylight & Artificial // Journal of the Society of Architects. 1910. Vol. 3. Issue 28. Pp. 131–140.

⁵ Spatial Daylight Autonomy.

чение которых прямой солнечный свет может потенциально попасть в пространство. Этот параметр называется «ежегодное воздействие солнечного света» (ASE)⁶. В частности, ASE измеряет процент от площади, которая получает не менее 1000 лк в течение как минимум 250 ч работы в год и обозначается как ASE_{1000,250h}. В исследованиях этого вопроса было указано, что пространства, освещенные естественным светом, должны иметь ASE не более 10 % для удовлетворительного визуального комфорта. Эти динамические параметры оценки ЕО в настоящее время предлагаются для мероприятий по сертификации среды здания или устойчивости среды здания, например, системы LEED, BREEAM, DGNB⁷.

3. Схема полезной дневной освещенности (UDI)⁸ основана на реакции людей в помещении на уровни дневного света (см. оригинальные документы UDI) [20, 44]. Впервые опубликованная в 2005 г. схема UDI имела 100 и 2000 лк в качестве нижней и верхней границ для достижения полезной дневной освещенности. Значение 2000 лк было пересмотрено в сторону повышения до 3000 лк через несколько лет, когда стали доступны данные более современных исследований [45].

Серьезную обеспокоенность в отношении критерия ЕО вызывает отсутствие ясности и возможность для пользователей подхода по-разному интерпретировать руководство. Например, руководящие принципы рекомендуют: «расчет ЕО должен включать дополнительный свет, поступающий от ясного и частично облачного неба и отраженного солнечного света» [36]. Но ничего не говорится ни о критериях прямого солнечного света, ни о каких-либо указаниях относительно того, как следует проводить его моделирование. Если в моделирование включен прямой солнечный свет, то следует также учитывать работу затеняющих устройств (например, жалюзи). Это жизненно важный фактор, так как результат расчета будет сильно зависеть от отсутствия или наличия жалюзи и их контроля. В свете этих опасений мы считаем, что нынешняя рекомендация по критерию ЕО неполная [46].

Российские нормы по расчету ЕО СП 23-102-2003⁹ и СП 52.13330.2016¹⁰

При боковом освещении основной расчет КЕО описывается формулой (2):

$$DF_{side}^{\square} = C_N \cdot \left(\sum_{i=1}^L \varepsilon_{\sigma i} q_i + \sum_{j=1}^M \varepsilon_{bldj} \cdot b_{fj} \cdot k_{bldj} \right) \cdot r_0 \cdot \tau_0 \cdot MF, \quad (2)$$

где C_N — коэффициент светового климата; L — число участков небосвода, видимых через световой проем из расчетной точки; $\varepsilon_{\sigma i}$ — геометрический КЕО в расчетной точке при боковом освещении, учитывающий прямой свет от i -го участка неба; q_i — коэффициент неравномерной яркости i -го участка облачного неба МКО; M — число участков фасадов зданий противостоящей застройки, видимых через световой проем от расчетной точки; ε_{bldj} — геометрический КЕО в расчетной точке при боковом освещении, учитывающий свет, отраженный от j -го участка фасадов зданий противостоящей застройки, %; b_{fj} — средняя относительная яркость j -го участка фасадов зданий противостоящей застройки, физическая сущность этого коэффициента аналогична коэффициенту q ; k_{bldj} — коэффициент, учитывающий изменения внутренней отраженной составляющей КЕО в помещении при наличии противостоящих зданий; r_0 — коэффициент, учитывающий повышение КЕО при боковом освещении благодаря свету, отраженному от поверхностей помещения и подстилающего слоя, прилегающего к зданию; τ_0 — общий коэффициент светопропускания; MF — коэффициент эксплуатации.

Формула (2) применяется в расчете КЕО в условиях МКО пасмурного неба, соответственно используется коэффициент неравномерности яркости q для облачного неба. В этой формуле коэффициент τ_4 , учитывающий потери света при наличии СЗУ, незавершенный, так как влияние размеров и отражения ЕО от СЗУ не учитывается.

Практические расчеты и оценки ЕО при проектировании зданий и сооружений, программа Radiance

Инженеры регулярно используют компьютерное моделирование для прогнозирования внутренней среды и энергопотребления зданий на этапе проектирования. Результаты имитационных исследований могут послужить основой для существенных особенностей конструкции здания с вытекающими отсюда затратами времени и материалов [47]. Как следствие, практики выбирают те программы моделирования, которые прошли проверочные тесты и доказали свою пригодность для решения определенных задач. Прогнозы сравниваются с измерениями и производится оценка точности программы. На практике, однако, часто бывает трудно с уверенностью определить реально возникающие условия в имитационной модели, потому что знание реальности обычно является неполным и неточным [48–50].

⁶ Annual Sunlight Exposure.

⁷ Global Benchmark for Sustainability.

⁸ Useful Daylight Illuminance.

⁹ СП 23-102-2003. Естественное освещение жилых и общественных зданий. М., 2005. 81 с.

¹⁰ СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение (Daylighting and artificial lighting). Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*. М., 2017. 102 с.

Система моделирования освещения Radiance стала предметом ряда подтвержденных исследований, показавших, что она точнее, чем любая другая сопоставимая система [51–57]. В частности, для моделирования дневного света Radiance был проверен с использованием набора данных BRE-IDMP¹¹ (Создание исследовательских учреждений в рамках Международной программы измерения дневного света) [58]. Исследования показали, что точность прогнозов Radiance очень высока при оценке ЕО с критериями КЕО в условиях облачного неба.

Стандартная модель неба МКО обычно применяется для представления фактически возникающих условий облачности. Когда это делается с целью проверки точности компьютерных прогнозов освещенности важно, чтобы реальная картина яркости неба была идентична или, по крайней мере, очень похожа на ту, которая использовалась для моделирования. В противном случае становится невозможным определить причину какого-либо расхождения между измеренной и смоделированной освещенностью: это может в равной степени быть результатом плохой работы программы моделирования или того, что смоделированное небо отличалось от реального неба во время измерения. Существует ряд критериев, описанных для определения стандартного пасмурного неба МКО. Эти критерии включают в себя [58]:

- визуальное наблюдение — небо выглядит сильно облачным, без заметной околосолнечной области и плавного распределения яркости;
- низкая общая горизонтальная освещенность — обычно в сочетании с визуальными наблюдениями;
- когда глобальная горизонтальная освещенность равна диффузной горизонтальной освещенности, другими словами — подтверждение измерениями того, что вклад прямой солнечной горизонтальной освещенности незначителен;
- небольшие колебания в последовательных измерениях глобальной горизонтальной освещенности через короткие промежутки времени для, казалось бы, пасмурного неба.

Примером является применение вычислительных методов и программирования совместно с программой DesignBuilder, которая обеспечивает два типа расчетов ЕО [47, 59–65]:

- графики ЕО, средний коэффициент и равномерность ЕО генерируются для каждой зоны, рассчитанной с использованием механизма моделирования лучевой трассировки. Предоставляются стандартные отчеты, детализирующие параметры нормативных показателей для ЕО: LEED EQ8.1, BREEAM HW1 и Green Star IEQ4;

¹¹ Building Research Establishment as part of the International Daylight Measurement Programme.

- ЕО интегрировано в программный комплекс EnergyPlus, что позволяет рассчитывать экономию электрического освещения на основе почасовой зависимости от существующих данных о горизонтальной освещенности в течение года.

Программа DesignBuilder Radiance обеспечивает подробный многозонный физический расчет уровней освещенности на рабочей плоскости. Расчеты учитывают свет, проходящий через окна, по схеме на рис. 3, а также учитывают эффект затенения и отражения локальных СЗУ при облачных условиях. Системы затенения окна, такие как решетчатые и рассеивающие жалюзи, не включаются в расчеты Radiance.

Рис. 3. Компоненты дневного света: а — прямой солнечный свет; b — прямой свет от неба; с — внешне отраженный; d — внутренне отраженный

Fig. 3. Daylight components: a — direct sunlight; b — direct light from the sky; c — externally reflected light; d — internally reflected light

Модель неба, которая будет использоваться для расчетов ЕО, выбрана по работе [65]:

1. МКО солнечный ясный день, распределение неба соответствует стандартному условию МКО ясного неба с дополнительным прямым освещением от солнца. Ожидание очень ярких пятен из-за прямого освещения от солнца в относительно темных областях, куда прямой солнечный свет не попадает.
2. МКО ясный день, стандартное распределение МКО ясного неба без прямого освещения от солнца.
3. МКО солнечный промежуточный день, небо с промежуточными условиями между пасмурным и ясным небом с включением прямой освещенности от солнца.
4. Промежуточный день МКО, стандартное промежуточное небо МКО с условиями распределения освещенности между пасмурным и ясным небом. Прямое освещение от солнца отсутствует.
5. Пасмурный день МКО, стандартное пасмурное небо МКО, первоначально известный как небо Муна – Спенсер, разработано, чтобы представить

распределение яркости, наблюдаемое для облачного неба. Принятое в качестве стандарта МКО в 1955 г., это описание наиболее часто используется для моделирования освещенности. В этой модели яркость неба постепенно увеличивается с высотой от горизонта до зенита, и не зависит от азимута.

6. Пасмурный день МКО (в масштабе), этот вариант аналогичен описанному выше пасмурному дню, но масштабируется с использованием стандартной освещенности неба в зените. По умолчанию зенитная освещенность установлена на 10 000 лк, так что КЕО можно рассчитать просто как значения освещенности рабочей плоскости, делится на 100. Эта опция часто применяется для расчета КЕО.

7. Равно яркое небо, где освещение неба абсолютно равномерно.

Значение КЕО имеет смысл только для пасмурного и равномерного неба МКО, т.е. без солнца. Поэтому DesignBuilder и другие программы рассчитывают только КЕО для стандартного пасмурного неба МКО; при условии промежуточного неба, оценка ЕО определяется освещенностью или по значениям sDA ЕО и ASE. Таким образом, оценка системы ЕО, которая указывает соотношение внутренней и горизонтальной освещенности под промежуточным небом с дополнительным отраженным светом, не была определена.

Перспективы теоретического развития

В практике проектирования ЕО многие недостатки в стандартных системах и методах расчетов требуют обновления последних. До сих пор теоретическая оценка статической ЕО по значению КЕО рассматривается только для пасмурного неба МКО. С промежуточными типами неба для фиксированного положения солнца и для определенной геометрии помещения внутренняя освещенность считается пропорциональной внешней горизонтальной освещенности E_D . На самом деле это должно быть связано с более гибким показателем, чем КЕО. Однако в жарком солнечном климате с высоким тепловым излучением, например в тропических странах, в помещении должна быть только диффузная ЕО. Системы ЕО с СЗУ используются для предотвращения попадания внутрь прямого излучения, уменьшения теплопоступлений и бликов. В средней полосе можно допускать попадание в помещение солнечного света, за исключением случаев, когда это может вызвать тепловой или визуальный дискомфорт для пользователей или порчу материалов [66–68]. Аналогично в помещении допускается только полностью рассеянное ЕО от света неба и отраженное ЕО от прилегающих поверхностей (т.е. от земли, СЗУ и т.п.). При промежуточных типах неба, отраженный свет позволяет повысить ЕО в помещении во много раз.

В нормах [69] сказано: «Как правило, солнечный свет не должен падать непосредственно на людей при работе. С другой стороны, его следует использовать для повышения общей яркости интерьеров с участками повышенной освещенности. Рассмотрение солнечного света должно влиять на форму здания с ранних этапов проектирования, потому что неправильные решения относительно ориентации помещений или геометрической формы здания могут препятствовать попаданию солнечного света или вызывать чрезмерное затенение окружающей среды. Ориентация окон должна учитывать периоды пребывания людей и любые предпочтения относительно солнечного света в определенное время суток... В некоторых случаях важно, чтобы прямой солнечный свет попадал на наружные прилегающие поверхности к окнам». Примечание: «Солнечный свет, попадающий в комнату, может оказать существенное влияние на тепловой комфорт и энергопотребление здания. Зимой это может быть важным вкладом в отопление, но чрезмерное солнечное облучение вызывает серьезный дискомфорт, а в зданиях с кондиционированием воздуха — ненужное использование энергии для охлаждения».

В исследовании [48] (J. Mardaljevic, 2004) отмечено, что: «Прогнозы освещенности особенно чувствительны к заданной отражательной способности поверхностей, когда прямая составляющая освещения мала». В обсуждении C.F. Reinhart¹² написано: «Я был удивлен, что автор (J. Mardaljevic) никогда не предлагал использовать динамическую модель неба, такую как Perez (1993) [70] вместо модели облачного неба МКО. В то же время, в модели Perez учитывается прямая и рассеянная освещенность или излучение, и было продемонстрировано, что она адекватно моделирует распределение света при большем количестве различных условий неба».

Факторы светового климата рассматриваются в расчете ЕО в реальном промежуточном небе, можно перечислить фундаментальное влияние загрязнения атмосферы, особенно в городах и промышленных зонах, значительно влияющее на изменение уровня освещенности от неба и солнца [71–76]. Особенно это важно в субтропическом и тропическом климате с большим количеством солнечных дней из-за повышенной влажности и рассеивающих перьевых облаков, постепенно покрывающих все небо [77]. Определение времени для расчета и географической ориентации [78, 79], которые влияют на координаты солнца или изменения положений солнца с их повторением в течение многих лет, наблюдений за изменениями яркости неба под влия-

¹² From National Research Council, Institute for Research in construction, Ottawa.

нием погоды, атмосферной мутности, типа облаков и видов покрытия, должно учитываться в расчетах. В расчетной формуле (2) влияние положения солнца на распределение яркости видимой части неба характеризуется коэффициентом неравномерной яркости неба q . При условии промежуточного неба

этот коэффициент определяется в работах [80–84] и будет включен в расчеты ЕО. На рис. 4 приведены примеры результатов определения q для промежуточного неба в г. Ханое и г. Хошимин (Вьетнам).

Рекомендации по определению коэффициентов влияния СЗУ в расчете ЕО:

Рис. 4. Коэффициент q для промежуточного неба, примеры для Ханоя (Тип VI/ $K_0 = 0,81$) и Хошимина (Тип X/ $K_0 = 0,57$):
 а — при расчете β по модели Kittle; б — при расчете β по K_0

Fig. 4. Factor q for the intermediate sky, examples for Hanoi (Type VI/ $K_0 = 0.81$) and Ho Chi Minh City (Type X/ $K_0 = 0.57$):
 а — when calculating β as per the Kittle model; б — when calculating β by K_0

1. Коэффициент уменьшения диффузной радиации в помещении при наличии СЗУ K_{shad} .

СЗУ могут быть полезными элементами управления освещением для систем ЕО. В дополнении к блокированию прямых солнечных лучей они также уменьшают часть неба, видимую из комнаты, таким образом, уменьшая количество рассеянного светового потока, пропускаемого на поверхность окна.

Фактическая световая эффективность зависит от различных климатических факторов: положения солнца, прозрачности атмосферы и диффузии света в атмосфере, статистики облачности, коэффициента отражения от земли и других факторов, таких как водяной пар, частицы льда на большой высоте, пыль и различные газы, а также другие загрязнители, попадающие в воздух в результате деятельности человека.

Коэффициент, учитывающий уменьшение диффузного излучения от солнца при наличии СЗУ K_{shad}

для бесконечных горизонтальных и бесконечных вертикальных, а также для сотовых СЗУ, предложен в работах [85, 86]. Результаты исследования утверждены и включены в пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91 (1993) [87].

Коэффициент уменьшения диффузной радиации в помещении при наличии козырька (K_{bt} при конечном горизонтальном СЗУ) определен в трудах [88]. Поскольку лучи рассеянного излучения являются центростремительными, необходимо установить начало координат на поверхности окна для расчета K_{bt} (рис. 5).

Коэффициенты K_{shad} при наличии конечного горизонтального СЗУ (типа козырька):

$$K_{shad} = 1 - 2\psi_{cs-cn,ov} = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\arctg \frac{D}{h} - \frac{h}{\sqrt{L_{ov}^2 + h^2}} \cdot \arctg \frac{D}{\sqrt{L_{ov}^2 + h^2}} \right). \quad (3)$$

Рис. 5. Иллюстрация расчета коэффициента излучения между поверхностью СЗУ и центральной точкой О окна

Fig. 5. Illustration of calculation of emissivity coefficient between sunshade surface and window center point O

2. Отражение света от СЗУ (козырька) учитывается коэффициентом K_{ref} и определяется по закону Ламберта [82–84]. Основная формула описывается:

$$dE = \frac{L \cdot dx \cdot dy \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{r^2}, \quad (4)$$

где L — яркость участка dS . Отраженную поверхность надо разбить на элементарные участки $\Delta S = \Delta x \cdot \Delta y$ и просуммировать величину отраженного света от каждого из участков отраженной поверхности в каждую расчетную точку в центре аналогичных элементарных участков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка влияния СЗУ на величину КЕО зависит от затенения и отражения света плоскостью козырька. Классическое значение КЕО чувствительно только для пасмурного неба МКО. При реальном небе новый метод предлагает оценить внутреннее ЕО по соотношению внутренней освещенности и наружной диффузной горизонтальной освещенности при воздействии прямого солнца. При этом ЕО в помещении принимает отражение суммарной освещенности от прилегающих поверхности и СЗУ, которое значительно повышает ЕО в помещении.

Коэффициент уменьшения ЕО за счет диффузной радиации в помещении при наличии СЗУ K_{shad}

Необходимо признать гипотезу: отражение ЕО от прилегающих поверхностей считается полным рассеянным отражением. Интенсивность диффузной освещенности от неба является линейной функцией с интенсивностью диффузного излучения от неба, формула (5) представляет это отношение [75].

$$K = 697,33 \frac{\int_{\lambda_1=380}^{\lambda_2=780} \varphi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \varphi_e(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{K_{lux}}{W \cdot m^{-2}}, \quad (5)$$

где K — световой эквивалент излучения или световая эффективность, клк/Вт·м² или Лм/Вт; 697,33 — максимальная спектральная чувствительность зрения, которая возникает при 555 нм; $\varphi_e(\lambda)$ — плотность потока на длине волны, нм; $V(\lambda)$ — значение функции спектральной световой эффективности для длины волны λ .

Согласно линейным отношениям между диффузной освещенностью и диффузным излучением, коэффициент, учитывающий уменьшения диффузной освещенности в помещении при наличии СЗУ равно коэффициенту, учитывающему уменьшения диффузного излучения от солнца при наличии СЗУ K_{shad} , который определяется по формуле (3).

Коэффициента повышения ЕО за счет отраженного света от разных поверхностей СЗУ K_{ref}

Отраженная освещенность от горизонтального СЗУ (козырька) K_{ref} характеризуется процессом отражения света от земли или от другой прилегающей отражающей поверхности на нижнюю поверхность горизонтального СЗУ и от поверхности СЗУ на точку O в центре окна. Этот процесс характерен отражениями между перпендикулярными и параллельными плоскостями. При наличии горизонтального СЗУ отраженная освещенность на точку O выражается в два этапа.

Первый этап — отражение от первой отражающей поверхности на горизонтальное СЗУ, отличается отражением между двумя параллельными плоскостями.

Второй этап — отражение от горизонтального СЗУ на окна характеризуется отражением между двумя перпендикулярными плоскостями.

$$K_{ref} = 1 + \frac{E_G}{E_D} \times \frac{\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\pi^2} \cdot [F(D) - F(0)] \cdot [F(l - b) - F(-b)] + \frac{\rho_1}{\pi} [F(d) - F(0)]}{\frac{1}{2} \cdot K_{bt.ov}}; \quad (6)$$

$$F(x) = \frac{d}{\sqrt{h_1^2 + d^2}} \arctg \left(\frac{x}{\sqrt{h_1^2 + d^2}} \right) + \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} \arctg \left(\frac{d}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} \right); \quad (7)$$

$$F(y) = \arctg \left(\frac{y}{h_2} \right) - \frac{h_2}{\sqrt{h_2^2 + L^2}} \arctg \left(\frac{y}{\sqrt{h_2^2 + L^2}} \right); \quad (8)$$

$$F(y) = \arctg \left(\frac{y}{h_3} \right) - \frac{h_3}{\sqrt{h_3^2 + l^2}} \arctg \left(\frac{y}{\sqrt{h_3^2 + l^2}} \right), \quad (9)$$

где $[F(l - b) - F(-b)]$ определяется по формуле (7); $[F(D) - F(0)]$ — по формуле (8); $[F(d) - F(0)]$ — по формуле (9); E_G , E_D — соответственно суммарная и диффузная горизонтальная освещенность, лк; h , D , L — параметры систем ЕО соответственно расстояние от точки O до поверхности СЗУ, 1/2 длины козырька, выступ козырька от поверхности окна (см. рис. 5), м.

Усовершенствованная формула имеет вид:

$$УКЕО = K_{shad} \cdot K_{ref} \times \left(\sum_{i=1}^L \varepsilon_{ai} q_i + \sum_{j=1}^M \varepsilon_{bldj} \cdot b_{fj} \cdot k_{bldj} \right) \cdot r_0 \cdot \tau_0 \cdot MF. \quad (10)$$

Примечание: УКЕО — новый показатель оценки ЕО при реальных состояниях облачности.

Таким образом, при пасмурном небе МКО данная формула показывает, что основное влияние имеет затенение K_{shad} , хотя при высокой яркости промежуточного неба отражающая величина K_{ref} может иметь также большое значение. При наличии солнца при реальном статическом небосводе СЗУ может значительно увеличить освещенность в помещении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании обобщены существующие проблемы при расчете и оценке ЕО. Все имеющиеся теории нацелены на оценку ЕО при статическом условии стандартного облачного неба МКО. Такое состояние неба очень трудно идентифицировать. Оно не типично и затрудняет сравнение анализа с фактическими результатами измерений.

Исследование предлагает методику оценки ЕО в динамическом направлении. При этом применено светоклиматическое моделирование, которое пред-

лагает использовать климатические данные определенной местности для оценки ЕО. Влияние систем ЕО с горизонтальными СЗУ рассматривается конкретно с их параметрами. При этом задачи определения коэффициентов затенения прямой диффузной освещенности от неба и отражения света от СЗУ предлагается решать с помощью коэффициентов K_{shad} и K_{ref} . Новая концепция отражает оценку ЕО в помещении при условии промежуточного неба.

Предлагаемая методика позволяет проводить расчет ЕО в жарких и тропических регионах, где архитектура и ограждающие конструкции характерны светопроемами с СЗУ, т.е. самыми эффективными элементами для блокирования прямых солнечных лучей, которые уменьшают тепловую нагрузку в помещении и повышают визуальный комфорт.

Дальнейшие исследования должны быть посвящены определению значений K_{shad} и K_{ref} для различных типов СЗУ и конкретных параметров помещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tomczuk P. Prace naukowe. Transport. Modelowanie, badania eksperymentalne i ocena jakości oświetlenia sylwetki pieszego na przejściu dla pieszych. Warszawa : Oficyna wydaw. Politech. Warszawskiej, 2013. 185 p.
2. Kittler R., Kocifaj M., Darula S. Simulation of seasonal variations in the local daylight climate // Daylight Science and Daylighting Technology. 2011. Pp. 155–186. DOI: 10.1007/978-1-4419-8816-4_6
3. Kittler R. Daylight prediction and assessment: theory and design practice // Architectural Science Review. 2007. Vol. 50. Issue 2. Pp. 94–99. DOI: 10.3763/asre.2007.5014
4. Tregenza P., Wilson M. Daylighting: architecture and lighting design. London : Routledge, 2013. Pp. 59–77. DOI: 10.4324/9780203724613
5. Amirifard F., Sharif S.A., Nasiri F. Application of passive measures for energy conservation in buildings — a review // Advances in Building Energy Research. 2019. Vol. 13. Issue 2. Pp. 282–315. DOI: 10.1080/17512549.2018.1488617
6. Lou S., Li D.H.W., Lam J.C., Lee E.W.M. Estimation of obstructed vertical solar irradiation under the 15 CIE Standard Skies // Building and Environment. 2016. Vol. 103. Pp. 123–133. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.04.005
7. Boyce P.R. Human factors in lighting. Boca Raton : CRC Press, 2014. 703 p. DOI: 10.1201/b16707
8. Tregenza P., Mardaljevic J. Daylighting buildings: Standards and the needs of the designer // Lighting Research & Technology. 2018. Vol. 50. Issue 1. Pp. 63–79. DOI: 10.1177/1477153517740611
9. Budak V.P., Smirnov P.A. A physical model of the firmament to calculate daylight // Light and Engineering. 2013. Vol. 21. Issue 3. Pp. 17–23.
10. Mirrahimi S., Mohamed M.F., Haw L.C., Ibrahim N.L.N., Yusoff W.F.M., Aflaki A. The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 53. Pp. 1508–1519. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.055
11. Al-Tamimi N.A., Fadzil S.F.S. The potential of shading devices for temperature reduction in high-rise residential buildings in the tropics // Procedia Engineering. 2011. Vol. 21. Pp. 273–282. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2015
12. Kirimtati A., Koyunbaba B.K., Chatzikonstantinou I., Sariyildiz S. Review of simulation modeling for shading devices in buildings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 53. Pp. 23–49. DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.020
13. Abdullah F.H., Majid N.H.A., Othman R. Defining issue of thermal comfort control through urban mosque facade design // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2016. Vol. 234. Pp. 416–423. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.10.259
14. Cheong K.H., Teo Y.H., Koh J.M., Acharya U.R., Yu S.C.M. A simulation-aided approach in improving thermal-visual comfort and power efficiency in buildings // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 27. P. 100936. DOI: 10.1016/j.jobee.2019.100936

15. Mettanant V., Chaiwiwatworakul P. Automated vertical blinds for daylighting in tropical region // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 52. Pp. 278–286. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.079
16. Lim Y.-W., Heng C.Y.S. Dynamic internal light shelf for tropical daylighting in high-rise office buildings // *Building and Environment*. 2016. Vol. 106. Pp. 155–166. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.06.030
17. Lee H., Kim K., Seo J., Kim Y. Effectiveness of a perforated light shelf for energy saving // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 144. Pp. 144–151. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.008
18. Al-Masrani S.M., Al-Obaidi K.M., Zalin N.A., Isma M.I.A. Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends // *Solar Energy*. 2018. Vol. 170. Pp. 849–872. DOI: 10.1016/j.solener.2018.04.047
19. Ibrahim N.L.N., Hayman S. Latitude variation and its influence on rules of thumb in daylighting // *Architectural Science Review*. 2010. Vol. 53. Issue 4. Pp. 408–414. DOI: 10.1080/00038628.2010.9685341
20. Darula S., Christoffersen J., Malikova M. Sunlight and insolation of building interiors // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78. Pp. 1245–1250. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.266
21. Valiček P., Novák T., Vaňuš J., Sokanský K., Martinek R. Illuminance evaluation in automatically dimmed interior lighting systems // 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4). 2016. 5 p. DOI: 10.1109/LUMENV.2016.7745513
22. Nabil A., Mardaljevic J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings // *Lighting Research & Technology*. 2005. Vol. 37. Issue 1. Pp. 41–57. DOI: 10.1191/1365782805li128oa
23. Sokół N., Martyniuk-Pęczek J. Daylight recommendation for building interiors in the selected national building and lighting regulations in the EU // XXVI Krajowa Konferencja Oświetleniowa Technika Świetlna 2017. 2017. Pp. 175–191.
24. Darula S. Review of the current state and future development in standardizing natural lighting in interiors // *Light & Engineering*. 2018. Vol. 26. Issue 4. Pp. 5–26.
25. Vajkay F., Zizka L. Assessment of daylighting design tools against test cases included in CIE's 171:2006 Report // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 899. Pp. 352–355. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.899.352
26. Li G.-Z., Wang Q.-Q., Wang J.-L. Chinese standard requirements on indoor environmental quality for assessment of energy-efficient buildings // *Indoor and Built Environment*. 2014. Vol. 23. Issue 2. Pp. 194–200. DOI: 10.1177/1420326X13507793
27. Mardaljevic J., Roy N. The sunlight beam index // *Lighting Research & Technology*. 2016. Vol. 48. Issue 1. Pp. 55–69. DOI: 10.1177/1477153515621486
28. Lee J., Boubekri M., Liang F. Impact of building design parameters on daylighting metrics using an analysis, prediction, and optimization approach based on statistical learning technique // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Issue 5. P. 1474. DOI: 10.3390/su11051474
29. Juslén H., Tenner A. Mechanisms involved in enhancing human performance by changing the lighting in the industrial workplace // *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2005. Vol. 35. Issue 9. Pp. 843–855. DOI: 10.1016/j.ergon.2005.03.002
30. Boubekri M. Daylighting, architecture and health: building design strategies. London : Routledge, 2008. 160 p. DOI: 10.4324/9780080940717
31. Mardaljevic J., Christoffersen J., Raynham P. A proposal for a European standard for daylight in buildings // *Lux Europa 2013: 12th European Lighting Conference*. 2013. Pp. 237–250.
32. Darula S., Maliková M. New European standard criteria for daylight assessment // *Proc. Conf. Lighting Engineering 2015*. 2015. Pp. 69–74.
33. Darula S. Hodnotenie denného svetla v Európe (Evaluation of daylight in Europe) // *Světlo*. 2018. Vol. 21. Issue 2. Pp. 40–42.
34. Sokol N., Martyniuk-Pęczek J. The review of the selected challenges for an incorporation of daylight assessment methods into urban planning in Poland // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. Pp. 2191–2197. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.814
35. Deroisy B., Deneyer A. A new standard for daylight: towards a daylight revolution? // *Lighting for modern society: proceedings of the Lux Europa 2017*. 2017. Pp. 340–343.
36. Marjaba G.E., Chidiac S.E. Sustainability and resiliency metrics for buildings — Critical review // *Building and Environment*. 2016. Vol. 101. Pp. 116–125. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.03.002
37. Hescong L., Wymelenberg V.D., Andersen M., Digert N., Fernandes L., Keller A. et al. Approved method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). New York : IES — Illuminating Engineering Society, 2012. 14 p.
38. Reinhart C.F., Weissman D.A. The daylight area — Correlating architectural student assessments with current and emerging daylight availability metrics // *Building and Environment*. 2012. Vol. 50. Pp. 155–164. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.10.024
39. Mardaljevic J., Hescong L., Lee E. Daylight metrics and energy savings // *Lighting Research & Technology*. 2009. Vol. 41. Issue 3. Pp. 261–283. DOI: 10.1177/1477153509339703
40. Reinhart C.F., Mardaljevic J., Rogers Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design // *Leukos*. 2006. Vol. 3. Issue 1. Pp. 7–31. DOI: 10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001
41. Reinhard E., Heidrich W., Debevec P., Patanaik S., Ward G., Myszkowski K. High dynamic range

imaging: acquisition, display, and image-based lighting. Morgan Kaufmann, 2010. 672 p.

42. *Jakubiec J.A., Reinhart C.F.* The ‘adaptive zone’ — A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces // *Lighting Research & Technology*. 2012. Vol. 44. Issue 2. Pp. 149–170. DOI: 10.1177/1477153511420097

43. *Iringová A.* Impact of external shading on light comfort and energy efficiency in apartment buildings // *Applied Mechanics and Materials*. 2017. Vol. 861. Pp. 485–492. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.861.485

44. *Nabil A., Mardaljevic J.* Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors // *Energy and Buildings*. 2006. Vol. 38. Issue 7. Pp. 905–913. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.03.013

45. *Lindelöf D., Morel N.* Bayesian estimation of visual discomfort // *Building Research & Information*. 2008. Vol. 36. Issue 1. Pp. 83–96. DOI: 10.1080/09613210701544061

46. *Souza D.F., Scarazzato P.S., Pedrini H.* Classifying skies from images: A multidimensional approach to detecting high dynamic range imaging attributes // *Lighting Research & Technology*. 2016. Vol. 48. Issue 5. Pp. 559–572. DOI: 10.1177/1477153516637231

47. *Manzan M., Clarich A.* FAST energy and daylight optimization of an office with fixed and movable shading devices // *Building and Environment*. 2017. Vol. 113. Pp. 175–184. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.09.035

48. *Mardaljevic J.* Verification of program accuracy for illuminance modelling: assumptions, methodology and an examination of conflicting findings // *Lighting Research & Technology*. 2004. Vol. 36. Issue 3. Pp. 217–239. DOI: 10.1191/1477153504li120oa

49. *Mardaljevic J.* Validation of a lighting simulation program under real sky conditions // *International Journal of Lighting Research and Technology*. 1995. Vol. 27. Issue 4. Pp. 181–188. DOI: 10.1177/14771535950270040701

50. *Li D.H.W., Lau C.C.S., Lam J.C.* Predicting daylight illuminance by computer simulation techniques // *Lighting Research & Technology*. 2004. Vol. 36. Issue 2. Pp. 113–128. DOI: 10.1191/1365782804li108oa

51. *Michael A., Heracleous C.* Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 140. Pp. 443–457. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.087

52. № US 9,078,299 B2. Predictive daylight harvesting system / I. Ashdown; Suntracker technologies ltd. Appl.: No. 13/446,577, 13.04.2012. Publ. 07.07.2015.

53. *Keller A., Wächter C., Raab M., Seibert D., van Antwerpen D., Korndörfer J. et al.* The iray light

transport simulation and rendering system // *SIGGRAPH '17: ACM SIGGRAPH 2017 Talks*. 2017. P. 34. DOI: 10.1145/3084363.3085050

54. *Sun Y., Wu Y., Wilson R.* Analysis of the daylight performance of a glazing system with Parallel Slat Transparent Insulation Material (PS-TIM) // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 139. Pp. 616–633. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.001

55. *Ritschel T., Dachsbacher C., Grosch T., Kautz J.* The state of the art in interactive global illumination // *Computer Graphics Forum*. 2012. Vol. 31. Issue 1. Pp. 160–188. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2012.02093.x

56. *Vera S., Uribe D., Bustamante W., Molina G.* Optimization of a fixed exterior complex fenestration system considering visual comfort and energy performance criteria // *Building and Environment*. 2017. Vol. 113. Pp. 163–174. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.07.027

57. *Wu Y., Kämpf J.H., Scartezzini J.-L.* Characterization of a quasi-real-time lighting computing system based on HDR imaging // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 122. Pp. 649–654. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.364

58. *Mardaljevic J.* Sky model blends for predicting internal illuminance: a comparison founded on the BRE-IDMP dataset // *Journal of Building Performance Simulation*. 2008. Vol. 1. Issue 3. Pp. 163–173. DOI: 10.1080/19401490802419836

59. *Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O. et al.* EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program // *Energy and buildings*. 2001. Vol. 33. Issue 4. Pp. 319–331. DOI: 10.1016/S0378-7788(00)00114-6

60. *Zhang L.* Simulation analysis of built environment based on design builder software // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 580–583. Pp. 3134–3137. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.3134

61. *Bustamante W., Uribe D., Vera S., Molina G.* An integrated thermal and lighting simulation tool to support the design process of complex fenestration systems for office buildings // *Applied Energy*. 2017. Vol. 198. Pp. 36–48. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.046

62. *Lydon G.P., Hofer J., Svetozarevic B., Nagy Z., Schlueter A.* Coupling energy systems with lightweight structures for a net plus energy building // *Applied Energy*. 2017. Vol. 189. Pp. 310–326. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.11.110

63. *Gentile N., Dubois M.-C.* Field data and simulations to estimate the role of standby energy use of lighting control systems in individual offices // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 155. Pp. 390–403. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.09.028

64. *Chen Y., Liang X., Hong T., Luo X.* Simulation and visualization of energy-related occupant behavior

in office buildings // *Building Simulation*. 2017. Vol. 10. Issue 6. Pp 785–798. DOI: 10.1007/s12273-017-0355-2

65. Khoroshiltseva M., Slanzi D., Poli I. A Pareto-based multi-objective optimization algorithm to design energy-efficient shading devices // *Applied Energy*. 2016. Vol. 184. Pp. 1400–1410. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.05.015

66. Konstantoglou M., Tsangrassoulis A. Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 60. Pp. 268–283. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.246

67. Hoffmann S., Lee E.S., McNeil A., Fernandes L., Vidanovic D., Thanachareonkit A. Balancing daylight, glare, and energy-efficiency goals: An evaluation of exterior coplanar shading systems using complex fenestration modeling tools // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 112. Pp. 279–298. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.12.009

68. Perez R., Seals R., Michalsky J. All-weather model for sky luminance distribution — Preliminary configuration and validation // *Solar energy*. 1993. Vol. 50. Issue 3. Pp. 235–245. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90017-I

69. Kittler R., Darula S. The simultaneous occurrence and relationship of sunlight and skylight under ISO/CIE standard sky types // *Lighting Research & Technology*. 2015. Vol. 47. Issue 5. Pp. 565–580. DOI: 10.1177/1477153514538883

70. Kittler R., Darula S. The natural redistribution of sunlight and skylight due to the atmospheric turbidity of cloudless skies // *Leukos*. 2018. Vol. 14. Issue 2. Pp. 87–93. DOI: 10.1080/15502724.2017.1391704

71. Nguyen T.K.P., Solovyov A., Pham T.H.H., Dong K.H. Confirmed method for definition of daylight climate for tropical Hanoi // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018*. 2018. Vol. 982. Pp. 35–47. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_4

72. Фьонг Н.Т.Х., Соловьев А.К., Тамразян А.Г. Комплексный подход к определению размеров светопроемов в зданиях с учетом требований безопасности // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 5. С. 20–25. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.05.20-25

73. Hens S.L.C.H. Building physics — heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises. Wilhelm Ernst & Sohn, 2017. 309 p. DOI: 10.1002/9783433608548

74. Nasrollahi N., Shokri E. Daylight illuminance in urban environments for visual comfort and energy performance // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 66. Pp. 861–874. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.052

75. Wittkopf S.K., Soon L.K. Analysing sky luminance scans and predicting frequent sky patterns in Singapore // *Lighting Research & Tech-*

nology. 2007. Vol. 39. Issue 1. Pp. 31–51. DOI: 10.1177/1365782806070683

76. Kittler R., Darula S. Determination of time and sun position system // *Solar Energy*. 2013. Vol. 93. Pp. 72–79. DOI: 10.1016/j.solener.2013.03.021

77. Krasić S., Pejić P., Mitković P. Significance of daylight in the design and construction of buildings // *GRAĐEVINAR*. 2013. Vol. 65. Issue 9. Pp. 833–840. DOI: 10.14256/JCE.869.2013

78. Solovyov A.K. Luminance distribution over the firmament: Taking it into account when designing natural illumination for building // *Light & Engineering*. 2009. Vol. 17. Issue 1. Pp. 59–73.

79. Соловьев А.К. Учет распределения яркости безоблачного неба в расчетах естественного освещения зданий // *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. № 3. С. 462–471.

80. Zemtsov V.A., Solovyov A.K., Shmarov I.A. Luminance parameters of the standard CIE sky within natural room illumination calculations and their application under various light climate conditions in Russia // *Light & Engineering*. 2017. Vol. 25. Issue 1. Pp. 106–114.

81. Phuong N.T.K. Luminance distributions in the tropical sky conditions // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 84. Issue 8. Pp. 192–204. DOI: 10.18720/MCE.84.18

82. Phuong N.T.K., Solovyov A., Hoa N.T. Phương pháp xác định hệ số phân bố không đồng đều độ chói cho bầu trời nhiệt đới Việt Nam // *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) — ĐHXD*. 2019. Vol. 13. Issue 3V. Pp. 136–147. DOI: 10.31814/stce.nuce2019-13(3V)-15

83. Фам Нгок Данг. Тепловой режим здания в климатических условиях Вьетнама : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1978. 191 с.

84. Фам Нгок Данг, Богословский В.Н. Расчет суммарного теплопоступления в помещение через окно // *Водоснабжение и санитарная техника*. 1973. № 1. С. 26–32.

85. Ha P.T.H. Passive architectural solution based on energy efficiency method of sunshading devices for high-rise apartment buildings in Hanoi : thesis of Ph. D. Hanoi. National university of Civil Engineering, 2018. 151 p.

86. Ha P.T.H. Energy efficiency facade design in high-rise apartment buildings using the calculation of solar heat transfer through windows with shading devices // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 143. P. 012055. DOI: 10.1088/1755-1315/143/1/012055

87. Ha P.T.H. A concept for energy-efficient high-rise buildings in Hanoi and a calculation method for building energy efficiency factor // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 142. Pp. 154–160. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.02.026

88. Dang P.N., Ha P.H. Heat and architectural climatics. Hanoi : Construction Publisher, 2002.

Поступила в редакцию 27 июля 2019 г.

Принята в доработанном виде 5 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 31 января 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Нгуен Тхи Хань Фыонг** — аспирант кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; agpz@mgsu.ru;

Алексей Кириллович Соловьев — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SolovevAK@gic.mgsu.ru.

REFERENCES

1. Tomczuk P. *Prace naukowe. Transport. Modelowanie, badania eksperymentalne i ocena jakości oświetlenia sylwetki pieszego na przejściu dla pieszych*. Warszawa, Oficyna wydaw. Politech. Warszawskiej, 2013; 185. (pol.).
2. Kittler R., Kocifaj M., Darula S. Simulation of seasonal variations in the local daylight climate. *Daylight Science and Daylighting Technology*. 2011; 155-186. DOI: 10.1007/978-1-4419-8816-4_6
3. Kittler R. Daylight prediction and assessment: theory and design practice. *Architectural Science Review*. 2007; 50(2):94-99. DOI: 10.3763/asre.2007.5014
4. Tregenza P., Wilson M. *Daylighting: Architecture and Lighting Design*. London, Routledge, 2013; 59-77. DOI: 10.4324/9780203724613
5. Amirifard F., Sharif S.A., Nasiri F. Application of passive measures for energy conservation in buildings — a review. *Advances in Building Energy Research*. 2019; 13(2):282-315. DOI: 10.1080/17512549.2018.1488617
6. Lou S., Li D.H.W., Lam J.C., Lee E.W.M. Estimation of obstructed vertical solar irradiation under the 15 CIE Standard Skies. *Building and Environment*. 2016; 103:123-133. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.04.005
7. Boyce P.R. *Human factors in lighting*. Boca Raton, CRC Press, 2014; 703. DOI: 10.1201/b16707
8. Tregenza P., Mardaljevic J. Daylighting buildings: Standards and the needs of the designer. *Lighting Research & Technology*. 2018; 50(1):63-79. DOI: 10.1177/1477153517740611
9. Budak V.P., Smirnov P.A. A physical model of the firmament to calculate daylight. *Light and Engineering*. 2013; 21(3):17-23.
10. Mirrahiimi S., Mohamed M.F., Haw L.C., Ibrahim N.L.N., Yusoff W.F.M., Aflaki A. The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 53:1508-1519. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.055
11. Al-Tamimi N.A., Fadzil S.F.S. The potential of shading devices for temperature reduction in high-rise residential buildings in the tropics. *Procedia Engineering*. 2011; 21:273-282. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2015
12. Kirimtat A., Koyunbaba B.K., Chatzikonstantinou I., Sariyildiz S. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 53:23-49. DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.020
13. Abdullah F.H., Majid N.H.A., Othman R. Defining issue of thermal comfort control through urban mosque façade design. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2016; 234:416-423. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.10.259
14. Cheong K.H., Teo Y.H., Koh J.M., Acharya U.R., Yu S.C.M. A simulation-aided approach in improving thermal-visual comfort and power efficiency in buildings. *Journal of Building Engineering*. 2020; 27:100936. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100936
15. Mettanant V., Chaiwiwatworakul P. Automated vertical blinds for daylighting in tropical region. *Energy Procedia*. 2014; 52:278-286. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.079
16. Lim Y.-W., Heng C.Y.S. Dynamic internal light shelf for tropical daylighting in high-rise office buildings. *Building and Environment*. 2016; 106:155-166. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.06.030
17. Lee H., Kim K., Seo J., Kim Y. Effectiveness of a perforated light shelf for energy saving. *Energy and Buildings*. 2017; 144:144-151. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.008
18. Al-Masrani S.M., Al-Obaidi K.M., Zalin N.A., Isma M.I.A. Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. *Solar Energy*. 2018; 170:849-872. DOI: 10.1016/j.solener.2018.04.047
19. Ibrahim N.L.N., Hayman S. Latitude variation and its influence on rules of thumb in daylighting. *Architectural Science Review*. 2010; 53(4):408-414. DOI: 10.1080/00038628.2010.9685341
20. Darula S., Christoffersen J., Malikova M. Sunlight and insolation of building interiors. *Energy*

Procedia. 2015; 78:1245-1250. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.266

21. Valíček P., Novák T., Vaňuš J., Sokanský K., Martinek R. Illuminance evaluation in automatically dimmed interior lighting systems. *2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4)*. 2016; 5. DOI: 10.1109/LUMENV.2016.7745513

22. Nabil A., Mardaljevic J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research & Technology*. 2005; 37(1):41-57. DOI: 10.1191/1365782805li128oa

23. Sokół N., Martyniuk-Pęczek J. Daylight recommendation for building interiors in the selected national building and lighting regulations in the EU. *XXVI Krajowa Konferencja Oświetleniowa Technika Światła 2017*. 2017; 175-191.

24. Darula S. Review of the current state and future development in standardizing natural lighting in interiors. *Light & Engineering*. 2018; 26(4):5-26.

25. Vajkay F., Zizka L. Assessment of daylighting design tools against test cases included in CIE's 171:2006 Report. *Advanced Materials Research*. 2014; 899:352-355. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.899.352

26. Li G.-Z., Wang Q.-Q., Wang J.-L. Chinese standard requirements on indoor environmental quality for assessment of energy-efficient buildings. *Indoor and Built Environment*. 2014; 23(2):194-200. DOI: 10.1177/1420326X13507793

27. Mardaljevic J., Roy N. The sunlight beam index. *Lighting Research & Technology*. 2016; 48(1):55-69. DOI: 10.1177/1477153515621486

28. Lee J., Boubekri M., Liang F. Impact of building design parameters on daylighting metrics using an analysis, prediction, and optimization approach based on statistical learning technique. *Sustainability*. 2019; 11(5):1474. DOI: 10.3390/su11051474

29. Juslén H., Tenner A. Mechanisms involved in enhancing human performance by changing the lighting in the industrial workplace. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2005; 35(9):843-855. DOI: 10.1016/j.ergon.2005.03.002

30. Boubekri M. *Daylighting, architecture and health: Building design strategies*. London, Routledge, 2008; 160. DOI: 10.4324/9780080940717

31. Mardaljevic J., Christoffersen J., Raynham P. A proposal for a European standard for daylight in buildings. *Lux Europa 2013: 12th European Lighting Conference*. 2013; 237-250.

32. Darula S., Malíková M. New European standard criteria for daylight assessment. *Proc. Conf. Lighting Engineering 2015*. 2015; 69-74.

33. Darula S. Hodnotenie denného svetla v Európe (Evaluation of daylight in Europe). *Svetlo*. 2018; 21(2):40-42. (slk.).

34. Sokol N., Martyniuk-Peczec J. The review of the selected challenges for an incorporation of daylight

assessment methods into urban planning in Poland. *Procedia Engineering*. 2016; 161:2191-2197. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.814

35. Deroisy B., Deneyer A. A new standard for daylight: Towards a daylight revolution? *Lighting for modern society: proceedings of the Lux Europa 2017*. 2017; 340-343.

36. Marjaba G.E., Chidiac S.E. Sustainability and resiliency metrics for buildings — Critical review. *Building and Environment*. 2016; 101:116-125. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.03.002

37. Hescong L., Wymelenberg V.D., Andersen M., Digert N., Fernandes L., Keller A. et al. *Approved method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*. New York, IES — Illuminating Engineering Society, 2012; 14.

38. Reinhart C.F., Weissman D.A. The daylight area — Correlating architectural student assessments with current and emerging daylight availability metrics. *Building and Environment*. 2012; 50:155-164. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.10.024

39. Mardaljevic J., Hescong L., Lee E. Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research & Technology*. 2009; 41(3):261-283. DOI: 10.1177/1477153509339703

40. Reinhart C.F., Mardaljevic J., Rogers Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*. 2006; 3(1):7-31. DOI: 10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001

41. Reinhard E., Heidrich W., Debevec P., Pattanaik S., Ward G., Myszkowski K. *High dynamic range imaging: Acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2010; 672.

42. Jakubiec J.A., Reinhart C.F. The 'adaptive zone' — A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces. *Lighting Research & Technology*. 2012; 44(2):149-170. DOI: 10.1177/1477153511420097

43. Iringová A. Impact of external shading on light comfort and energy efficiency in apartment buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2017; 861:485-492. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.861.485

44. Nabil A., Mardaljevic J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*. 2006; 38(7):905-913. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.03.013

45. Lindelöf D., Morel N. Bayesian estimation of visual discomfort. *Building Research & Information*. 2008; 36(1):83-96. DOI: 10.1080/09613210701544061

46. Souza D.F., Scarazzato P.S., Pedrini H. Classifying skies from images: A multidimensional approach to detecting high dynamic range imaging attributes. *Lighting Research & Technology*. 2016; 48(5):559-572. DOI: 10.1177/1477153516637231

47. Manzan M., Clarich A. FAST energy and daylight optimization of an office with fixed and mov-

- able shading devices. *Building and Environment*. 2017; 113:175-184. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.09.035
48. Mardaljevic J. Verification of program accuracy for illuminance modelling: assumptions, methodology and an examination of conflicting findings. *Lighting Research & Technology*. 2004; 36(3):217-239. DOI: 10.1191/1477153504li120oa
49. Mardaljevic J. Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. *International Journal of Lighting Research and Technology*. 1995; 27(4):181-188. DOI: 10.1177/14771535950270040701
50. Li D.H.W., Lau C.C.S., Lam J.C. Predicting daylight illuminance by computer simulation techniques. *Lighting Research & Technology*. 2004; 36(2):113-128. DOI: 10.1191/1365782804li108oa
51. Michael A., Heracleous C. Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus. *Energy and Buildings*. 2017; 140:443-457. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.087
52. United States Patent No. US 9,078,299 B2. Predictive daylight harvesting system / I. Ashdown; Suntracker technologies LTD. Appl. No. 13/446,577, 13.04.2012. Publ. 07.07.2015.
53. Keller A., Wächter C., Raab M., Seibert D., van Antwerpen D., Korndörfer J. et al. The iray light transport simulation and rendering system. *SIGGRAPH '17: ACM SIGGRAPH 2017 Talks*. 2017; 34. DOI: 10.1145/3084363.3085050
54. Sun Y., Wu Y., Wilson R. Analysis of the daylight performance of a glazing system with Parallel Slat Transparent Insulation Material (PS-TIM). *Energy and Buildings*. 2017; 139:616-633. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.001
55. Ritschel T., Dachsbaecher C., Grosch T., Kautz J. The state of the art in interactive global illumination. *Computer Graphics Forum*. 2012; 31(1):160-188. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2012.02093.x
56. Vera S., Uribe D., Bustamante W., Molina G. Optimization of a fixed exterior complex fenestration system considering visual comfort and energy performance criteria. *Building and Environment*. 2017; 113:163-174. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.07.027
57. Wu Y., Kämpf J.H., Scartezini J.-L. Characterization of a quasi-real-time lighting computing system based on HDR imaging. *Energy Procedia*. 2017; 122:649-654. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.364
58. Mardaljevic J. Sky model blends for predicting internal illuminance: a comparison founded on the BRE-IDMP dataset. *Journal of Building Performance Simulation*. 2008; 1(3):163-173. DOI: 10.1080/19401490802419836
59. Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O. et al. Energy-Plus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and buildings*. 2001; 33(4):319-331. DOI: 10.1016/S0378-7788(00)00114-6
60. Zhang L. Simulation analysis of built environment based on design builder software. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 580-583:3134-3137. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.3134
61. Bustamante W., Uribe D., Vera S., Molina G. An integrated thermal and lighting simulation tool to support the design process of complex fenestration systems for office buildings. *Applied Energy*. 2017; 198:36-48. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.046
62. Lydon G.P., Hofer J., Svetozarevic B., Nagy Z., Schlueter A. Coupling energy systems with lightweight structures for a net plus energy building. *Applied Energy*. 2017; 189:310-326. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.11.110
63. Gentile N., Dubois M.-C. Field data and simulations to estimate the role of standby energy use of lighting control systems in individual offices. *Energy and Buildings*. 2017; 155:390-403. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.09.028
64. Chen Y., Liang X., Hong T., Luo X. Simulation and visualization of energy-related occupant behavior in office buildings. *Building Simulation*. 2017; 10(6):785-798. DOI: 10.1007/s12273-017-0355-2
65. Khoroshiltseva M., Slanzi D., Poli I. A Pareto-based multi-objective optimization algorithm to design energy-efficient shading devices. *Applied Energy*. 2016; 184:1400-1410. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.05.015
66. Konstantoglou M., Tsangrassoulis A. Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 60:268-283. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.246
67. Hoffmann S., Lee E.S., McNeil A., Fernandes L., Vidanovic D., Thanachareonkit A. Balancing daylight, glare, and energy-efficiency goals: An evaluation of exterior coplanar shading systems using complex fenestration modeling tools. *Energy and Buildings*. 2016; 112:279-298. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.12.009
68. Perez R., Seals R., Michalsky J. All-weather model for sky luminance distribution — Preliminary configuration and validation. *Solar energy*. 1993; 50(3):235-245. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90017-I
69. Kittler R., Darula S. The simultaneous occurrence and relationship of sunlight and skylight under ISO/CIE standard sky types. *Lighting Research & Technology*. 2015; 47(5):565-580. DOI: 10.1177/1477153514538883
70. Kittler R., Darula S. The natural redistribution of sunlight and skylight due to the atmospheric turbidity of cloudless skies. *Leukos*. 2018; 14(2):87-93. DOI: 10.1080/15502724.2017.1391704
71. Nguyen T.K.P., Solovyov A., Pham T.H.H., Dong K.H. Confirmed method for definition of daylight climate for tropical Hanoi. *International Scientific Con-*

ference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. 2018; 982:35-47. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_4

72. Phuong N.T.K., Solovyev A.K., Tamrazyan A.G. Integrated approach to determining sizes of light openings in buildings taking into account safety requirements. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 5:20-25. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.05.20-25 (rus.).

73. Hens S.L.C.H. *Building physics — Heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises*. Wilhelm Ernst & Sohn, 2017; 309. DOI: 10.1002/9783433608548

74. Nasrollahi N., Shokri E. Daylight illuminance in urban environments for visual comfort and energy performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 66:861-874. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.052

75. Wittkopf S.K., Soon L.K. Analysing sky luminance scans and predicting frequent sky patterns in Singapore. *Lighting Research & Technology*. 2007; 39(1):31-51. DOI: 10.1177/1365782806070683

76. Kittler R., Darula S. Determination of time and sun position system. *Solar Energy*. 2013; 93:72-79. DOI: 10.1016/j.solener.2013.03.021

77. Krsić S., Pejić P., Mitković P. Significance of daylight in the design and construction of buildings. *GRAĐEVINAR*. 2013; 65(9):833-840. DOI: 10.14256/JCE.869.2013

78. Solovyov A.K. Luminance distribution over the firmament: Taking it into account when designing natural illumination for building. *Light & Engineering*. 2009; 17(1):59-73.

79. Solovyev A.K. The account of brightness distribution of a clear sky in calculations of natural illumination of buildings. *Academia. Architecture and Construction*. 2010; 3:462-471. (rus.).

80. Zemtsov V.A., Solovyov A.K., Shmarov I.A. Luminance parameters of the standard CIE sky within natural room illumination calculations and their application under various light climate conditions in Russia. *Light & Engineering*. 2017; 25(1):106-114.

81. Phuong N.T.K. Luminance distributions in the tropical sky conditions. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 84(8):192-204. DOI: 10.18720/MCE.84.18

82. Phuong N.T.K., Solovyov A., Hoa N.T. Phương pháp xác định hệ số phân bố không đồng đều độ chói cho bầu trời nhiệt đới Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) — ĐHXD*. 2019; 13(3V):136-147. DOI: 10.31814/stce.nuce2019-13(3V)-15 (vie.).

83. Pham Ngoc Dang. *The thermal regime of the building in the climatic conditions of Vietnam : diss. of Dr. tech. sciences*. Moscow, 1978; 191. (rus.).

84. Pham Ngoc Dang, Bogoslovskiy V.N. Calculation of the total heat input into the room through the window. *Water Supply and Sanitary Technique*. 1973; 1:26-32. (rus.).

85. Ha P.T.H. *Passive architectural solution based on energy efficiency method of sunshading devices for high-rise apartment buildings in Hanoi : Thesis of Ph. D*. Hanoi, National university of Civil Engineering, 2018; 151.

86. Ha P.T.H. Energy efficiency facade design in high-rise apartment buildings using the calculation of solar heat transfer through windows with shading devices. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 143:012055. DOI: 10.1088/1755-1315/143/1/012055

87. Ha P.T.H. A concept for energy-efficient high-rise buildings in hanoi and a calculation method for building energy efficiency factor. *Procedia Engineering*. 2016; 142:154-160. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.02.026

88. Dang P.N., Ha P.H. *Heat and architectural climatics*. Hanoi, Construction Publisher, 2002.

Received July 27, 2019.

Adopted in a revised form on November 5, 2019.

Approved for publication on January 31, 2020.

BIONOTES: **Nguyen Thi Khanh Phuong** — postgraduate student of the Department of Civil and Structural Design; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; agpz@mgsu.ru;

Aleksey K. Solovyev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Civil and Structural Design; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SolovevAK@gic.mgsu.ru.