

Academia. Архитектура и строительство, № 2, стр. 173–181.

Academia. Architecture and Construction, no. 2, pp. 173–181.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 628.921

DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-173-181

Метод расчета естественного освещения в помещении с решеточным смарт-окном

Закируллин Рустам Сабирович (Оренбург). Доктор технических наук, доцент, советник РААСН. Оренбургский государственный университет (Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, 13. ОГУ); Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: rustam.zakirullin@gmail.com

Оденбах Ирина Александровна (Оренбург). Кандидат педагогических наук. Оренбургский государственный университет (Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, 13. ОГУ); Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: 79128486201@yandex.com

Гирин Владимир Александрович (Оренбург). Оренбургский государственный университет (Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, 13. ОГУ); Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: vladimirgirin@gmail.com

Аннотация. Описан метод расчёта естественного освещения в помещениях с решёточными смарт-окнами на основе анизотропной модели диффузной солнечной радиации. Представлены методы расчёта геометрических параметров решёточного оконного фильтра и временных характеристик светопропускания смарт-окна с таким фильтром. Получена новая формула для расчёта горизонтальной освещённости внутри помещения с решёточным смарт-окном для дальнейшего применения при расчётах коэффициента естественной освещённости (КЕО) и других показателей качества естественного освещения. Разработанный метод верифицирован с помощью численного моделирования круглогодичных показателей естественной освещённости в условиях города Оренбурга для хромогенного решеточного смарт-окна, а также, для сравнения, обычного смарт-окна со сплошным хромогенным слоем и обычного окна без каких-либо покрытий. Результаты расчётов показали преимущества решёточного смарт-окна по сравнению с обычным смарт-окном в окрашенном и обесцвеченном состояниях хромогенного материала и перед обычным (реально существующим) окном без покрытия.

Ключевые слова: естественное освещение, солнечная радиация, решёточное смарт-окно, хромогенные материалы, коэффициент светопропускания, коэффициент естественной освещённости

Для цитирования. Закируллин Р.С., Гирин В.А., Оденбах И.А. Метод расчёта естественного освещения в помещении с решёточным смарт-окном // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 2. – С. 173–181. – DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-173-181.

Method for Calculating Daylight in Room with Grating Smart Window

Zakirullin Rustam S. (Orenburg). Doctor of Sciences in Technology, Docent, Adviser of RAACS. Orenburg State University (13, Prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russia. OSU); Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (Russia, 127238, Moscow, Locomotive passage, 21. NIISF RAASN). E-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

Odenbakh Irina A. (Orenburg). Candidate of Sciences in Pedagogy. Orenburg State University (13, Prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russia. OSU); Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (Russia, 127238, Moscow, Locomotive passage, 21. NIISF RAASN). E-mail: 79128486201@yandex.com

Girin Vladimir A. (Orenburg). Orenburg State University (13, pr. Pobedy, Orenburg, 460018. OSU); Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (Russia, 127238, Moscow, Locomotive passage, 21. NIISF RAASN). E-mail: vladimirgirin@gmail.com

Abstract. The method is described for calculating daylight in rooms with grating smart windows based on an anisotropic model of diffuse solar radiation. Methods for calculating the geometric parameters of a grating window filter and the temporal characteristics of the light transmission of a smart window with such a filter are presented. A new formula has been obtained for calculating horizontal illuminance indoors at a grating smart window for further use in calculating the daylight illuminance coefficient and other metrics of the quality of daylighting. The developed method was verified using numerical modeling of year-round daylight metrics in the conditions of Orenburg for a chromogenic grating smart window, as well as, for comparison, a conventional smart window with a continuous chromogenic layer and a conventional window without any coatings. The calculation results showed the advantages of a grating smart window compared to a conventional smart window in the colored and bleached states of chromogenic material and over a conventional (real-life) window without a coating.

Keywords: daylighting, solar radiation, grating smart window, chromogenic materials, light transmittance, daylight illuminance coefficient

For citation. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A., Girin V.A. Method for Calculating Daylight in Room with Grating Smart Window. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2024, no. 2, pp. 173–181, doi: 10.22337/2077-9038-2024-2-173-181.

Все существующие методы расчёта многочисленных количественных и качественных показателей естественного освещения в помещениях сводятся к первоначальному определению значений горизонтальной или вертикальной освещённости в расчётных точках внутри помещения при заданных или принятых для расчёта значениях наружной освещённости. Наружная освещённость непрерывно меняется в течение времени суток и года, а также в зависимости от погодных условий, что обуславливает некоторую сложность расчётов и необходимость введения упрощений в виде усреднённых значений наружной освещённости и яркости неба. В России исследования в области естественного освещения проводятся в НИИСФ РААСН [1; 2]), где разрабатываются соответствующие общероссийские, региональные и отраслевые нормы и стандарты¹. Для естественного освещения помещений установлены нормативные значения коэффициента естественной освещённости (КЕО) в зависимости от системы освещения и назначения помещения, в расчётных точках, расположенных на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и рабочей поверхности. Исследования с целью оптимизации естественного освещения, инсоляции и солнцезащиты проводятся также в НИУ МГСУ [3; 4], МАРХИ [5; 6] и других вузах.

Для расчёта значений наружной освещённости используются круглогодичные данные о прямой и рассеянной солнечной радиа-

ции в районе строительства, полученные по результатам многолетних наблюдений и приводимые в справочниках или в виде файла ТМУ (Typical Meteorological Year – типичный метеорологический год). Распределение яркости неба зависит от времени года, светового климата с отнесением к условным стандартным типам неба [7] и т.п. При расчётах используются многочисленные компьютерные программы для моделирования солнечной радиации, падающей на фасады и крыши проектируемого здания с учётом геометрии затенения [8–10], для управления освещением и жалюзи с учетом требований каждого пользователя и энергетической нагрузки на отопление, охлаждение и освещение [11–13].

Моделирование естественного освещения помещения на основе компьютерных программ может быть выполнено как для обычных окон с применением или без применения жалюзи и других устройств регулирования, так и для обычных смарт-окон, покрытых одним слоем активного (в основном хромогенного) материала [14–16]. Однако для смарт-окна нового типа, имеющего решётчатый оптический фильтр с угловым селективным светопропусканием, соответствующие функции в этих программах отсутствуют. Разновидности решётчатых смарт-окон и методы расчёта их параметров и характеристик светопропускания представлены авторами в [17–20], возможности сезонного регулирования и распределения светопропускания по высоте окна описаны авторами в патентах².

¹ СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» (актуализированная редакция СНиП 23-05-95*). – Москва : Минстрой России, 2016. – 106 с. (<https://docs.cntd.ru/document/456054197>); СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». – Москва, 2021 (<https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=656010>); ГОСТ Р 54944-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения освещённости». – Москва, 2013 (<https://docs.cntd.ru/document/1200094861>); ГОСТ Р 54945-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения коэффициента пульсации освещённости». – Москва, 2012 (<https://docs.cntd.ru/document/1200095043>).

² Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Способ сезонной калибровки светопропускания смарт-окна с двухрешётчатым оптическим фильтром : патент РФ № 2759758; опубликован 17.11.21, бюл. № 32; Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Способ сезонной калибровки светопропускания смарт-окна с решётчатым оптическим фильтром : патент РФ № 2786359; опубликован 20.12.22, бюл. № 35; Закируллин Р.С., Оденбах И.А., Гирин В.А., Пикалова Е.В. Двухрешётчатое смарт-окно с переменной шириной полос решётки : патент РФ № 2804540; опубликован 02.10.2023, бюл. № 28.

В статье описана разработка метода расчёта горизонтальной освещённости в расчётных точках внутри помещения с решёточным смарт-окном на основе ранее полученных результатов [17–20], верификация полученного метода с помощью численного моделирования для 15-го числа каждого месяца для реального помещения и сравнение значений КЕО для реального окна с тройным остеклением без поверхностных покрытий и для этого же окна с решёточными и сплошными покрытиями из хромогенного материала.

Устройство двухрешёточного оптического фильтра для смарт-окон с параллельными непропускающими (в основном хромогенными) полосами, между которыми находятся направленно пропускающие полосы, и методы его расчёта описаны в [17–20]. Угол наклона решёток γ для адаптации к траектории движения солнца относительно окна рассчитывается [19] путём построения «следа» траектории на поверхности окна для выбранного дня года с максимальными требованиями к солнцезащите с расчётом горизонтальных и вертикальных координат $x = \tan \alpha$ и $y = \tan h$, где h – высота стояния солнца, α – азимут солнца, измеренный от перпендикуляра к окну (разность между азимутами солнца A и окна A_w в данный момент времени, то есть $\alpha = A - A_w$). Далее проводится линейная аппроксимация этой траектории в выбранном интервале времени, угол между линией аппроксимации и горизонталью является оптимальным углом наклона решёток.

Решёточный фильтр обеспечивает минимум светопропускания окна в заданное время – при угле падения, когда его проекция совпадает с характеристическим углом Θ_c , показывающим сдвиг двух решёток фильтра друг относительно друга. Для вертикального окна угол падения солнечного луча рассчитывается по частному случаю первой теоремы косинусов для трёхгранного угла, когда двугранный угол перед расчётным плоским углом равен 90° :

$$\Theta = \arccos(\cosh \cos \alpha). \quad (1)$$

После преобразований из [19] для расчёта проекции θ угла падения Θ на плоскость, ортогональную полосам решёток, для окна с тройным остеклением получаем:

$$\theta = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{\sin^2 \alpha + \tan^2 h}}{\cos \alpha} \cos \left[\gamma + \arctan \left(-\frac{\sin \alpha}{\tan h} \right) \right] \right\}. \quad (2)$$

Ширины полос входной (пропускающие – c_1 , и непропускающие – c_2) и выходной (пропускающие – c_3 , и непропускающие – c_4) решёток для окна с тройным остеклением при расстоянии s между решетками рассчитываются [17–19] по формулам:

$$\begin{aligned} c_3 &= 2s \tan \Theta_c - 2s \tan \Theta_{av}; \\ c_4 &= c_3 (1 - \tau_{max}) / \tau_{max}; \\ c_2 &= c_3 - \tau_{min} (c_3 + c_4); \\ c_1 &= c_3 + c_4 - c_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где Θ_{av} – задаваемый средний угол падения, при котором теоретический коэффициент светопропускания фильтра должен иметь среднее значение $\tau_{av} = 0,5(\tau_{min} + \tau_{max})$; τ_{min} и τ_{max} – задаваемые минимальный и максимальный теоретические значения коэффициента светопропускания.

Теоретическая временная характеристика светопропускания решёточного смарт-окна имеет диапазоны постоянного максимального и минимального, а также переменного (возрастающего или убывающего) коэффициентов пропускания, рассчитываемые [19] по формулам:

$$\begin{aligned} \tau_{min} &= [c_1 + c_2 \tau_{chr1} - c_4 (1 - \tau_{chr2})] / (c_1 + c_2); \\ \tau_{max} &= (c_3 + c_4 \tau_{chr2}) / (c_1 + c_2); \\ \tau &= [|\Delta| - 0,5c_2 + 0,5c_3 + \tau_{chr2} (c_1 + 1,5c_2 - 0,5c_3 - |\Delta|)] / (c_1 + c_2), \end{aligned} \quad (4)$$

где τ_{chr1} и τ_{chr2} – коэффициенты направленного пропускания непропускающих полос входной и выходной решёток в их окрашенном или обесцвеченном состояниях (при применении нехромогенных технологий $\tau_{chr1} = 0$ и $\tau_{chr2} = 0$); Δ – сдвиг между следами пропускающей полосы входной решётки на поверхности выходной решётки при характеристическом угле фильтра и произвольном угле падения, рассчитываемый [19] по формуле:

$$\Delta = s (\tan \Theta_c - \tan \theta). \quad (5)$$

Для окна с тройным остеклением значения скорректированного с учётом отражения по формулам Френеля и поглощения по закону Бугера-Ламберта коэффициента светопропускания τ_{cor} рассчитываются [19] как:

$$\tau_{cor} = \tau \left\{ 1 - 0,5 \left[\frac{\sin^2 (\Theta - \Theta_n)}{\sin^2 (\Theta + \Theta_n)} + \frac{\tan^2 (\Theta - \Theta_n)}{\tan^2 (\Theta + \Theta_n)} \right] \right\}^6 \exp \left(-\frac{\alpha_a n s_\Sigma}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}} \right). \quad (6)$$

где τ – теоретический коэффициент пропускания по формулам (4); Θ_n – угол преломления; α_a – натуральный коэффициент поглощения стекла, мм^{-1} ; n – показатель преломления стекла; s_Σ – общая толщина всех стекол, мм .

Для расчёта коэффициента диффузного пропускания τ_d при нормальном падении солнечных лучей ($\Theta = 0^\circ$, $\sin \Theta = 0$) с учётом соотношения ширины полос обеих решёток на основе формулы (6) получаем после коррекции из [19]:

$$\tau_d = \left(\frac{c_1 + c_2 \tau_{chr1}}{c_1 + c_2} \right) \left(\frac{c_3 + c_4 \tau_{chr2}}{c_3 + c_4} \right) \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right]^6 \exp(-\alpha_a s_\Sigma). \quad (7)$$

В отличие от [17; 19], где освещённость в расчётных точках помещения с решёточным окном рассчитывалась по изотропной модели рассеянной радиации, применяем анизотропную модель для ясного неба по [21]. Для расчёта горизонтальной освещённости в расчётной точке 1 помещения (рис. 1) получаем формулу:

$$\begin{aligned} E_h &= \left(E_{DNI} \tau_{cor} \sin h + \frac{\tau_d \omega}{2\pi 180^\circ} \left\{ 0,339 E_{DNI} \varepsilon_s [1 + \cos^2 \Theta \sin^3 (90^\circ - h)] + 0,25 E_{DNI} \rho_b \varepsilon_b \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 0,25 E_{GHI} \rho_g \left[1 + \sin^2 \left(\frac{90^\circ - h}{2} \right) \cos \alpha \right] \right\} \right) \left[1 + \frac{\tau_d F_w k_w (CR_t + 5R_c)}{F(1-R)} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

где E_{DNI} – освещённость от прямой солнечной радиации на нормальной к лучу поверхности, лк; E_{DHI} – освещённость от рассеянной солнечной радиации на горизонтальной поверхности, лк; E_{GNI} – освещённость от суммарной радиации на горизонтальной поверхности, лк; ω – телесный угол обзора через окно из расчётной точки, ср; 2π – половина полного телесного угла с вершиной в центре O окна на наружной поверхности стены; 180° – полный двухгранный угол с горизонтальным ребром, проходящим через центр окна O ; ε_s , ε_b и ε_g – части полного двухгранного угла, охватывающие небо, противостоящее здание и участок земли до противостоящего здания, градус; ρ_b – альbedo фасада противостоящего здания; ρ – альbedo поверхности земли; τ_d – коэффициент пропускания рассеянной радиации; F_w – площадь окна, м²; k_w – коэффициент, учитывающий конструктивные потери пропускания окна; F – общая площадь поверхностей помещения, м²; C – коэффициент неба для окна; R_f и R_c – средние коэффициенты отражения поверхностей ниже и выше горизонтальной плоскости, проходящей через центр окна; R – средневзвешенный коэффициент отражения поверхностей помещения.

Первое слагаемое суммы в первом сомножителе формулы (8) – часть горизонтальной освещённости, создаваемая прямым солнечным светом с учётом коэффициента пропускания прямого света и угла падения, учитывается только при реальном попадании в расчётную точку прошедших через окно прямых солнечных лучей. Второе слагаемое – часть горизонтальной освещённости, создаваемая в расчётной точке проходящим через окно рассеянным светом неба и светом, отражённым от фасада противостоящего здания и поверхности земли, с учётом коэффициента пропускания рассеянного света и телесного угла обзора неба из расчётной точки. Компоненты рассеянного света неба и отражённого от земли света получены по анизотропной модели рассеянной радиации для ясного неба [21] (при $|\alpha| > 90^\circ$ и $\Theta > 90^\circ$ сомножители, увеличивающие эти компоненты, не учитываются), а отражённого от противостоящего здания – по изотропной модели рассеянной радиации.

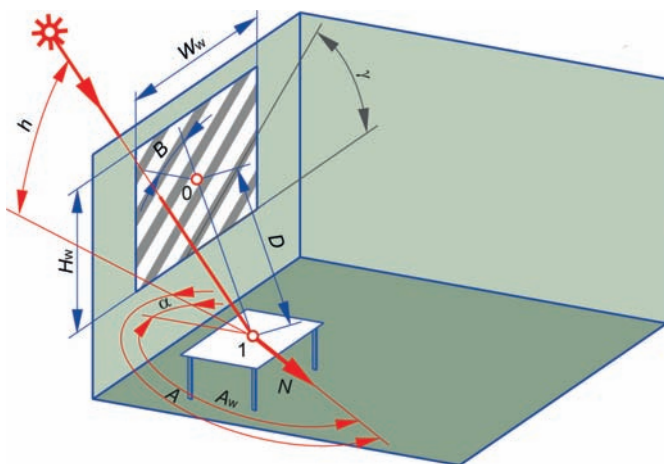


Рис. 1. Расчетная схема помещения с решеточным смарт-окном. Рисунок авторов статьи

В формуле (8) расположение расчётной точки в помещении учитывается по отношению $\omega/2\pi$ телесного угла обзора из этой точки к половине полного телесного угла с вершиной в центре O окна на наружной поверхности стены. Распределение трёх частей рассеянного света, попадающего на наружную поверхность вертикального окна, принимается по отношениям $\varepsilon_s/180^\circ$, $\varepsilon_b/180^\circ$ и $\varepsilon_g/180^\circ$, то есть по долям полного двухгранного угла 180° с горизонтальным ребром, проходящим через центр окна O , с гранями, охватывающими небо, противостоящее здание и участок земли между расчётным и противостоящим зданиями. При этом, если противостоящих зданий несколько и они расположены на разных расстояниях, имеют разные высоты и расположены непараллельно расчётному фасаду, берётся усреднённая горизонтальная линия с учётом перечисленных факторов, через которую условно проходит грань раздела двухгранных углов, охватывающих небо и группу противостоящих зданий. Значение альbedo фасадов противостоящих зданий также берётся усредненное.

Телесный угол ω аппроксимируем следующим образом:

$$\omega = W_w H_w \cos B / D^2, \tag{9}$$

где W_w – ширина окна (см. рис. 1); H_w – высота окна; D – расстояние между расчётной точкой и центром окна; B – угол между нормалью к окну и линией от расчётной точки до центра окна.

Второй сомножитель в формуле (8) учитывает усреднённое для центральной точки помещения значение внутренне отражённой составляющей дневной освещённости по [20] на основе размеров и формы помещения, размеров и расположения окон, коэффициентов отражения потолка, стен и пола. Коэффициент неба для окна определяется в зависимости от угла экранирования между горизонталью, проходящей через центр окна, и линией крыши противоположного здания [22].

Значения КЕО (%) в любой момент времени с подстановкой соответствующих значений высоты стояния и азимута солнца, трёх видов наружной освещённости от солнечной радиации и коэффициентов светопропускания для этого конкретного времени, а также с учётом телесного угла для данной расчётной точки и максимальных и минимальных азимутальных (A_{max} и A_{min}) и высотных (h_{max} и h_{min}) углов прохождения прямых лучей в эту точку (рис. 2) рассчитываем по формуле:

$$КЕО = 100 E_b / E_{GNI}. \tag{10}$$

Численное моделирование проведено по формулам (1)–(10) для условий города Оренбурга (ул. Ростошинская, 22, широта $N 51,793^\circ$, долгота $E 55,233^\circ$, GMT +05:00) для юго-восточного фасада здания с азимутом 115° . В качестве расчётного дня выбрано 15 июня как середина месяца с наибольшей интенсивностью солнечной радиации в Оренбурге. Азимут и высота стояния солнца определялись (<https://www.suncalc>).

огр/ч) через каждый час относительно местного времени 10 ч. 30 мин., когда азимуты солнца и окна равны, для 15 июня 2024 г., а также для рабочего времени с 9:00 до 17:00 для 15-го числа каждого месяца. Оптимальный угол наклона $\gamma = -40^\circ$ получен путём аппроксимации траектории солнца относительно окна с 6:30 до 12:30 для 15 июня, когда прямые солнечные лучи попадают в расчётное помещение под углами падения на окно менее 70° .

На рисунке 2 изображены разрез и план прямоугольного расчётного помещения с размерами $5,47 \times 3,66 \times 2,83$ м. Общая площадь поверхностей помещения (за исключением наружной стены) $F = 81,36 \text{ м}^2$. При коэффициентах отражения потолка, стен и пола – 0,7 (белый), пола – 0,3 (серо-зелёный тёмный), стены – 0,6 (серо-зелёный светлый) средневзвешенный коэффициент отражения поверхностей помещения составляет $R = 0,55$. Средневзвешенные коэффициенты отражения поверхностей выше и ниже горизонтали через центр окна (точка 0) составляют $R_c = 0,65$ и $R_f = 0,47$. Расчётная плоскость расположена на высоте 0,8 м от пола и содержит 12 расчётных точек, расположенных через каждые 1,5 м симметрично относительно центра помещения.

Расчётное окно прямоугольной формы с тройным остеклением (см. рис. 2) по конфигурации 4M1/10/4M1/16/4M1 с общей толщиной остекления 38 мм, шириной 1,44 и высотой 2,29 м, расположено на расстояниях от пола 0,14 м, от потолка 0,4 м, от стен справа 1,07 м и слева 1,15 м. Толщина наружной стены 0,558 м, расстояния от её внутренней и наружной поверхностей до остекления 0,37 и 0,15 м. Оптические и геометрические параметры составляют: $n = 1,5$; $\alpha_a = 0,007 \text{ мм}^{-1}$; $s_\Sigma = 12 \text{ мм}$; $F_w = 3,3 \text{ м}^2$; $k_w = 0,9$; $C = 37$ (определён по [22] при угле препятствий 5° от горизонтали через центр окна по средней высоте крыш противостоящих зданий); $\varepsilon_s = 85^\circ$; $\varepsilon_b =$

35° ; $\varepsilon_g = 60^\circ$; $\rho_b = 0,5$; $\rho = 0,6$ (месяцы со снежным покровом ноябрь-март) и $\rho = 0,1$ (апрель-октябрь).

Характеристический угол по формуле (2) для минимизации светопропускания окна в 10:30, когда азимуты солнца и окна совпадают, равен $\Theta_c = 39,384^\circ$. Для дальнейших расчетов примем $\Theta_c = 40^\circ$. Решётки фильтра располагаются на внутренних поверхностях внутренней камеры двухкамерного стеклопакета с шириной 16 мм. Численное моделирование по уравнениям (3) проводилось так, чтобы получить ширины полос $c_1 = 15 \text{ мм}$, $c_2 = 5 \text{ мм}$, $c_3 = 14 \text{ мм}$ и $c_4 = 6 \text{ мм}$, которые являются одним из оптимальных вариантов для регулирования светопропускания в окнах с расстоянием между решётками 16 мм [17; 19]. Для этого были заданы значения минимального и максимального теоретических коэффициентов пропускания $\tau_{\min} = 0,45$ и $\tau_{\max} = 0,7$ и среднего угла падения $\Theta_{\text{ав}} = 21,8804^\circ$.

Для обеих решёток хромогенного смарт-окна выбрано фотохромное устройство с напылёнными слоями $\text{WO}_3/\text{Pt}/\text{TiO}_2$ и с I-/I3- в качестве электролита. Коэффициент пропускания в видимом диапазоне для этого материала составляет 0,3 в окрашенном и 0,74 в обесцвеченном состояниях [23]. При расчёте предполагалось, что материал переходит в окрашенное состояние с мая по сентябрь. Для сравнения также рассчитаны характеристики пропускания обычного хромогенного окна, полностью покрытого этим же материалом, и окна без каких-либо покрытий.

Временные характеристики теоретического пропускания окна с хромогенными решётками в окрашенном и обесцвеченном состояниях рассчитаны по формулам (4). Теоретический коэффициент пропускания обычного хромогенного окна принят 0,3 в окрашенном и 0,74 в обесцвеченном состояниях, а для реального окна без покрытий принят равным 1. Все временные характеристики теоретического коэффициента пропускания скорректированы по формуле (6). В таблице 1 приведены расчётные параметры по формулам (1), (2), (4), (5) и (6) для 15 июня (с 15:00 до 17:00 прямые лучи не попадают в помещение – углы падения превышают 90°). Значения сдвига Δ скорректированы путём вычитания или прибавления целого числа периода решётки 20 мм в тех случаях, когда они превышают половину периода, то есть 10 мм, согласно теории решётчатых фильтров [19]. Аналогичные расчёты проведены для 15 числа каждого месяца.

Коэффициенты диффузного пропускания солнечного света τ_d для различных типов окон, рассчитанные по формуле (7), и значения множителя для формулы (8) представлены в табл. 2.

Горизонтальная освещённость E_h в расчётных точках 1–12 (рис. 2) рассчитана по формуле (8) для решётчатого и обычного хромогенных окон и окна без покрытия. Для каждой точки были определены (табл. 3) расстояние D и угол В для расчета телесного угла ω по формуле (9). Минимальные (A_{\min} и h_{\min}) и максимальные (A_{\max} и h_{\max}) значения азимутов и высот стояния солнца показывают угловые диапазоны проникновения прямых солнечных лучей в помещение. На рис.

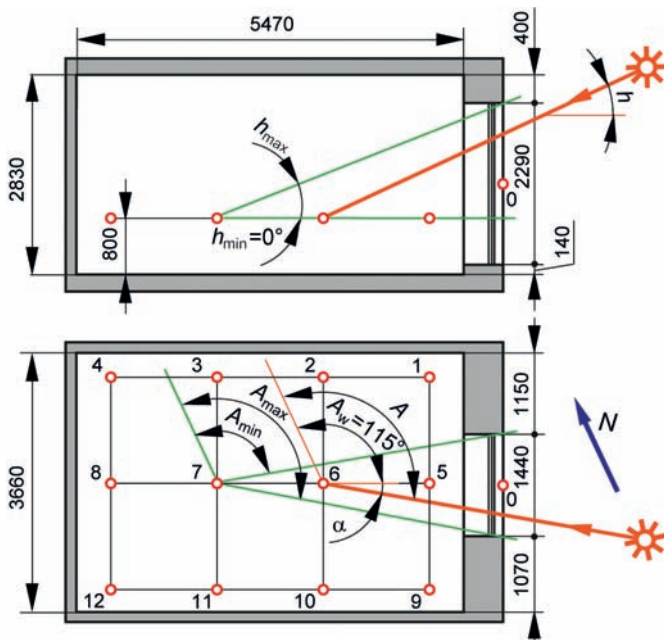


Рис. 2. Разрез и план расчётного помещения. Схема авторов статьи

Таблица 1. Расчетные параметры для 15 июня: 1 – фильтр с поглощающими полосами; 2 и 3 – фильтр с хромогенными полосами в осветлённом и окрашенном состоянии; 4 и 5 – хромогенное окно в осветлённом и окрашенном состоянии; 6 – обычное окно без покрытий

Время	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	
A, град.	94,03	107,17	123,17	170,12	143,84	198,57	223,21	242,23	257,16	
h, град.	33,37	42,46	50,84	57,57	61,23	60,52	55,73	48,36	39,69	
α, град.	-20,97	-7,83	8,17	28,84	55,12	83,57	108,21	127,23	142,16	
Θ, град.	38,76	43,04	51,31	61,98	74,02	86,84	100,13	113,70	127,42	
θ, град.	38,19	38,52	40,63	45,64	56,62	81,11	-	-	-	
Δ, мм	0,839	0,690	-0,302	-2,934	-10,856	-88,918	-	-	-	
Δ _{сог} , мм	0,839	0,690	-0,302	-2,934	9,144	8,918	-	-	-	
1	τ	0,45	0,45	0,45	0,45	0,68	0,67	0	0	0
	τ _{сог}	0,31	0,30	0,28	0,22	0,12	0,00	0	0	0
2	τ	0,81	0,81	0,80	0,84	0,92	0,91	0	0	0
	τ _{сог}	0,56	0,55	0,50	0,40	0,17	0,00	0	0	0
3	τ	0,49	0,48	0,47	0,56	0,78	0,77	0	0	0
	τ _{сог}	0,34	0,33	0,29	0,27	0,14	0,00	0	0	0
4, τ _{сог}	0,51	0,50	0,46	0,35	0,13	0,00	0	0	0	
5, τ _{сог}	0,21	0,20	0,19	0,14	0,05	0,00	0	0	0	
6, τ _{сог}	0,69	0,68	0,62	0,48	0,18	0,00	0	0	0	
E _{DNI} , лк	47040	57960	65640	67080	66000	65760	65040	63480	60600	
E _{DNI} , лк	14400	18840	22200	25560	28200	30240	30360	29280	26880	
E _{DNI} , лк	32640	49560	65400	76800	83280	87600	87000	82080	72720	

Таблица 2. Коэффициенты диффузного пропускания

Тип окна	τ _d	Значение множителя в формуле (8)
Обычное без покрытий	0,720	2,205
Хромогенное решеточное в осветленном состоянии	0,621	2,040
Хромогенное решеточное в окрашенном состоянии	0,469	1,785
С поглощающими решетками	0,378	-
Обычное хромогенное в осветленном состоянии	0,533	1,892
Обычное хромогенное в окрашенном состоянии	0,216	1,362

Таблица 3. Расчет КЕО: 1 – фильтр с хромогенными полосами; 2 – хромогенное окно; 3 – обычное окно без покрытий

Точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
D, м	1,906	3,008	4,343	5,768	1,144	2,585	4,065	5,558	1,853	2,966	4,320	5,746	
B, град.	57,05	32,49	21,61	16,30	24,85	10,72	6,79	4,96	55,98	31,19	20,86	15,54	
ω, ср	0,494	0,308	0,163	0,095	2,288	0,485	0,198	0,106	0,537	0,321	0,165	0,096	
A _{min} , град.	175,08	137,15	128,03	124,01	80,5	99,62	105,07	107,76	50,86	73,39	86,43	93,55	
A _{max} , град.	180,67	156,79	144,39	137,05	150,67	131,61	125,89	122,86	58,63	95,22	102,83	106,27	
h _{min} , град.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
h _{max} , град.	39,01	30,57	21,33	16,09	57,33	32,52	21,85	16,30	40,04	30,89	21,41	16,02	
КЕО>0,5, %	1	94,44	55,56	37,96	1,85	94,44	94,44	39,81	2,78	94,44	56,48	37,04	0,00
	2	52,78	52,78	20,37	1,85	94,44	55,56	37,96	1,85	52,78	52,78	22,22	0,00
	3	94,44	94,44	38,89	1,85	94,44	94,44	47,22	3,70	94,44	94,44	39,81	0,93
КЕО>1,0, %	1	52,78	34,26	2,78	1,85	94,44	54,63	4,63	1,85	53,70	36,11	0,00	0,00
	2	41,67	10,19	2,78	1,85	94,44	42,59	3,70	1,85	45,37	16,67	0,00	0,00
	3	65,74	37,96	2,78	1,85	94,44	64,81	4,63	1,85	79,63	37,96	0,00	0,00

2 показаны проекции углов h_{\min} и h_{\max} , для расчетов взяты их истинные значения. Значения КЕО для различных типов окон, рассчитанные по формуле (10) для 15 числа каждого месяца для каждого часа в течение рабочего времени с 9:00 до 17:00, в табл. 3 представлены в процентах годового рабочего времени в градациях, превышающих 0,5 и 1,0. Эти значения являются нормативными для жилых и офисных помещений для широты расчетной местности.

Сравнение значений КЕО для трёх типов окон показывает, что решётчатое хромогенное окно значительно меньше ухудшает проценты годового рабочего времени с удовлетворением требований по сравнению с реальным окном без поверхностных покрытий, чем обычное хромогенное окно со сплошным покрытием, для обоих нормативных значений КЕО, принятых для рассмотрения. Исключения составляют наиболее удалённые от окна расчётные точки 4, 8 и 12, в которых показатели практически одинаковые и низкие для всех типов окон, а также наиболее близкая к окну точка 5, в которой проценты одинаково высокие. Следует иметь в виду, что смарт-окна применяются для снижения освещённости в помещении в месяцы с наиболее интенсивной солнечной радиацией – с мая по сентябрь. Средняя освещённость в наиболее опасной точке 5 в рабочее время за эти месяцы составляет 22194, 12463 и 6658 лк для окна без покрытий, решётчатого и обычного хромогенных окон, соответственно. Средняя освещённость в точке 5 в рабочее время за 15 июня для этих окон составляет 21800, 10951 и 6540 лк. Для времени 10:30 15 июня, для которого приняты параметры решётчатого смарт-окна, освещённость в точке 5 для этих окон составляет 66995, 32266 и 20098 лк. Как видно, обычное хромогенное окно сильнее снижает освещённость по сравнению с решётчатым, однако его недостатком является блокирование не только прямого, но и рассеянного солнечного излучения, что снижает комфортность освещения.

Таким образом, разработанный метод расчёта горизонтальной освещённости в расчётных точках внутри помещения с решётчатым смарт-окном апробирован с помощью численного моделирования для 15-го числа каждого месяца для реального помещения в условиях г. Оренбурга для одного выбранного материала для обеих решёток фильтра. Выявлены некоторые преимущества решётчатого смарт-окна по сравнению с обычным смарт-окном и окном без покрытий. В дальнейшем планируется провести круглогодичные экспериментальные исследования в реальных условиях для этого же помещения для подтверждения результатов численного моделирования.

Список источников

1. Коркина, Е.В. Исследования времени наступления критической освещённости для оценки длительности дневного естественного освещения / Е.В. Коркина, И.А. Шмаров, Е.В. Войтович. – Текст : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 6. – С. 35–42.
2. Шмаров, И.А. Влияние светопропускания энергосберегающих оконных блоков на соблюдение гигиенических требований / И.А. Шмаров, В.А. Земцов, В.Г. Гагарин, Е.В. Коркина. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 4. – С. 176–181.
3. Соловьёв, А.К. Естественное освещение подземных пространств / А.К. Соловьёв. – Текст : непосредственный // Светотехника. – 2018. – № 2. – С. 70–74.
4. Соловьёв, А.К. Современные подходы к нормированию естественного освещения жилых зданий. Результаты исследований / А.К. Соловьёв. – Текст : непосредственный // Светотехника. – 2020. – № 4. – С. 5–10.
5. Архитектурная физика / Под редакцией профессора Н.В. Оболенского. – Москва : Архитектура-С, 2007. – 448 с. – Текст : непосредственный.
6. Щепетков, Н.И. Физика света в архитектуре будущего / Н.И. Щепетков. – Текст : электронный // Architecture and Modern Information Technologies (AMIT) [Архитектура и современные информационные технологии (AMIT)]. – 2021. – № 1 (54). – С. 248–261. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2021/1kvart21/PDF/16_shchepetkov.pdf (дата обращения 16.04.2024).
7. Kittler, R. Redistributions of Luminance Patterns on Standard Sky Types / R. Kittler, S. Darula. – Текст : непосредственный // Lighting Research & Technology. – 2022. – Vol. 54 (1). – P. 61–73.
8. Vermeulen, T. Urban Layout Optimization Framework to Maximize Direct Solar Irradiation / T. Vermeulen, C. Knopflenoir, P. Villon, B. Beckers. – Текст : непосредственный // Computers, Environment and Urban Systems. – 2015. – Vol. 51. – P. 1–12.
9. Bognár, Á. Calculating Solar Irradiance without Shading Geometry: a Point Cloud-Based Method / Á. Bognár, R.C.G.M. Loonen, J.L.M. Hensen. – Текст : непосредственный // Journal of Building Performance Simulation. – 2021. – Vol. 14. – P. 480–502.
10. Vartholomaios, A. A Machine Learning Approach to Modelling Solar Irradiation of Urban and Terrain 3D Models / A. Vartholomaios. – Текст : непосредственный // Computers, Environment and Urban Systems. – 2019. – Vol. 78. – 101387.
11. Daum, D. Assessing the Total Energy Impact of Manual and Optimized Blind Control in Combination with Different Lighting Schedules in a Building Simulation Environment / D. Daum, N. Morel. – Текст : непосредственный // Journal of Building Performance Simulation. – 2010. – Vol. 3 (1). – P. 1–16.
12. Katsanou, V.N. An ANN-Based Model for the Prediction of Internal Lighting Conditions and User Actions in Non-Residential Buildings / V.N. Katsanou, M.C. Alexiadis, D.P. Labridis. – Текст : непосредственный // Journal of Building Performance Simulation. – 2019. – Vol. 12 (5). – P. 700–718.
13. Jones, N.L. Effects of Real-Time Simulation Feedback on Design for Visual Comfort / N.L. Jones, C.F. Reinhart. – Текст

: непосредственный // *Journal of Building Performance Simulation*. – 2019. – Vol. 12 (3). – P. 343–361.

14. Rezaei, S.D. A Review of Conventional, Advanced, and Smart Glazing Technologies and Materials for Improving Indoor Environment / S.D. Rezaei, S. Shannigrahi, S. Ramakrishna. – Текст : непосредственный // *Sol. Energ. Mater. Sol. C.* – 2017. – Vol. 159. – P. 26–51.

15. Asdrubali, F. Handbook of Energy Efficiency in Buildings / F. Asdrubali, U. Desideri ; 1-е издание. – Butterworth-Heinemann, 2018. – 858 p. – Текст : непосредственный.

16. Casini, M. Active Dynamic Windows for Buildings : A review / M. Casini. – Текст : непосредственный // *Renew. Energ.* – 2018. – Vol. 119. – P. 923–934.

17. Zakirullin, R.S. Typology of Buildings with Grating Smart Windows with Azimuthally Optimized Light Transmission / R.S. Zakirullin. – Текст : непосредственный // *Journal of Architectural Engineering*. – 2022. – Vol. 28. – 04022030.

18. Zakirullin, R.S. Smart Window with Grating Optical Filter: Comparison with Smart Windows Fully Coated with Chromogenic Layer / R.S. Zakirullin. – Текст : непосредственный // *Building and Environment*. – 2022. – Vol. 219. – 109258.

19. Zakirullin, R.S. Simulating Annual Autoregulation of Daylight by Grating Smart Window with Angular-Selective Transmission / R.S. Zakirullin, I.A. Odenbakh. – Текст : непосредственный // *Journal of Building Performance Simulation*. – 2023. – Vol. 17(2): 253–273.

20. Моделирование притока тепла от солнечной радиации через решётчатые смарт-окна / Р.С. Закируллин, И.А. Оденбах, Н.М. Гулько [и др.]. – Текст : непосредственный // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2023. – № 3. – С. 132–139.

21. Temps, R.C. Solar Radiation Incident upon Slopes of Different Orientations / R.C. Temps, K.L. Coulson. – Текст : непосредственный // *Solar Energy*. – 1977. – Vol. 19, Iss. 2 – P. 179–184.

22. Hopkinson, R.G. An Empirical Formula for the Computation of Daylight Factor / R.G. Hopkinson, J. Longmore, P. Petherbridge. – Текст : непосредственный // *Transactions of the Illuminating Engineering Society*. – 1954. – Vol. 19. – P. 201–219.

23. Bogati, S. Development of Photochromic Device with magnetron Sputtered Titanium Dioxide and Tungsten Trioxide Films / S. Bogati, R. Basnet, W. Graf A. Georg. – Текст : непосредственный // *Sol. Energ. Mater. Sol. C.* – 2017. – Vol. 166. – P. 204–211.

References

1. Korkina E.V., Shmarov I.A., Voitovich E.V. Izucheniye vremeni nastupleniya kriticheskoi osveshchennosti dlya otsenki prodolzhitel'nosti svetovogo dnya yestestvennogo osveshcheniya [Research of Time of Critical Illumination to Assess the Duration of Daytime Illumination]. In: *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. V.G. Shukhov.* [Bulletin OF BSTU Named after V.G. Shukhov], 2022. Issue 6, pp. 35–42. (In Russ., abstr. in Engl.)

2. Shmarov I.A., Zemtsov V.A., Gagarin V.G., Korkina E.V. Vliyaniye svetopropuskaniya energosberegayushchikh okonnykh blokov na soblyudeniye gigiyenicheskikh trebovaniy [The Influence of Light Transmission Rate Energy Saving Window Units for Compliance with Hygienic Requirements]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2016. Iss. 4, pp. 176–181. (In Russ., abstr. in Engl.)

3. Solov'yov A.K. Estestvennoe osveshchenie podzemnykh prostranstv [Daylight in Underground Spaces]. In: *Svetotekhnika*, 2018, Iss. 2, pp. 70–74. (In Russ.)

4. Solov'yov A.K. Sovremennyye podkhody k normirovaniyu yestestvennogo osveshcheniya zhilykh zdaniy. Rezul'taty issledovaniy [Modern Approaches to the Regulation of Natural Lighting in Residential Buildings. Research Results]. In: *Svetotekhnika*, 2020, Iss. 4, pp. 5–10. (In Russ.)

5. Obolenskii N.V. (ed.). Arkhitekturnaya fizika [Architectural Physics]. Moscow, Architecture-S Publ., 2007, 448 p. (In Russ.)

6. Shchepetkov N.I. Fizika sveta v arkhitekture budushchego [Physics of Light in the Architecture of the Future]. In: *Architecture and Modern Information Technologies (AMIT)*, 2021, Iss. 1, pp. 248–261. URL: https://marhi.ru/AMIT/2021/1kvart21/PDF/16_shchepetkov.pdf (Accessed 04/16/2024). (In Russ., abstr. in Engl.)

7. Kittler R., Darula S. Redistributions of Luminance Patterns on Standard Sky Types. In: *Lighting Research & Technology*, 2022, Vol. 54 (1), pp. 61–73. (In Engl.)

8. Vermeulen T., Knopf-Lenoir C., Villon P., Beckers B. Urban Layout Optimization Framework to Maximize Direct Solar Irradiation. In: *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, Vol. 51, pp. 1–12. (In Engl.)

9. Bognár Á., Loonen R.C.G.M., Hensen J.L.M. Calculating Solar Irradiance without Shading Geometry: a Point Cloud-Based Method. In: *Journal of Building Performance Simulation*, 2021, Vol. 14, pp. 480–502. (In Engl.)

10. Vartholomaïos A. A Machine Learning Approach to Modelling Solar Irradiation of Urban and Terrain 3D Models. In: *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, Vol. 78, 101387. (In Engl.)

11. Daum D., Morel N. Assessing the Total Energy Impact of Manual and Optimized Blind Control in Combination with Different Lighting Schedules in a Building Simulation Environment. In: *Journal of Building Performance Simulation*, 2010, Vol. 3(1), pp. 1–16. (In Engl.)

12. Katsanou V.N., Alexiadis M.C., Labridis D.P. An ANN-Based Model for the Prediction of Internal Lighting Conditions and User Actions in Non-Residential Buildings. In: *Journal of Building Performance Simulation*, 2019, Vol. 12(5), pp. 700–718. (In Engl.)

13. Jones N.L., Reinhart C.F. Effects of Real-Time Simulation Feedback on Design for Visual Comfort. In: *Journal of Building Performance Simulation*, 2019, Vol. 12(3), pp. 343–361. (In Engl.)

14. Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S. A Review of Conventional, Advanced, and Smart Glazing Technologies and

- Materials for Improving Indoor Environment. In: *Sol. Energ. Mater. Sol. C*, 2017, Vol. 159, pp. 26–51. (In Engl.)
15. Desideri U., Asdrubali F. Handbook of Energy Efficiency in Buildings, 1st edition. Butterworth-Heinemann, 2018, 858 p. (In Engl.)
16. Casini M. Active Dynamic Windows for Buildings: A Review. In: *Renew. Energ.*, 2018, Vol. 119, pp. 923–934. (In Engl.)
17. Zakirullin R.S. Typology of Buildings with Grating Smart Windows with Azimuthally Optimized Light Transmission. In: *Journal of Architectural Engineering*, 2022, Vol. 28, 04022030. (In Engl.)
18. Zakirullin R.S. Smart Window with Grating Optical Filter: Comparison with Smart Windows Fully Coated with Chromogenic Layer. In: *Building and Environment*, 2022, Vol. 219, 109258. (In Engl.)
19. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Simulating Annual Autoregulation of Daylight by Grating Smart Window with Angular-Selective Transmission. In: *Journal of Building Performance Simulation*, 2023. doi:10.1080/19401493.2023.2256690. (In Engl.)
20. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A., Gun'ko N.M., Gor'kov N.A., Girin V.A., Pikalova E.V. Modelirovanie pritoka tepla ot solnechnoi radiatsii cherez reshotochnye smart-okna [Modeling the Heat Gain from Solar Radiation through Grating Smart Windows]. In: *Akademiya. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]* 2023, no. 3, pp. 132–139. (In Russ.)
21. Temps R.C., Coulson K.L. Solar Radiation Incident upon Slopes of Different Orientations. In: *Solar Energy*, 1977, Volume 19, pp. 179–184. (In Engl.)
22. Hopkinson R.G., Longmore J., Petherbridge P. An Empirical Formula for the Computation of Daylight Factor. In: *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 1954, Vol. 19, pp. 201–219. URL: (In Engl.)
23. Bogati S., Basnet R., Graf W., Georg A. Development of Photochromic Device with Magnetron Sputtered Titanium Dioxide and Tungsten Trioxide Films. In: *Sol. Energ. Mater. Sol. C*, 2017, Volume 166, pp. 204–211. (In Engl.)