

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624-2/-9:628.921/928

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.70-88

Моделирование естественного освещения в помещении с решеточным смарт-окном

Рустам Сабинович Закируллин^{1,2}, Ирина Александровна Оденбах^{1,2},
Владимир Александрович Гирин^{1,2}, Евгения Васильевна Пикалова¹

¹ Оренбургский государственный университет (ОГУ); г. Оренбург, Россия;

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложен метод моделирования естественного освещения в помещениях с новым типом смарт-окон с решеточным оптическим фильтром. Многочисленные компьютерные программы BPS не имеют соответствующих функций для моделирования в помещениях с решеточными смарт-окнами в силу их отличительных особенностей и новизны. Модифицирован метод расчета автономности непрерывного естественного света (сDA) и на его основе проведено численное моделирование.

Материалы и методы. Представлены методы расчета геометрических параметров решеточного фильтра и временных характеристик светопропускания смарт-окна, разработан метод расчета показателя сDA в помещении со смарт-окном с решетками, расположенными под оптимальным углом, приспособленным к траектории движения Солнца относительно окна.

Результаты. Получены результаты численного моделирования по разработанному методу для окна с тройным остеклением с применением термохромного материала с температурой переключения 25 °С в помещении здания в г. Оренбурге. Для наиболее жаркого периода — в июне, июле и августе показатель сDA рассчитан в окрашенном состоянии термохромного материала фильтра, для остальных месяцев взято его обесцвеченное состояние. Показано преимущество решеточных смарт-окон перед традиционными в виде увеличения освещенности как в окрашенном, так и обесцвеченном состоянии термохромного материала. За счет пропускания большего количества рассеянного света при блокировке прямого света в заранее заданное время решеточные окна обеспечивают более равномерное круглогодичное распределение освещенности по глубине помещения.

Выводы. Решеточные смарт-окна рекомендуется применять на восточных, южных и западных фасадах зданий с режимом работы в дневное время для достижения более комфортных условий естественного освещения на рабочих местах и минимизации энергопотребления и затрат на отопление, вентиляцию, кондиционирование.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: смарт-окно, решеточный оптический фильтр, светопропускание, естественное освещение, моделирование характеристик здания, комфортность освещения, показатели естественного освещения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Закируллин Р.С., Оденбах И.А., Гирин В.А., Пикалова Е.В. Моделирование естественного освещения в помещении с решеточным смарт-окном. 2024. Т. 14. Вып. 3. С. 70–88. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.70-88

Автор, ответственный за переписку: Рустам Сабинович Закируллин, rustam.zakirullin@gmail.com.

Modelling natural light in a room with a lattice smart window

Rustam S. Zakirullin^{1,2}, Irina A. Odenbakh^{1,2}, Vladimir A. Girin^{1,2}, Evgenia V. Pikalova¹

¹ Orenburg State University; Orenburg, Russian Federation;

² Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A method for modelling natural lighting in rooms with a new type of smart windows with lattice optical filter is proposed. Numerous BPS computer programmes do not have appropriate functions for modelling in rooms with grating smart

windows due to their distinctive features and novelty. The method for calculating the Continuous Daylight Autonomy (cDA) was modified and numerical modelling was carried out on its basis.

Materials and methods. Methods for calculating the geometric parameters of the grating filter and the temporal characteristics of the light transmission of a smart window are presented, and a method for calculating the cDA index in a room with a grating smart window located at an optimal angle adapted to the trajectory of the Sun relative to the window is developed.

Results. The results of numerical modelling according to the developed method for a triple-glazed window with thermochromic material with a switching temperature of 25 °C in a building in Orenburg were obtained. For the hottest period in June, July and August, the cDA index is calculated in the coloured state of the thermochromic filter material, for other months its uncoloured state is taken. The advantage of lattice smart windows over traditional ones is shown in the form of increased illumination both in the colored and uncoloured states of the thermochromic material. By letting in more diffuse light while blocking direct light at a predetermined time, grating windows provide a more uniform year-round distribution of illumination throughout the depth of the room.

Conclusions. Lattice smart windows are recommended for the eastern, southern and western facades of buildings with daytime operation mode to achieve more comfortable daylight conditions at workplaces and minimize energy consumption and costs for heating, ventilation, air conditioning.

KEYWORDS: smart window, grating optical filter, light transmission, natural light, building performance modelling, lighting comfort, daylight index

FOR CITATION: Zakirullin R.S., Odenbakh I.A., Girin V.A., Pikalova E.V. Modelling natural light in a room with a lattice smart window. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(3):70-88. URL: <http://nsjournal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.3.70-88

Corresponding author: Rustam S. Zakirullin, rustam.zakirullin@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование характеристик здания (BPS) однозначно определяет наиболее эффективный и устойчивый вариант проектирования здания и обеспечивает надежное прогнозирование его будущих характеристик с учетом экологически значимого потенциала и ряда важных глобальных граничных условий, в том числе роста населения и урбанизации [1]. За последние десятилетия разработаны многочисленные компьютерные программы BPS, охватывающие только определенные части BPS (анализ климата, потребность в энергии, тепловой комфорт, визуальный комфорт, воздействие на окружающую среду, затраты и т.д.) или всесторонне моделирующие все эти ключевые показатели здания.

Исследованы комплексный [2] и ручной [3] методы управления дневным и электрическим освещением для создания энергоэффективного проекта здания с максимальным использованием ресурсов солнечной энергии. Моделирование естественного освещения помещения на основе компьютерных программ BPS может быть выполнено для помещений с обычными окнами с применением жалюзи или других устройств, а также с традиционными смарт-окнами, покрытыми одним слоем активного, как правило, хромогенного материала.

Активно изучаемые несколько десятилетий смарт-окна [4] на основе хромогенных или других передовых технологий являются важнейшим компонентом повышения энергоэффективности зданий и комфортности естественного освещения внутри помещений [5–8]. Стекло традиционного смарт-окна, полностью покрытое активным материалом, изменяет светопропускание в зависимости от изменения внешних условий (температуры для термохромных [9–11] и термохромных [12, 13] стекол, интенсивности УФ-излучения для фотохромных [14–16] стекол), приложенного напряжения (электрохромные стекла [17–19]), изменения

концентрации газов в камере окна (газохромные стекла [20, 21]) и т.д. Моделирование для помещений с такими смарт-окнами отличается только тем, что они имеют два или более (электрохромное стекло) режима светопропускания, поэтому расчеты требуются для каждого режима. Кроме того, традиционные смарт-окна не имеют угловой селективности пропускания и могут использоваться совместно с жалюзи и другими устройствами, для которых достаточно применять доступные методы моделирования BPS.

В данной работе рассматривается задача моделирования естественного освещения в помещениях с новым типом смарт-окон, которые отличаются от традиционных тем, что имеют не один сплошной активный слой, а две решетки с параллельными полосами хромогенного или другого активного материала на разных оконных поверхностях, представляющие собой оптический фильтр нового типа. Задача усложняется тем, что такие смарт-окна имеют решетки, расположенные под любым углом, приспособленным к траектории движения солнца относительно окна, а не только горизонтально или вертикально, как жалюзи. Для формирования активных полос двух решеток могут использоваться разные материалы и технологии [4–21]. Многочисленные компьютерные программы BPS не имеют соответствующих функций для моделирования дневного света в помещениях с решеточными смарт-окнами в силу их отличительных особенностей. Исследования с целью поиска оптимальных конструкций и размеров окон и их размещения, ограничения попадания прямой солнечной радиации в помещение, предотвращения слепимости и перенаправления потоков света вглубь помещения с помощью солнцезащитных и перенаправляющих устройств требуют разработки современных подходов к нормированию естественного освещения [22].

Способ углового селективного регулирования направленного светопропускания, запатентованный

авторами [23, 24], положен в основу разработки новых оптических фильтров и смарт-окон на их основе [25–30]. Разработаны методы расчета оптимального угла наклона решеток оптического фильтра для решеточных смарт-окон, ширин пропускающих и непропускающих (рассеивающих, отражающих или поглощающих) полос обеих решеток и их взаимного расположения для минимизации светопропускания в заданный день года и время суток с учетом азимута окна, географических координат здания, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечного излучения [25, 26]. Первоначальные методы расчета фильтров с пропускающими и непропускающими полосами обобщены и расширены для фильтров с хромогенными полосами [27]. Смарт-окна с решеточным оптическим фильтром обеспечивают круглогодичный динамический контроль естественного освещения без использования жалюзи и т.п. [28] и особенно имеют преимущества для оптимизации естественного освещения и инсоляции зданий с криволинейными фасадами [29]. Предложена новая архитектурная типология зданий с индивидуальным пропусканием каждого решеточного смарт-окна без использования дополнительных устройств затенения/перенаправления дневного света, алгоритм которой реализован путем расчета геометрических параметров фильтров для различных фасадов, временных характеристик светопропускания и показателей естественного освещения [30].

Цель исследования — доработка методов расчета геометрических параметров решеточного фильтра, временных характеристик светопропускания смарт-окна и показателей естественного освещения в помещении с решеточным смарт-окном с последующей проверкой этих методов с помощью численного моделирования для достижения комфортных условий освещения и минимизации энергопотребления и затрат на отопление, вентиляцию, кондиционирование (ОВК).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Устройство смарт-окна с тройным остеклением, имеющим решеточный оптический фильтр с параллельными хромогенными полосами, между которыми находятся направленно пропускающие полосы, т.е.

необработанная часть стекла, показано на рис. 1. Решетки смарт-окна наклонены под углом, адаптированным к траектории движения Солнца относительно окна. Разрез окна показан в плоскости, перпендикулярной полосам решеток. Фильтр имеет такие геометрические параметры, как угол наклона полос γ , расстояние между решетками s , ширины пропускающих полос c_1 и c_3 , ширины хромогенных полос c_2 и c_4 , характеристический угол Θ_c , показывающий смещение входной и выходной решеток друг относительно друга путем трассировки луча, проходящего через центры полосок обеих решеток (рис. 1). Изображенный фильтр имеет решетки с одинаковыми ширинами всех полос, поэтому при характеристическом угле падения падающий прямой солнечный свет полностью блокируется, при другом угле падения в ту же точку на плоскости входной решетки луч проходит через все три слоя остекления. Это иллюстрирует угловую селективность светопропускания фильтра.

Оптимальный угол наклона решеток фильтра определяется по алгоритму [25], включающему: 1) расчет высот стояния и азимутов Солнца в выбранный день года при заданных широте и долготе здания; 2) определение траектории Солнца относительно окна с учетом его азимута; 3) аппроксимацию этой траектории в выбранном интервале времени. Оптимальность наклона решеток означает, что солнечные лучи будут падать преимущественно в плоскостях, перпендикулярных полосам (рис. 1), т.е. регулирование светопропускания будет наиболее эффективным. Поскольку траектория движения Солнца меняется в течение дня и года, угол наклона решеток фильтра рассчитывается для выбранного времени суток выбранной расчетной даты с «наихудшим» сценарием, когда требуется максимальная защита от Солнца. В зависимости от местных климатических условий за расчетную дату может быть принят день с максимальной интенсивностью солнечного излучения или максимальной температурой. За расчетное время можно принять время максимальной интенсивности солнечного излучения, зенитного положения Солнца, совпадения азимутов Солнца и окна (когда солнечные лучи наиболее глубоко проникают вглубь помещения).

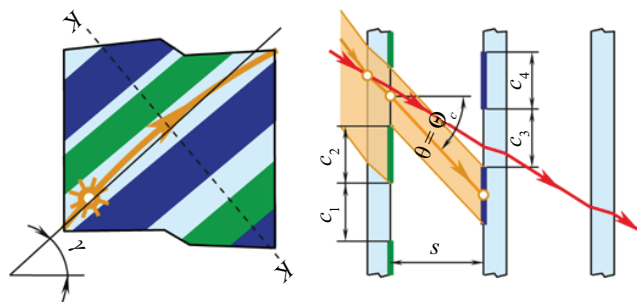


Рис. 1. Решеточное смарт-окно с тройным остеклением: Θ_c — характеристический угол фильтра; θ — проекция угла падения; s — расстояние между решетками; γ — угол наклона решеток; c_i — ширины полос

Оптимизация светопропускания решеточного смарт-окна заключается в обеспечении минимального пропускания прямых солнечных лучей в выбранное время суток и года в определенном угловом диапазоне симметрично относительно характеристического угла, когда ширина пропускающей полосы входных решеток больше ширины непр пропускающей (хромогенной) полосы выходных решеток, либо при равенстве ширин этих полос (нулевое пропускание, т.е. полная блокировка прямых солнечных лучей).

Метод расчета характеристического угла фильтра [25–27] основан на обеспечении минимального светопропускания при угле падения Θ , когда его проекция θ на плоскость, перпендикулярную решеткам, совпадает с характеристическим углом ($\Theta_c = \theta$) в заданный момент времени с необходимой максимальной защитой от солнца. Для вертикального окна угол падения солнечного луча рассчитывается по частному случаю первой теоремы косинусов для трехгранного угла, когда двугранный угол перед расчетным плоским углом равен 90° :

$$\Theta = \arccos(\cos h \cos \alpha),$$

где h — высота стояния Солнца; α — разность между азимутами Солнца A и окна A_o ($\alpha = A - A_o$).

После упрощения из работы [27] получаем формулу для расчета проекции угла падения для смарт-окна с тройным остеклением:

$$\theta = \arctan \left\{ \sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{\tan^2 (\Theta - |\alpha|)}{\cos^2 \alpha}} \times \cos \left[\gamma + \arctan \frac{\sin \alpha}{\tan (\Theta - |\alpha|)} \right] \right\}. \quad (1)$$

Ширины полос входной и выходной решеток [25–27] для смарт-окна с тройным остеклением рассчитываются по формулам:

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

где Θ_{av} — заданный средний угол падения ($\Theta_{av} < \Theta_c$), при котором коэффициент пропускания фильтра должен иметь среднее значение $\tau_{av} = 0,5$ ($\tau_{\min} + \tau_{\max}$); $\tau_{\min}$ и $\tau_{\max}$ — заданные минимальный и максимальный теоретические коэффициенты пропускания (без учета отражения и поглощения).

Как следует из формул (2), ширина всех полос уменьшается с увеличением среднего угла падения. При одном и том же среднем угле падения Θ_{av} , а также ширине пропускающей полосы выходных решеток c_3 , распределение ширин остальных полос зависит от заданных минимального и максимального теоретических коэффициентов пропускания. Это

необходимо учитывать при выборе значений Θ_{av} , $\tau_{\min}$ и $\tau_{\max}$. Минимальный и максимальный теоретические коэффициенты пропускания следует устанавливать с учетом следующих соотношений [25–27]:

$$\begin{aligned} \tau_{\min} &= \frac{c_1 - c_4}{c_1 + c_2}; \\ \tau_{\max} &= \frac{c_3}{c_1 + c_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Теоретическая временная характеристика коэффициента светопропускания окна представляет собой зависимость теоретического коэффициента пропускания от времени суток, когда Солнце движется по сложной криволинейной траектории. Такую характеристику можно построить по значениям солнечных азимутов и высот, определяемых через каждый час для синхронизации данных с файлом ТМУ (типичные метеорологические данные года) для данного района Земли, для более точной характеристики временные интервалы можно сократить до 5 или 10 мин. Характеристика имеет чередующиеся диапазоны с постоянным минимальным, возрастающим, постоянным максимальным и убывающим коэффициентами пропускания, закономерности которых подробно рассмотрены в труде [25]. Диапазоны с постоянным минимальным и максимальным коэффициентами пропускания рассчитываются по формулам (3). Диапазоны с уменьшением и увеличением коэффициентов пропускания рассчитываются [26] по формуле:

$$\tau = \frac{(|\Delta| - 0,5c_2 + 0,5c_3)}{(c_1 + c_2)}, \quad (4)$$

где Δ — сдвиг между следами входных решеток на поверхности выходных решеток при характеристическом угле и произвольном угле падения. Этот сдвиг определяется [26] по формуле:

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

После модификации формулы для коррекции теоретической временной характеристики пропускания окна [26], с учетом отражения по уравнениям Френеля, а также поглощения по закону Бугера – Ламберта, для окна с тройным остеклением получаем:

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

где τ_{cor} — скорректированный коэффициент пропускания; τ — теоретический коэффициент пропускания, рассчитанный по формулам (3) и (4); Θ_n — угол преломления, соответствующий углу падения Θ ; n — показатель преломления стекла; α_a — средний натуральный коэффициент поглощения стекла в диапазоне длин волн (мм^{-1}); s_Σ — общая толщина

всех оконных стекол, мм. Для видимого света коэффициент поглощения берется в диапазоне примерно от 380 до 750 нм.

Формулы (3) и (4) предназначены для расчета коэффициента пропускания фильтра с пропускающими и непропускающими полосами. Фильтр с хромогенными полосами как в окрашенном (затемненном), так и в обесцвеченном состоянии хромогенных полос, помимо пропускания прямого света через пропускающие полосы обеих решеток, т.е. через прозрачное стекло, пропускает окрашенный прямой свет через хромогенные полосы (на рис. 1 не показано). Для хромогенных фильтров в исследовании [27] получены формулы для расчета диапазонов с минимальным, максимальным и уменьшающимся/возрастающим коэффициентом пропускания:

$$\begin{aligned}\tau_{\min} &= \frac{[c_1 + c_2 \tau_{chr1} - c_4(1 - \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2}; \\ \tau_{\max} &= \frac{[c_1 \tau_{chr2} + c_2 \tau_{chr1} \tau_{chr2} + c_3(1 - \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2}; \\ \tau &= \frac{[(|\Delta| - 0,5c_2 + 0,5c_3)(1 - \tau_{chr1} - \tau_{chr2} + \tau_{chr1} \tau_{chr2}) + c_1 \tau_{chr2} + c_2 \tau_{chr1} \tau_{chr2} + c_3(\tau_{chr1} - \tau_{chr1} \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2},\end{aligned}\quad (7)$$

где τ_{chr1} и τ_{chr2} — коэффициенты светопропускания (при нормальном падении) хромогенных полос входной и выходной решеток в окрашенном или обесцвеченном состоянии.

Из многих показателей естественного света, установленных российскими и международными нормами и стандартами, рассмотрим методику расчета автономности непрерывного естественного света (сDA) применительно к помещениям с решеточными смарт-окнами. Для расчета сDA предложено уравнение [31]:

$$\begin{aligned}\text{сDA} &= \frac{\sum_i w f_i \cdot t_i}{\sum_i t_i} \in [0, 1]; \\ w f_i &= \begin{cases} 1, & \text{если } E_h \geq E_{\lim}, \\ E_h / E_{\lim}, & \text{если } E_h < E_{\lim}, \end{cases}\end{aligned}\quad (8)$$

где $w f_i$ — весовой коэффициент, зависящий от порога освещенности; t_i — каждый час работы в году; E_h — горизонтальная естественная освещенность в данной точке, лк; $E_{\lim}$ — заданный порог освещенности, лк.

Для расчета горизонтальной освещенности в расчетной точке на основе данных файла ТМУ и закона косинусов Ламберта получаем формулу для помещений с решеточными смарт-окнами:

$$\begin{aligned}E_h &= (E_{\text{DNI}} \tau_{\text{cor}} \sin h + E_{\text{DHI}} \tau_d \Omega) \times \\ &\times \left[1 + \frac{0,85 F_w (C R_f + 5 R_c)}{F(1 - R)} \right],\end{aligned}\quad (9)$$

где E_{DNI} — прямая нормальная освещенность, лк; E_{DHI} — диффузная горизонтальная освещенность,

лк; τ_d — диффузный коэффициент пропускания окна; Ω — телесный угол обзора неба из расчетной точки, ср; F_w — площадь окна, м²; C — фактор неба для окна; R_f и R_c — средние коэффициенты отражения поверхностей ниже и выше горизонтали через центр окна; F — общая площадь поверхностей помещения, м²; R — средний коэффициент отражения поверхностей помещения.

Первый член суммы первого множителя в формуле (9) — часть горизонтальной освещенности, создаваемая прямой нормальной освещенностью с учетом коэффициента пропускания прямых солнечных лучей и угла падения. Второй член — часть горизонтальной освещенности, создаваемая рассеянным светом неба (при отсутствии противостоящих зданий), рассчитанная через диффузную горизонтальную освещенность с учетом диффузного коэффициента пропускания τ_d и телесного угла обзора неба из расчетной точки. Для расчета коэффициента τ_d из формулы (6) при нормальном падении солнечных лучей ($\Theta = 0^\circ$, $\sin \Theta = 0$) с учетом соотношения ширин полос обеих решеток получаем:

$$\begin{aligned}\tau_d &= \left(\frac{c_1 + c_2 \tau_{chr1}}{c_1 + c_2} \right) \left(\frac{c_3 + c_4 \tau_{chr2}}{c_3 + c_4} \right) \times \\ &\times \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^6 \exp(-\alpha_a s_\Sigma).\end{aligned}\quad (10)$$

Для нехромогенных решеточных окон формула (10) упрощается при $\tau_{chr1} = 0$ и $\tau_{chr2} = 0$. Телесный угол обзора неба Ω_i (доля небесного свода) из расчетной точки аппроксимируем выражением:

$$\Omega = \frac{W_w H_w \cos B}{D^2},\quad (11)$$

где W_w — ширина окна; H_w — превышение высоты окна над расчетной горизонтальной плоскостью; B — угол между линией, проходящей через эти две точки, и нормалью к окну; D — расстояние между расчетной точкой и центром оконного элемента над расчетной горизонтальной плоскостью.

Второй множитель в формуле (9) учитывает внутренне отраженную составляющую дневной освещенности по методу, представленному в работе [32], исходя из внутренних размеров и формы помещения, размера и расположения всех окон, коэффициентов отражения потолка, стен и пола, и расположения расчетных точек. Коэффициент неба для окна определяется в зависимости от угла затенения между горизонталью и линией крыши противоположного здания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное моделирование выполнено для условий г. Оренбурга, Россия (51,7727° с. ш., 55,0988° в. д., GMT+05:00), для юго-восточного фасада здания с азимутом 120° на 15 июня, как дня с максимальной интенсивностью солнечной радиации в Орен-

Табл. 1. Расчет коэффициента пропускания для окна с азимутом 120°

Время, ч мин	A, град.	h, град.	α, град.	Θ, град.	Коэффициент пропускания					
					Окрашенное состояние			Обесцвеченное состояние		
					τ фильтр	τ _{cor} фильтр	τ _{cor} обычное	τ фильтр	τ _{cor} фильтр	τ _{cor} обычное
6:49	69,40	13,53	–50,60	51,89	0,0631	0,0325	0,0232	0,5442	0,2804	0,2782
7:19	74,90	17,95	–45,10	47,82	0,1504	0,0818	0,0245	0,5644	0,3070	0,2937
7:49	80,43	22,48	–39,57	44,58	0,2116	0,1187	0,0252	0,5787	0,3247	0,3030
8:19	86,07	27,09	–33,93	42,38	0,2512	0,1433	0,0257	0,5878	0,3354	0,3081
8:49	91,92	31,73	–28,08	41,37	0,2711	0,1557	0,0258	0,5924	0,3402	0,3101
9:19	98,09	36,35	–21,91	41,65	0,2707	0,1552	0,0258	0,5924	0,3396	0,3096
9:49	104,71	40,90	–15,29	43,19	0,2456	0,1393	0,0255	0,5865	0,3327	0,3063
10:19	111,98	45,30	–8,02	45,85	0,1827	0,1014	0,0250	0,5719	0,3174	0,2996
10:49	120,08	49,47	0,08	49,47	0,045	0,0240	0,0240	0,5400	0,2880	0,2880
11:19	129,29	53,29	9,29	53,85	0,2156	0,1074	0,0224	0,5796	0,2886	0,2689
11:49	139,82	56,60	19,82	58,81	0,3861	0,1706	0,0199	0,6191	0,2736	0,2387
12:19	151,85	59,21	31,85	64,23	0,4267	0,1522	0,0161	0,6286	0,2243	0,1927

бурге, выбранного по данным о годовом изменении прямой нормальной, рассеянной горизонтальной и суммарной горизонтальной солнечной радиации при ясном небе, приведенным в справочнике¹. Для этих условий оптимальный угол наклона решеток фильтра 42° получен [26] путем аппроксимации траектории Солнца с 7 ч 49 мин до 12 ч 19 мин. Азимуты A и высоты стояния h Солнца в расчетный день через каждые полчаса светового дня относительно времени совпадения азимутов Солнца и окна A = A₀ = 120° приведены в табл. 1. Рассчитаны углы падения Θ и разности α между азимутами Солнца и окна.

Характеристический угол фильтра определен по формуле (1): Θ_c = 40,89°. Численное моделирование по формулам (2) проведено при минимальном и максимальном теоретических коэффициентах пропускания фильтра τ_{min} = 0 и τ_{max} = 0,5 с целью получения одинаковых ширин всех полос (как на рис. 1): c₁ = c₂ = c₃ = c₄ = 10 мм, для чего средний угол падения задан со значением Θ_{av} = 28,9611°.

Теоретические коэффициенты светопропускания рассчитаны по формулам (7) и скорректированы по формуле (6) для решеточного фильтра с полосами из хромогенного материала с интегрированной в тонкую пленку лигандообменной термохромной системой, имеющей постепенное уменьшение пропускания с 54 до 4,5 % в видимом диапазоне и с 22,5 до 4,5 % в ИК-диапазоне при повышении температуры от 25 до 85 °С [12]. Этот материал выбран для обеих решеток, т.е. τ_{chr1} = τ_{chr2} = 0,045 и τ_{chr1} = τ_{chr2} = 0,54 в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. Для обычного смарт-окна с применением того же хромогенного материала скоррек-

тированные коэффициенты светопропускания рассчитаны по формуле (6) при подстановке τ = 0,045 и τ = 0,54 в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. Корректировка коэффициентов пропускания по формуле (6) проведена при α_a = 0,02 мм⁻¹, s_z = 12 мм (три стекла по 4 мм толщиной) и n = 1,5. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

На рис. 2 представлены временные теоретические (линии 1) и скорректированные (линии 2) характеристики светопропускания решеточных фильтров и скорректированные (линии 3) характеристики обычных смарт-окон, полностью покрытых активным слоем. Характеристики приведены для окрашенного и обесцвеченного состояний термохромных полос и слоев.

На рис. 3 показаны план и разрез помещения с окном в юго-восточном фасаде здания для расчета cDA и результаты расчета. Длина (глубина), ширина и высота расчетного помещения составляют 5,5, 4 и 2,6 м. Ширина и высота окна 2 и 1,5 м, высота подоконника 0,8 м. Коэффициенты отражения потолка, стен и пола принимались равными 0,8 (светло-серый), 0,6 (средне-серый) и 0,4 (темно-серый). cDA рассчитан по формуле (8) при пороге освещенности

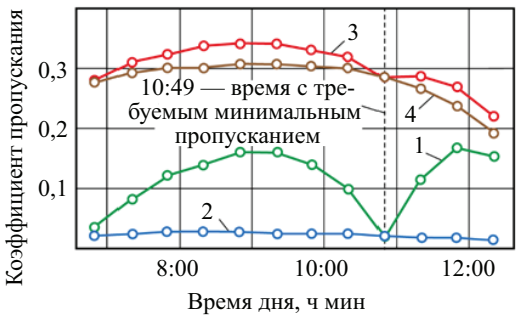


Рис. 2. Временные характеристики пропускания: 1 (фильтр) и 2 (слой) в окрашенном состоянии; 3 (фильтр) и 4 (слой) в обесцвеченном состоянии

¹ Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 12. Татарская АССР, Ульяновская, Куйбышевская, Пензенская, Саратовская и Оренбургская области. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 647 с.

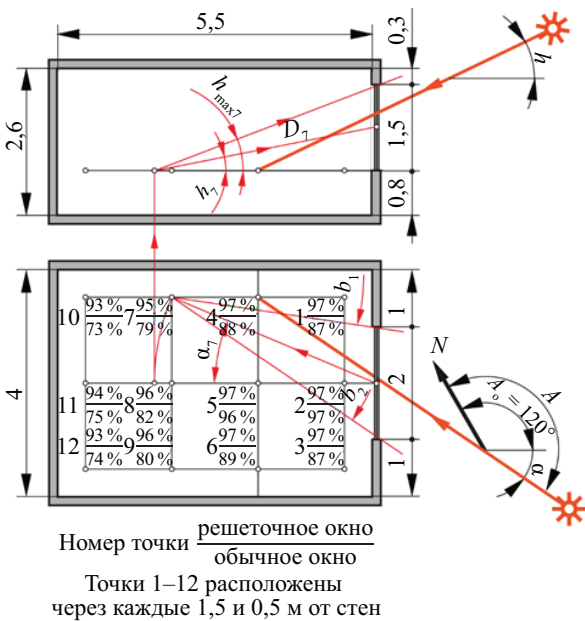


Рис. 3. План и разрез помещения для расчета cDA и результаты расчета: A и A_0 — азимуты Солнца и окна; α — разность азимутов Солнца и окна; h — высота стояния Солнца

500 лк для 12 расчетных точек на горизонтальной плоскости на высоте 0,8 м от пола. Горизонтальная освещенность рассчитана по формуле (9) на основе многолетних данных о прямой нормальной и рассеянной горизонтальной радиации для г. Оренбурга¹. Поскольку данные о радиации приведены для солнечного времени через каждый час, начиная с 6 ч 30 мин, а разница между солнечным и декретным временем в Оренбурге (GMT+05:00) составляет 1 ч 20 мин, все расчеты проведены для рабочих часов с 7 ч 50 мин до 16 ч 50 мин. Для сравнения определены значения cDA для решетчатого и обычного смарт-окна. При расчетах cDA учтено, что выбранный термохромный материал переключается из обесцвеченного состояния в окрашенное при превышении температуры 25 °С — для июня, июля и августа со средним максимумом температуры 27,5, 29,0 и 27,4 °С соответственно, приняты коэффициенты светопропускания в окрашенном состоянии материала. В остальные месяцы коэффициенты рассчитаны для обесцвеченного состояния.

Для решетчатого смарт-окна коэффициент диффузного пропускания τ_d , рассчитанный по формуле (10), составляет 0,1681 и 0,3651 в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. Для обычного смарт-окна скорректированные коэффициенты прямого пропускания рассчитаны по формуле (6) при фактических углах падения при $\tau = \tau_{chr} = 0,045$ и $\tau = \tau_{chr} = 0,54$ в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. А коэффициенты диффузного пропускания 0,0277 и 0,3325 для обычного смарт-окна в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно получены по формуле (10) при подстановке вместо произведения двух первых выражений в скобках значений $\tau = \tau_{chr} = 0,045$ и $\tau = \tau_{chr} = 0,54$.

Значения альбедо поверхности земли принято 0,8 в месяцы со снежным покровом с ноября по март и 0,3 для остальных месяцев. Для определения телесного угла обзора неба по формуле (11) превышение высоты H_w окна над расчетной горизонтальной плоскостью составляет 1,5 м. Расстояния D между каждой расчетной точкой и центром оконного элемента над расчетной горизонтальной плоскостью (для нашего случая центром окна) и углы B между линиями, проходящими через эти две точки, и нормалью к окну приведены в табл. 2. На рис. 3 показан порядок определения расчетных параметров для точки 7: расстояния D_7 , азимутальных углов начала b_1 и окончания b_2 инсоляции (от направления севера), угла ограничения высоты стояния Солнца h_{max} и углов h_7 и α_7 для расчета по формуле $B = \arccos(\cosh/\cos\alpha)$.

Остальные параметры для расчета по формуле (9) составляют: $F_w = 3 \text{ м}^2$, $F = 93,4 \text{ м}^2$, $R_f = 0,5$, $R_c = 0,7$ и $R = 0,6$. Фактор неба для окна $C = 39$ определен по работе [32] при угле затенения 0°, т.е. при отсутствии противостоящего здания с фасадом, превышающим горизонтальный уровень центра окна. При этих параметрах второй множитель в формуле (9) равен 2,57. Поскольку в справочнике¹ приведены данные о прямой нормальной, рассеянной горизонтальной и суммарной горизонтальной солнечной радиации в Вт/м², для перевода в единицу измерения освещенности использовался переводной коэффициент 1 Вт/м² = 120 лк [33]. Результаты расчета cDA по формуле (9) представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Табл. 2. Расчет автономности непрерывного естественного света cDA

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D , м	1,76	0,95	1,76	2,66	2,21	2,66	3,94	3,64	3,94	5,33	5,12	5,33
B , град.	71,8	53,6	71,8	39,7	20,5	39,7	25,5	11,8	25,5	18,5	8,6	18,5
Ω , ср.	0,302	1,973	0,302	0,326	0,575	0,326	0,174	0,222	0,174	0,1	0,113	0,1
h_{max} , град.	42,1	67,0	42,1	29,8	35,3	29,8	21	22,4	21	15,8	16,3	15,8
b_1 , град.	166	63	43	134	95	71	128	105	86	125	109	94
b_2 , град.	196	177	73	169	145	106	154	136	112	145	131	114
cDA фильтра, %	97	97	97	97	97	97	95	96	96	93	94	93
cDA слоя, %	87	97	87	88	96	89	79	82	80	73	75	74

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В наиболее жаркий период года (для расчетной территории это июнь–август), когда термохромный материал полос фильтра находится в активном (окрашенном) состоянии, временная характеристика светопропускания (линия 1 на рис. 2) решеточного смарт-окна имеет минимум точно в заданное время 10 ч 49 мин, в остальное время пропускание значительно выше, чем у традиционного смарт-окна, у которого в течение рабочих часов коэффициент светопропускания (линия 2) практически не изменяется и зависит только от изменения углов падения солнечных лучей на окно. Линия 1 показывает, что решеточный фильтр обладает угловой селективностью пропускания, так как в течение дня углы падения лучей непрерывно изменяются. Поскольку изначально был задан нулевой теоретический минимум светопропускания, то в назначенное время фильтр полностью блокирует прямые лучи, пропуская только рассеянные. Характеристики построены в первую половину рабочего дня, когда в юго-восточное окно расчетного помещения попадают прямые солнечные лучи, защищать от которых и предназначен предлагаемый оптический фильтр. Увеличенное светопропускание фильтра по сравнению с обычным окном обеспечивается за счет пропускания рассеянного света неба при блокировании прямых лучей, что значительно повышает комфортность освещения — при высоком уровне освещенности снижается вероятность ослепленности от прямой солнечной радиации. Кроме того, это способствует некоторому снижению температуры в помещении и соответствующей экономии на кондиционировании воздуха. Временные характеристики решеточного и традиционного смарт-окна (линии 3 и 4 на рис. 2) показывают преимущество применения фильтра также и в остальное время года, когда фильтр находится в обесцвеченном состоянии — его светопропускание несколько выше.

Результаты расчета автономности непрерывного естественного света sDA , проведенные для 12 месяцев (табл. 2, рис. 3), подтверждают круглогодичную эффективность окна с решеточным фильтром по сравнению с традиционным смарт-окном при применении одного и того же хромогенного материала. Рабочая горизонтальная плоскость на высоте 80 см от пола имеет очень высокие значения освещенности у решеточного окна по всей площади помещения — от 93 до 97 % рабочего времени в году она превышает установленный порог в 500 лк, т.е. процентное распределение равномерное по всей глубине помещения, причем за счет пропускания комфортного рассеянного света неба. Следует иметь в виду, что расчеты

сделаны для данных о солнечной радиации при ясном небе, включая зимние месяцы (средняя продолжительность солнечного сияния в году в Оренбурге составляет 2198 ч). В помещении с обычным окном 97 % рабочего времени с превышением установленного порога освещенности наблюдается только в одной расчетной точке 2 непосредственно у окна, в глубине помещения показатель падает до 73 %. В отопительный период решеточное смарт-окно пропускает большее количество солнечной радиации, что способствует некоторой экономии расходов на отопление.

В связи с новизной решеточных оптических фильтров и смарт-окон на их основе, подобные исследования другими авторами не проводились, а методология моделирования естественного освещения в помещениях с их применением отсутствовала. В прежней работе [30] авторами была начата разработка метода и проверена численным моделированием для помещения с окном с двойным остеклением при наличии противостоящего здания. В настоящем исследовании расчетные формулы модифицированы и уточнены, поэтому полученные данные отличаются. Процентное распределение по глубине помещения зон с превышением порога освещенности в течение годового рабочего времени по новым расчетам значительно равномернее, в том числе и для помещения с обычным смарт-окном.

Полученные результаты представляют для исследовательского сообщества общий метод моделирования для нового типа смарт-окон, обеспечивающих угловое селективное регулирование светопропускания без применения жалюзи и подобных дополнительных устройств. С практической точки зрения улучшатся эргономические свойства (отсутствие необходимости ручного или автоматического управления, монтажа и эксплуатации дополнительных устройств), а также экологические (уменьшение влияния пыли и других атмосферных явлений, отсутствие материалов для утилизации после использования) и эстетические (особенно в панорамных окнах большой площади, где затруднительно использование жалюзи и т.п.) факторы. Решеточные смарт-окна рекомендуется применять при восточных, южных и западных азимутах ориентации фасадов зданий с предполагаемым режимом работы в дневное время для достижения более комфортных условий естественного освещения на рабочих местах и минимизации энергопотребления и затрат на ОВК. Исследования будут продолжены авторами с целью более детального изучения годовой производительности функционирования решеточного фильтра и экспериментального испытания реальных моделей смарт-окон в натурных условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Mahdavi A.* In the matter of simulation and buildings: some critical reflections // *Journal of Building Performance Simulation*. 2019. Vol. 13. Issue 1. Pp. 26–33. DOI: 10.1080/19401493.2019.1685598
2. *Kim Y.S., Shin H.S., Park C.S.* Model predictive lighting control for a factory building using a deep deterministic policy gradient // *Journal of Building Performance Simulation*. 2022. Vol. 15. Issue 2. Pp. 174–193. DOI: 10.1080/19401493.2021.2019310
3. *Da Silva P.C., Leal V., Andersen M.* Occupants' behaviour in energy simulation tools: lessons from a field monitoring campaign regarding lighting and shading control // *Journal of Building Performance Simulation*. 2015. Vol. 8. Issue 5. Pp. 338–358. DOI: 10.1080/19401493.2014.953583
4. *Табунчиков Ю.А.* Окно как интеллектуальный элемент конструкции здания // *Энергосбережение*. 2008. № 2. С. 16–21. EDN IJPYSZ.
5. *Casini M.* Smart buildings: advanced materials and nanotechnology to improve energy-efficiency and environmental performance. Woodhead Publishing, 2016.
6. *Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S.* A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 159. Pp. 26–51. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.08.026
7. *Desideri U., Asdrubali F.* Handbook of energy efficiency in buildings. 1 Ed. Butterworth-Heinemann, 2018. 858 p.
8. *Casini M.* Active dynamic windows for buildings : a review // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 119. Pp. 923–934. DOI: 10.1016/j.renene.2017.12.049
9. *Kheiri F.* A multistage recursive approach in time- and frequency-domain for thermal analysis of thermochromic glazing and thermostatic control systems in buildings // *Solar Energy*. 2020. Vol. 208. Pp. 814–829. DOI: 10.1016/j.solener.2020.08.019
10. *Zhao X., Mofid S.A., Jelle B.P., Tan G., Yin X., Yang R.* Optically-switchable thermally-insulating VO₂-aerogel hybrid film for window retrofits // *Applied Energy*. 2020. Vol. 278. P. 115663. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115663
11. *Kong M., Egbo K., Liu C.P., Hossain M.K., Tso C.Y., Chao C.Y.H. et al.* Rapid thermal annealing assisted facile solution method for tungsten-doped vanadium dioxide thin films on glass substrate // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 833. P. 155053. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155053
12. *Seeboth A., Ruhmann R., Mühling O.* Thermotropic and thermochromic polymer based materials for adaptive solar control // *Materials*. 2010. Vol. 3. Issue 12. Pp. 5143–5168. DOI: 10.3390/ma3125143
13. *Ogawa S., Ono Y., Takahashi I.* Glass transition behavior of perpendicularly aligned thermotropic liquid crystalline phases consisting of long-chain trehalose lipids // *Journal of Molecular Liquids*. 2020. Vol. 298. P. 111954. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111954
14. *Szukalski A., Korbut A., Ortyl E.* Structural and light driven molecular engineering in photochromic polymers // *Polymer*. 2020. Vol. 192. P. 122311. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122311
15. *Colombi G., Cornelius S., Longo A., Dam B.* Structure model for anion-disordered photochromic Gadolinium Oxyhydride thin films // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2020. Vol. 124. Issue 25. Pp. 13541–13549. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c02410
16. *Liu J., Lu Y., Li J., Lu W.* UV and X-ray dual photochromic properties of three CP. based on a new viologen ligand // *Dyes and Pigments*. 2020. Vol. 177. P. 108276. DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108276
17. *Chen P.W., Chang C.T., Ko T.F., Hsu S.C., Li K.D., Wu J.Y.* Fast response of complementary electrochromic device based on WO₃/NiO electrodes // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-020-65191-x
18. *Li W., Zhang X., Chen X., Zhao Y., Wang L., Chen M. et al.* Lithiation of WO₃ films by evaporation method for all-solid-state electrochromic devices // *Electrochimica Acta*. 2020. Vol. 355. P. 136817. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136817
19. *Zhang W., Chen X., Wang X., Zhu S., Wang S., Wang Q.* Pulsed electrodeposition of nanostructured polythiophene film for high-performance electrochromic devices // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2021. Vol. 219. P. 110775. DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110775
20. *Ismail A.H., Yahya N.A.M., Mahdi M.A., Yacob M.H., Sulaiman Y.* Gasochromic response of optical sensing platform integrated with polyaniline and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) exposed to NH₃ gas // *Polymer*. 2020. Vol. 192. P. 122313. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122313
21. *Hu C.-W., Nishizawa K., Okada M., Yamada Y., Watanabe H., Tajima K.* Roll-to-roll production of Prussian blue/P. nanocomposite films for flexible gasochromic applications // *Inorganica Chimica Acta*. 2020. Vol. 505. P. 119466. DOI: 10.1016/j.ica.2020.119466
22. *Соловьёв А.К.* Современные подходы к нормированию естественного освещения жилых зданий. Результаты исследований // *Светотехника*. 2020. № 4. С. 5–10. EDN RWIEAU.
23. Патент RU № 2509324. Способ регулирования направленного светопропускания / Р.С. Закируллин; заявл. № 2012130148/28 от 05.11.2010; опубл. 03.10.2014. Бюл. № 7. 3 с.
24. Патент RU № 2677069. Способ углового регулирования направленного светопропускания окна /

Р.С. Закируллин; заявл. № 2017144699 от 12.07.2017; опубл. 15.01.2019. Бюл. № 2. 2 с.

25. *Zakirullin R.S.* Optimized angular selective filtering of direct solar radiation // *Journal of the Optical Society of America A*. 2018. Vol. 35. Issue 9. P. 1592. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001592

26. *Zakirullin R.S.* A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation // *Journal of Solar Energy Engineering*. 2020. Vol. 142. Issue 1. DOI: 10.1115/1.4044059

27. *Zakirullin R.S.* Chromogenic materials in smart windows for angular-selective filtering of solar radiation // *Materials Today Energy*. 2020. Vol. 17. P. 100476. DOI: 10.1016/j.mtener.2020.100476

28. *Закируллин Р.С., Оденбах И.А.* Динамический контроль естественного освещения с помощью смарт-окна с решеточным оптическим фильтром // *Светотехника*. 2021. № 3. С. 47–51. EDN SLEWEW.

29. *Закируллин Р.С., Оденбах И.А.* Оптимизация естественного освещения и инсоляции зданий

с криволинейными фасадами // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 2. С. 111–116. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-111-116. EDN KFAAUZ.

30. *Zakirullin R.S.* Typology of buildings with grating smart windows with azimuthally optimized light transmission // *Journal of Architectural Engineering*. 2022. Vol. 28. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000566

31. *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

32. *Hopkinson R.G., Longmore J., Petherbridge P.* An Empirical formula for the computation of the indirect component of daylight factor // *Transactions of the Illuminating Engineering Society*. 1954. Vol. 19. Issue 7. Pp. 201–219. DOI: 10.1177/147715355401900701

33. *Michael P.R., Johnston D.E., Moreno W.* A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance // *Journal of Measurements in Engineering*. 2020. Vol. 8. Issue 4. Pp. 153–166. DOI: 10.21595/jme.2020.21667

Поступила в редакцию 28 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 28 марта 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Рустам Сабинович Закируллин** — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики; **Оренбургский государственный университет (ОГУ)**; 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13; главный научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; РИНЦ ID: 149818, Scopus: 55419487000, ResearcherID: B-5570-2015, ORCID: 0000-0002-9954-3480; rustam.zakirullin@gmail.com;

Ирина Александровна Оденбах — кандидат педагогических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики; **Оренбургский государственный университет (ОГУ)**; 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13; старший научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; РИНЦ ID: 631027, Scopus: 57211785954, ResearcherID: AAN-4132-2020, ORCID: 0000-0002-9284-2162; irina.odembakh23@gmail.com;

Владимир Александрович Гирин — старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики; **Оренбургский государственный университет (ОГУ)**; 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13; ведущий инженер; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; ResearcherID: GZG-4218-2022, ORCID: 0000-0002-1323-9235; vladimirgirin@gmail.com;

Евгения Васильевна Пикалова — преподаватель кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики; **Оренбургский государственный университет (ОГУ)**; 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, д. 13; РИНЦ ID: 1169672, slyotina.evgenia@yandex.ru.

Вклад авторов:

Закируллин Р.С. — идея, научное руководство, концепция исследования, сбор и обработка материала, разработка метода, проведение численного моделирования, написание и научное редактирование статьи, оформление рисунков, итоговые выводы.

Оденбах И.А. — участие в сборе и обработке материала, проведении численного моделирования, написании статьи.

Гирин В.А. — участие в сборе и обработке материала, проведении численного моделирования.

Пикалова Е.В. — участие в сборе и обработке материала, проведении численного моделирования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Building performance modelling (BPS) unambiguously determines the most efficient and sustainable building design option and provides reliable predictions of future performance, taking into account environmentally relevant potential and a number of important global boundary conditions, including population growth and urbanization [1]. Over the last decades, numerous BPS computer programmes have been developed covering only certain parts of BPS (climate analysis, energy demand, thermal comfort, visual comfort, environmental impact, costs, etc.) or comprehensively modelling all these key building performance indicators.

Integrated [2] and manual [3] daylighting and electric lighting control methods are investigated to create an energy efficient building design maximizing the use of solar energy resources. Modelling of natural room lighting based on BPS computer programmes can be performed for rooms with conventional windows using blinds or other devices, as well as with traditional smart windows covered with a single layer of active, usually chromogenic material.

Actively studied for several decades, smart windows [4] based on chromogenic or other advanced technologies are an essential component of improving the energy efficiency of buildings and the comfort of natural light indoors [5–8]. The glass of a traditional smart window, fully coated with an active material, changes light transmission in response to changes in external conditions (temperature for thermochromic [9–11] and thermotropic [12, 13] glasses, UV intensity for photochromic [14–16] glasses), applied voltage (electrochromic glasses [17–19]), changes in the concentration of gases in the window chamber (gaschromic glasses [20, 21]), etc. Modelling for rooms with such smart windows differs only in that they have two or more (electrochromic glass) light transmission modes, so calculations are required for each mode. In addition, traditional smart windows do not have angular transmittance selectivity and can be used in conjunction with blinds and other devices for which it is sufficient to apply available BPS modelling techniques.

This paper considers the problem of modelling natural lighting in rooms with a new type of smart windows, which differ from traditional ones in that they have not one continuous active layer, but two grids with parallel strips of chromogenic or other active material on different window surfaces, representing a new type of optical filter. The task is complicated by the fact that such smart windows have gratings arranged at any angle adapted to the trajectory of the sun relative to the window, not only horizontally or vertically like blinds. Different materials and technologies can be used to form the active bands of the two grilles [4–21]. Numerous BPS computer programmes do not have appropriate functions for daylight modelling in rooms with louvered smart windows due to their distinctive features. Studies to find optimal designs and sizes of win-

dows and their placement, to limit direct solar radiation into the room, to prevent glare and to redirect light streams into the interior of the room with the help of shading and redirecting devices require the development of modern approaches to the regulation of natural lighting [22].

The method of angular selective control of directional light transmission patented by the authors [23, 24] is the basis for the development of new optical filters and smart windows based on them [25–30]. The methods for calculating the optimal angle of inclination of optical filter gratings for grating smart windows, widths of transmitting and non-transmitting (scattering, reflecting or absorbing) strips of both gratings and their mutual arrangement to minimize light transmission on a given day of the year and time of the day, taking into account the azimuth of the window, geographical coordinates of the building, seasonal and daily distribution of solar radiation intensity [25, 26] have been developed. The original calculation methods for filters with transmissive and non-transmissive bands are generalized and extended for filters with chromogenic bands [27]. Smart windows with grating optical filters provide year-round dynamic control of natural light without the use of blinds, etc. [28] and are particularly advantageous for optimizing the natural light and insolation of buildings with curved facades [29]. A new architectural typology of buildings with individual transmittance of each louvered smart window without the use of additional daylight shading/directing devices is proposed, whose algorithm is implemented by calculating the geometrical parameters of filters for different facades, temporal characteristics of light transmittance and natural light performance [30].

The aim of the study is to refine the methods for calculating the geometric parameters of the grating filter, the temporal characteristics of the light transmittance of the smart-window and the indicators of natural lighting in a room with a grating smart-window with subsequent verification of these methods using numerical simulation to achieve comfortable lighting conditions and minimize energy consumption and heating, ventilation, air-conditioning (HVAC) costs.

MATERIALS AND METHODS

The device of a triple-glazed smart window having a grating optical filter with parallel chromogenic strips, between which there are directionally transmissive strips, i.e. the untreated part of the glass, is shown in Fig. 1. The grids of the smart window are tilted at an angle adapted to the trajectory of the Sun relative to the window. The window section is shown in a plane perpendicular to the bars of the gratings. The filter has geometrical parameters such as the angle of inclination of the bars γ , the distance between the gratings s , the widths of the transmission bars c_1 and c_3 , the widths of the chromogenic bars c_2 and c_4 , the characteristic angle Θ_c , showing the displacement of the input and output gratings with respect to each other

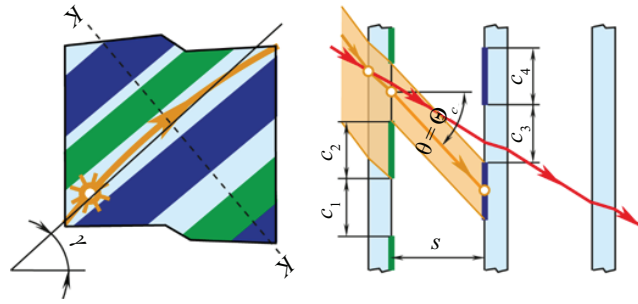


Fig. 1. Lattice smart window with triple glazing: Θ_c — characteristic angle of the filter; θ — projection of the angle of incidence; s — distance between the gratings; γ — angle of inclination of the gratings; c_i — band widths

by tracing a ray passing through the centres of the bars of both gratings (Fig. 1). The filter depicted has gratings with equal widths of all fringes, so at the characteristic angle of incidence the incident direct sunlight is completely blocked, at a different angle of incidence at the same point on the plane of the entrance grating the beam passes through all three layers of glazing. This illustrates the angular selectivity of the filter light transmission.

The optimal angle of inclination of the filter grids is determined by the algorithm [25], which includes: 1) calculation of the standing height and azimuth of the Sun on the selected day of the year at the given latitude and longitude of the building; 2) determination of the Sun's trajectory relative to the window, taking into account its azimuth; 3) approximation of this trajectory in the selected time interval. The optimality of the grids' inclination means that the sun rays will fall mainly in the planes perpendicular to the strips (Fig. 1), i.e. the light transmission regulation will be the most effective. Since the Sun's trajectory varies throughout the day and year, the angle of inclination of the filter grids is calculated for the selected time of day of the selected design date with a "worst-case" scenario, when maximum protection from the Sun is required. Depending on local climatic conditions, the day with maximum solar radiation intensity or maximum temperature can be taken as the design date. The time of maximum solar radiation intensity, the zenith position of the sun, the coincidence of the azimuths of the sun and the window (when the sun's rays penetrate deepest into the interior of the room) can be taken as the design time.

Optimization of light transmittance of the lattice smart-window is to ensure minimum transmittance of direct sunlight at the selected time of day and year in a certain angular range symmetrically relative to the characteristic angle, when the width of the transmittance band of the input gratings is greater than the width of the non-transmittance (chromogenic) band of the output gratings, or when the widths of these bands are equal (zero transmittance, i.e. complete blocking of direct sunlight).

The method of calculating the characteristic angle of the filter [25–27] is based on ensuring minimum light transmission at the angle of incidence Θ , when its projection θ on the plane perpendicular to the gratings coin-

cides with the characteristic angle ($\Theta_c = \theta$) at a given moment of time with the required maximum protection from the sun. For a vertical window, the angle of incidence of the sun ray is calculated by a special case of the first cosine theorem for a trihedral angle, when the dihedral angle in front of the calculated plane angle is 90° :

$$\Theta = \arccos(\cosh \cos \alpha),$$

where h is the Sun's standing altitude; α is the difference between the Sun's azimuth A and the window A_o ($\alpha = A - A_o$).

After simplification from [27], we obtain a formula for calculating the projection of the angle of incidence for a triple-glazed smart window:

$$\theta = \arctan \left\{ \sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{\tan^2 (\Theta - |\alpha|)}{\cos^2 \alpha}} \times \cos \left[\gamma + \arctan \frac{\sin \alpha}{\tan (\Theta - |\alpha|)} \right] \right\}. \quad (1)$$

The strip widths of the entrance and exit grids [25–27] for a smart triple-glazed window are calculated using the formulas:

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

where Θ_{av} is the specified mean angle of incidence ($\Theta_{av} < \Theta_c$), at which the filter transmittance should have a mean value $\tau_{av} = 0.5 (\tau_{\min} + \tau_{\max})$; $\tau_{\min}$ and $\tau_{\max}$ are the specified minimum and maximum theoretical transmittances (excluding reflection and absorption).

As follows from formulas (2), the widths of all bands decrease with increasing average angle of incidence. At the same average angle of incidence Θ_{av} , as well as the width of the transmission band of the output gratings c_3 , the distribution of the widths of the other bands depends on the given minimum and maximum theoretical transmission coefficients. This must be taken into account when choosing the values Θ_{av} , $\tau_{\min}$ and $\tau_{\max}$.

The minimum and maximum theoretical transmission coefficients should be set taking into account the following relations [25–27]:

$$\begin{aligned}\tau_{\min} &= \frac{c_1 - c_4}{c_1 + c_2}; \\ \tau_{\max} &= \frac{c_3}{c_1 + c_2}.\end{aligned}\quad (3)$$

The theoretical temporal characteristic of the window transmittance is the dependence of the theoretical transmittance on the time of day when the Sun moves along a complex curvilinear trajectory. Such a characteristic can be constructed from the values of solar azimuths and altitudes determined every hour to synchronize the data with the TMY file (typical meteorological data of the year) for a given area of the Earth, for a more accurate characteristic the time intervals can be reduced to 5 or 10 min. The characterization has alternating ranges of constant minimum, increasing, constant maximum and decreasing transmittance, the patterns of which are discussed in detail in [25]. The ranges with constant minimum and maximum transmission coefficients are calculated by formulas (3). The ranges with decreasing and increasing transmittance coefficients are calculated [26] by the formula:

$$\tau = \frac{(|\Delta| - 0.5c_2 + 0.5c_3)}{(c_1 + c_2)}, \quad (4)$$

where Δ is the shift between the traces of the input gratings on the surface of the output gratings at characteristic angle and arbitrary angle of incidence. This shift is determined [26] by the formula:

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

After modification of the formula for correction of the theoretical time characteristic of window transmittance [26], taking into account reflection by the Fresnel equations and absorption by the Bouguer – Lambert law, we obtain for a window with triple glazing:

$$\begin{aligned}\tau_{cor} &= \tau \left\{ 1 - 0.5 \left[\frac{\sin^2(\Theta - \Theta_n)}{\sin^2(\Theta + \Theta_n)} + \frac{\tan^2(\Theta - \Theta_n)}{\tan^2(\Theta + \Theta_n)} \right] \right\}^6 \times \\ &\times \exp \left(- \frac{\alpha_a n s_\Sigma}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta}} \right),\end{aligned}\quad (6)$$

where τ_{cor} is the corrected transmittance; τ is the theoretical transmittance calculated from formulae (3) and (4); Θ_n is the angle of refraction corresponding to the angle of incidence Θ , n is the refractive index of the glass; α_a is the average natural absorption coefficient of the glass in the wavelength range (mm⁻¹); s_Σ is the total thickness of all window panes, mm. For visible light, the absorption coefficient is taken in the range of approximately 380 to 750 nm.

Formulas (3) and (4) are intended to calculate the transmission coefficient of a filter with transmissive and non-transmissive strips. A filter with chromogenic bands

both in the coloured (darkened) and uncoloured state of the chromogenic bands, in addition to transmitting direct light through the transmitting bands of both gratings, i.e. through transparent glass, transmits coloured direct light through the chromogenic bands (not shown in Fig. 1). For chromogenic filters, formulas for calculating the bands with minimum, maximum and decreasing/increasing transmittance are derived in the study [27]:

$$\begin{aligned}\tau_{\min} &= \frac{[c_1 + c_2 \tau_{chr1} - c_4(1 - \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2}; \\ \tau_{\max} &= \frac{[c_1 \tau_{chr2} + c_2 \tau_{chr1} \tau_{chr2} + c_3(1 - \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2}; \\ \tau &= \frac{[(|\Delta| - 0.5c_2 + 0.5c_3)(1 - \tau_{chr1} - \tau_{chr2} + \tau_{chr1} \tau_{chr2}) + c_1 \tau_{chr2} + c_2 \tau_{chr1} \tau_{chr2} + c_3(\tau_{chr1} - \tau_{chr1} \tau_{chr2})]}{c_1 + c_2},\end{aligned}\quad (7)$$

where τ_{chr1} and τ_{chr2} are light transmission coefficients (at normal incidence) of the chromogenic bands of the input and output gratings in the coloured or uncoloured state.

Of the many natural light indicators established by Russian and international norms and standards, let us consider the methodology for calculating the autonomy of continuous natural light (cDA) as applied to rooms with lattice smart windows. The equation [31] is proposed to calculate cDA:

$$\begin{aligned}cDA &= \frac{\sum_i w f_i \cdot t_i}{\sum_i t_i} \in [0, 1]; \\ w f_i &= \begin{cases} 1, & \text{if } E_h \geq E_{lim}, \\ E_h / E_{lim}, & \text{если } E_h < E_{lim}, \end{cases}\end{aligned}\quad (8)$$

where $w f_i$ — weight coefficient depending on illuminance threshold; t_i — each hour of work in a year; E_h — horizontal natural illuminance at a given point, lux; E_{lim} — specified illuminance threshold, lux.

To calculate the horizontal illuminance at the design point based on TMY file data and Lambert's law of cosines, we obtain a formula for rooms with lattice smart windows:

$$\begin{aligned}E_h &= (E_{DNI} \tau_{cor} \sin h + E_{DHI} \tau_d \Omega) \times \\ &\times \left[1 + \frac{0.85 F_w (C R_f + 5 R_c)}{F(1 - R)} \right],\end{aligned}\quad (9)$$

where E_{DNI} — direct normal illuminance, lux; E_{DHI} — diffuse horizontal illuminance, lux; τ_d — diffuse transmittance of the window; Ω — solid angle of view of the sky from the design point, av; F_w — window area, m²; C — sky factor for the window; R_f and R_c — average reflection coefficients of surfaces below and above the horizontal through the centre of the window; F — total area of room surfaces, m²; R — average reflection coefficient of room surfaces.

The first term of the sum of the first multiplier in formula (9) is a part of horizontal illuminance created by direct normal illuminance taking into account the transmittance coefficient of direct sunlight and the angle of incidence. The second term is a part of horizontal illuminance created by diffuse sky light (in the absence of opposing buildings), calculated through diffuse horizontal illuminance taking into account diffuse transmittance coefficient τ_d and solid angle of view of the sky from the design point. To calculate the coefficient τ_d from formula (6) at normal incidence of sunlight ($\Theta = 0^\circ$, $\sin\Theta = 0$) taking into account the ratio of strip widths of both gratings we obtain:

$$\tau_d = \left(\frac{c_1 + c_2 \tau_{chr1}}{c_1 + c_2} \right) \left(\frac{c_3 + c_4 \tau_{chr2}}{c_3 + c_4} \right) \times \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^6 \exp(-\alpha_a s_\Sigma). \quad (10)$$

For non-chromogenic lattice windows, formula (10) is simplified at $\tau_{chr1} = 0$ and $\tau_{chr2} = 0$. The solid angle of view of the sky Ω_i (sky vault fraction) from the design point is approximated by the expression:

$$\Omega = \frac{W_w H_w \cos B}{D^2}, \quad (11)$$

where W_w is the width of the window; H_w is the excess of the window height over the design horizontal plane; B is the angle between the line passing through these two points and the normal to the window; D is the distance between the design point and the centre of the window element over the design horizontal plane.

The second multiplier in formula (9) accounts for the internally reflected component of daylighting according to the method presented in [32], based on the internal dimensions and shape of the room, the size and location of all windows, the reflection coefficients of the ceiling, walls and floor, and the location of design points. The sky coefficient for a window is

determined depending on the angle of shading between the horizontal and the roof line of the opposite building.

RESEARCH RESULTS

Numerical modelling was performed for the conditions of Orenburg, Russia (51.7727°N, 55.0988°E, GMT+05:00), for the south-eastern facade of the building with an azimuth of 120° on 15 June as the day with the maximum intensity of solar radiation in Orenburg, chosen according to the data on the annual variation of direct normal, scattered horizontal and total horizontal solar radiation under clear skies given in¹. For these conditions, the optimal filter grating tilt angle of 42° was obtained [26] by approximating the Sun's trajectory from 7 h 49 min to 12 h 19 min. The azimuths A and standing heights h of the Sun on the calculated day at each half-hour of daylight relative to the time of coincidence of the Sun's azimuths and the window $A = A_o = 120^\circ$ are given in Table 1. The angles of incidence Θ and the difference α between the azimuths of the Sun and the window are calculated.

The characteristic angle of the filter is determined by formula (1): $\Theta_c = 40.89^\circ$. Numerical modelling using formulas (2) was carried out at the minimum and maximum theoretical filter transmission coefficients $\tau_{\min} = 0$ and $\tau_{\max} = 0.5$ in order to obtain the same widths of all bands (as in Fig. 1): $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ mm, for which the mean incidence angle is set with the value $\Theta_{av} = 28.9611^\circ$.

The theoretical light transmission coefficients were calculated using formula (7) and corrected using formula (6) for a grating filter with bands of a chromogenic material with a ligand-exchange thermochromic system integrated into the thin film, which has a gradual decrease

¹ Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Issue 12. Tatar ASSR, Ulyanovsk, Kuibyshev, Penza, Saratov and Orenburg regions. L., Gidrometeoizdat, 1988; 647.

Table 1. Calculation of transmission coefficient for a window with azimuth 120°

Time, h min	A , deg.	h , deg.	α , deg.	Θ , deg.	Transmission coefficient					
					Coloured condition			Uncoloured state		
					τ strainer	τ_{cor} strainer	τ_{cor} conventional	τ filter	τ_{cor} strainer	τ_{cor} conventional
6:49	69.40	13.53	−50.60	51.89	0.0631	0.0325	0.0232	0.5442	0.2804	0.2782
7:19	74.90	17.95	−45.10	47.82	0.1504	0.0818	0.0245	0.5644	0.3070	0.2937
7:49	80.43	22.48	−39.57	44.58	0.2116	0.1187	0.0252	0.5787	0.3247	0.3030
8:19	86.07	27.09	−33.93	42.38	0.2512	0.1433	0.0257	0.5878	0.3354	0.3081
8:49	91.92	31.73	−28.08	41.37	0.2711	0.1557	0.0258	0.5924	0.3402	0.3101
9:19	98.09	36.35	−21.91	41.65	0.2707	0.1552	0.0258	0.5924	0.3396	0.3096
9:49	104.71	40.90	−15.29	43.19	0.2456	0.1393	0.0255	0.5865	0.3327	0.3063
10:19	111.98	45.30	−8.02	45.85	0.1827	0.1014	0.0250	0.5719	0.3174	0.2996
10:49	120.08	49.47	0.08	49.47	0.045	0.0240	0.0240	0.5400	0.2880	0.2880
11:19	129.29	53.29	9.29	53.85	0.2156	0.1074	0.0224	0.5796	0.2886	0.2689
11:49	139.82	56.60	19.82	58.81	0.3861	0.1706	0.0199	0.6191	0.2736	0.2387
12:19	151.85	59.21	31.85	64.23	0.4267	0.1522	0.0161	0.6286	0.2243	0.1927

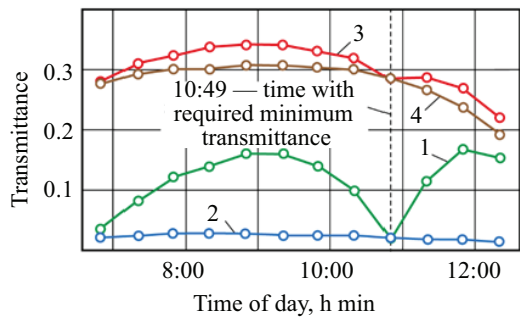


Fig. 2. Transmittance time characteristics: 1 (filter) and 2 (layer) in the coloured state; 3 (filter) and 4 (layer) in the uncoloured state

in transmittance from 54 to 4.5 % in the visible range and from 22.5 to 4.5 % in the infrared range as the temperature increases from 25 to 85 °C [12]. This material is chosen for both gratings, i.e. $\tau_{chr1} = \tau_{chr2} = 0.045$ and $\tau_{chr1} = \tau_{chr2} = 0.54$ in the coloured and uncoloured states, respectively. For the conventional smart window using the same chromogenic material, the corrected light transmission coefficients were calculated using formula (6) by substituting $\tau = 0.045$ and $\tau = 0.54$ in the coloured and uncoloured states, respectively. Correction of transmittance coefficients according to formula (6) was carried out at $\alpha_a = 0.02 \text{ mm}^{-1}$, $s_z = 12 \text{ mm}$ (three 4 mm thick glasses) and $n = 1.5$. The results of calculations are given in Table 1.

Fig. 2 shows the temporal theoretical (line 1) and corrected (line 2) light transmission characteristics of lattice filters and the corrected (line 3) characteristics of conventional smart windows fully covered by the ac-

tive layer. The characteristics are given for the coloured and uncoloured states of the thermochromic bands and layers.

Fig. 3 shows the plan and section of the room with a window in the south-eastern facade of the building for the cDA calculation and the results of the calculation. The length (depth), width and height of the calculated room are 5.5, 4 and 2.6 m. The width and height of the window are 2 and 1.5 m, and the height of the sill is 0.8 m. The reflection coefficients of the ceiling, walls and floor were assumed to be 0.8 (light grey), 0.6 (medium grey) and 0.4 (dark grey). cDA was calculated according to formula (8) at illuminance threshold of 500 lux for 12 design points on a horizontal plane at a height of 0.8 m from the floor. Horizontal illuminance is calculated by formula (9) on the basis of long-term data on direct normal and diffuse horizontal radiation for the city of Orenburg¹. Since the radiation data are given for solar time in every hour starting from 6 h 30 min, and the difference between solar and daylight saving time in Orenburg (GMT+05:00) is 1 h 20 min, all calculations were performed for working hours from 7 h 50 min to 16 h 50 min. For comparison purposes, cDA values for lattice and conventional smart windows have been determined. The cDA calculations take into account that the selected thermochromic material switches from an uncoloured to a coloured state when the temperature exceeds 25 °C — for June, July and August with average maximum temperatures of 27.5, 29.0 and 27.4 °C respectively, the light transmission coefficients in the coloured state of the material were adopted. In other months the coefficients are calculated for the uncoloured state.

For the lattice smart window, the diffuse transmittance coefficient τ_d , calculated using formula (10), is 0.1681 and 0.3651 in the coloured and uncoloured states, respectively. For the conventional smart window, the corrected forward transmittance coefficients are calculated by formula (6) at actual incidence angles at $\tau = \tau_{chr} = 0.045$ and $\tau = \tau_{chr} = 0.54$ in the coloured and uncoloured states, respectively. And the diffuse transmittance coefficients of 0.0277 and 0.3325 for the conventional smart window in the coloured and uncoloured states, respectively, are obtained by formula (10) when substituting the values $\tau = \tau_{chr} = 0.045$ and $\tau = \tau_{chr} = 0.54$ instead of the product of the first two expressions in parentheses.

The albedo value of the ground surface is assumed to be 0.8 in months with snow cover from November to March and 0.3 for other months. To determine the solid angle of view of the sky according to formula (11), the excess of the height H_w of the window over the calculated horizontal plane is 1.5 metres. The distances D between each design point and the centre of the window element above the design horizontal plane (in our case, the centre of the window) and the angles B between the lines passing through these two points and the normal to the window are given in Table 2. Fig. 3 shows

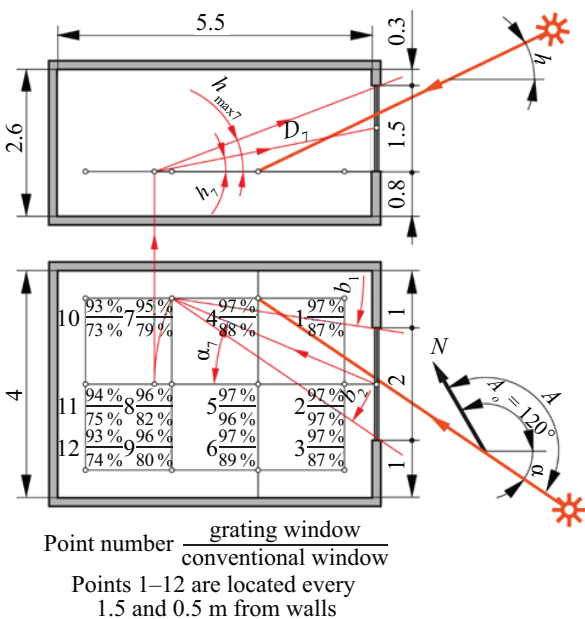


Fig. 3. Plan and section of the room for cDA calculation and calculation results: A and A_o — azimuths of the Sun and the window; α — difference of azimuths of the Sun and the window; h — Sun's standing height

Table 2. Calculation of autonomy of continuous natural light cDA

Point number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D , m	1.76	0.95	1.76	2.66	2.21	2.66	3.94	3.64	3.94	5.33	5.12	5.33
B , deg.	71.8	53.6	71.8	39.7	20.5	39.7	25.5	11.8	25.5	18.5	8.6	18.5
Ω , av.	0.302	1.973	0.302	0.326	0.575	0.326	0.174	0.222	0.174	0.1	0.113	0.1
$h_{\max}$, deg.	42.1	67.0	42.1	29.8	35.3	29.8	21	22.4	21	15.8	16.3	15.8
b_1 , deg.	166	63	43	134	95	71	128	105	86	125	109	94
b_2 , deg.	196	177	73	169	145	106	154	136	112	145	131	114
cDA of the filter, %	97	97	97	97	97	97	95	96	96	93	94	93
cDA of the layer, %	87	97	87	88	96	89	79	82	80	73	75	74

the procedure for determining the design parameters for point 7: distance D_7 , azimuthal angles of the beginning b_1 and end b_2 of insolation (from the north direction), the angle of limitation of the Sun’s standing height $h_{\max}$ and angles h_7 and α_7 for calculation by the formula $B = \arccos(\cosh \cos \alpha)$.

The remaining parameters for calculation by formula (9) are: $F_w = 3 \text{ m}^2$, $F = 93.4 \text{ m}^2$, $R_f = 0.5$, $R_c = 0.7$ and $R = 0.6$. The sky factor for the window $C = 39$ was determined according to [32] at a shading angle of 0° , i.e. in the absence of an opposing building with a façade higher than the horizontal level of the window centre. At these parameters, the second multiplier in formula (9) is 2.57. Since the study¹ provides data on direct normal, diffuse horizontal and total horizontal solar radiation in W/m^2 , a conversion factor of $1 \text{ W/m}^2 = 120 \text{ lux}$ [33] was used to convert to the illuminance unit. The results of cDA calculation by formula (9) are presented in Fig. 3 and Table 2.

CONCLUSION AND DISCUSSION

In the hottest period of the year (for the design area it is June–August), when the thermochromic material of the filter strips is in the active (coloured) state, the temporal characteristic of light transmission (line 1 in Fig. 2) of the grating smart window has a minimum exactly at the set time of 10 h 49 min, at the rest of the time the transmittance is significantly higher than that of the traditional smart window, which during the working hours the light transmission coefficient (line 2) practically does not change and depends only on the change in the angles of incidence of sunlight on the window. Line 1 shows that the grating filter has angle selectivity of transmittance, since the angles of incidence of the rays change continuously during the day. Since the theoretical minimum light transmission was initially set to zero, the filter completely blocks direct rays at the designated time, allowing only scattered rays through. Characteristics are built in the first half of the working day, when the south-east window of the calculation room gets direct sunlight, to protect against which the proposed optical filter is designed. Increased light transmittance of the filter in comparison with a conventional window is provided due to the passage of diffused light of the sky while blocking direct rays, which significantly increases the comfort of lighting — at high levels of illumination reduces the likeli-

hood of glare from direct solar radiation. It also contributes to some reduction in room temperature and corresponding savings on air conditioning. The temporal characteristics of the grille and traditional smart window (lines 3 and 4 in Fig. 2) show the advantage of applying the filter also during the rest of the year, when the filter is in an uncoloured state — its light transmission is slightly higher.

The results of the cDA continuous natural light autonomy calculation for 12 months (Table 2, Fig. 3) confirm the year-round efficiency of the grille window compared to the traditional smart window when using the same chromogenic material. The working horizontal plane at a height of 80 cm from the floor has very high illuminance values at the grille window over the entire room area — from 93 to 97 % of the working time of the year it exceeds the established threshold of 500 lx, i.e. the percentage distribution is uniform over the entire depth of the room, and at the expense of the transmission of comfortable diffused sky light. It should be borne in mind that the calculations are made for solar radiation data under clear skies, including winter months (the average duration of sunshine per year in Orenburg is 2,198 h). In a room with a conventional window, 97 % of the working time with exceeding the established illuminance threshold is observed only in one calculation point 2 directly at the window, in the depth of the room the index drops to 73 %. During the heating period, the louvred smart window lets in more solar radiation, which contributes to some savings in heating costs.

Due to the novelty of lattice optical filters and smart windows based on them, similar studies by other authors have not been carried out, and there was no methodology for modelling natural lighting in rooms with their application. In a previous work [30], the authors initiated the development of the method and verified it by numerical modelling for a room with a double-glazed window in the presence of an opposing building. In the present study, the calculation formulae are modified and refined, so the data obtained are different. According to the new calculations, the percentage distribution along the room depth of the zones with exceeded illuminance threshold during the annual working time is much more uniform, also for the room with a conventional smart window.

The results provide the research community with a general modelling method for a new type of smart window that provides angle selective light transmission control without the use of blinds and similar additional devices. From a practical point of view, ergonomic properties will be improved (no need for manual or automatic control, installation and operation of additional devices), as well as environmental (reduced influence of dust and other atmospheric phenomena, no materials to dispose of after use) and aesthetic (especially in large area panoramic windows

where the use of blinds etc. is difficult) factors. Lattice smart-windows are recommended to be used at east, south and west azimuths of orientation of facades of buildings with the expected mode of work in the daytime to achieve more comfortable conditions of natural light at workplaces and minimize energy consumption and HVAC costs. The research will be continued by the authors in order to study in more detail the annual performance of the grating filter operation and experimental testing of real smart-window models in full-scale conditions.

REFERENCES

1. Mahdavi A. In the matter of simulation and buildings: some critical reflections. *Journal of Building Performance Simulation*. 2019; 13(1):26-33. DOI: 10.1080/19401493.2019.1685598
2. Kim Y.S., Shin H.S., Park C.S. Model predictive lighting control for a factory building using a deep deterministic policy gradient. *Journal of Building Performance Simulation*. 2022; 15(2):174-193. DOI: 10.1080/19401493.2021.2019310
3. Da Silva P.C., Leal V., Andersen M. Occupants' behaviour in energy simulation tools: lessons from a field monitoring campaign regarding lighting and shading control. *Journal of Building Performance Simulation*. 2015; 8(5):338-358. DOI: 10.1080/19401493.2014.953583
4. Tabunshchikov Yu.A. Window as an intellectual element of the building structure. *Energoberezhenie*. 2008; 2:16-21. EDN IJPYSZ. (rus.).
5. Casini M. *Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2016.
6. Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017; 159:26-51. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.08.026
7. Desideri U., Asdrubali F. *Handbook of Energy Efficiency in Buildings*. 1 Ed. Butterworth-Heinemann, 2018; 858.
8. Casini M. Active dynamic windows for buildings : a review. *Renewable Energy*. 2018; 119:923-934. DOI: 10.1016/j.renene.2017.12.049
9. Kheiri F. A multistage recursive approach in time- and frequency-domain for thermal analysis of thermochromic glazing and thermostatic control systems in buildings. *Solar Energy*. 2020; 208:814-829. DOI: 10.1016/j.solener.2020.08.019
10. Zhao X., Mofid S.A., Jelle B.P., Tan G., Yin X., Yang R. Optically-switchable thermally-insulating VO₂-aerogel hybrid film for window retrofits. *Applied Energy*. 2020; 278:115663. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115663
11. Kong M., Egbo K., Liu C.P., Hossain M.K., Tso C.Y., Chao C.Y.H. et al. Rapid thermal annealing assisted facile solution method for tungsten-doped vanadium dioxide thin films on glass substrate. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020; 833:155053. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155053
12. Seeboth A., Ruhmann R., Mühling O. Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control. *Materials*. 2010; 3(12):5143-5168. DOI: 10.3390/ma3125143
13. Ogawa S., Ono Y., Takahashi I. Glass transition behavior of perpendicularly aligned thermotropic liquid crystalline phases consisting of long-chain trehalose lipids. *Journal of Molecular Liquids*. 2020; 298:111954. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111954
14. Szukalski A., Korbust A., Ortyl E. Structural and light driven molecular engineering in photochromic polymers. *Polymer*. 2020; 192:122311. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122311
15. Colombi G., Cornelius S., Longo A., Dam B. Structure model for anion-disordered photochromic Gadolinium Oxyhydride thin films. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2020; 124(25):13541-13549. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c02410
16. Liu J., Lu Y., Li J., Lu W. UV and X-ray dual photochromic properties of three CP. based on a new viologen ligand. *Dyes and Pigments*. 2020; 177:108276. DOI: 10.1016/j.dyepig.2020.108276
17. Chen P.W., Chang C.T., Ko T.F., Hsu S.C., Li K.D., Wu J.Y. Fast response of complementary electrochromic device based on WO₃/NiO electrodes. *Scientific Reports*. 2020; 10(1). DOI: 10.1038/s41598-020-65191-x
18. Li W., Zhang X., Chen X., Zhao Y., Wang L., Chen M./ et al. Lithiation of WO₃ films by evaporation method for all-solid-state electrochromic devices. *Electrochimica Acta*. 2020; 355:136817. DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136817
19. Zhang W., Chen X., Wang X., Zhu S., Wang S., Wang Q. Pulsed electrodeposition of nanostructured polythiophene film for high-performance electrochromic devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2021; 219:110775. DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110775

20. Ismail A.H., Yahya N.A.M., Mahdi M.A., Yaacob M.H., Sulaiman Y. Gasochromic response of optical sensing platform integrated with polyaniline and poly(3,4-ethylenedioxythiophene) exposed to NH₃ gas. *Polymer*. 2020; 192:122313. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122313
21. Hu C.-W., Nishizawa K., Okada M., Yamada Y., Watanabe H., Tajima K. Roll-to-roll production of Prussian blue/P. nanocomposite films for flexible gasochromic applications. *Inorganica Chimica Acta*. 2020; 505:119466. DOI: 10.1016/j.ica.2020.119466
22. Solovyov A.K. Modern approaches to normalizing natural lighting of residential buildings. Research results. *Light and Engineering*. 2020; 4:5-10. EDN RWIEAU. (rus.).
23. Patent RU No. 2509324. *Method for regulating directional light transmission* / R.S. Zakirullin; appl. No. 2012130148/28 05.11.2010; publ. 03.10.2014. Bull. 7; 3. (rus.).
24. Patent RU No. 2677069. *Method for angular regulation of directional light transmission of a window* / R.S. Zakirullin; appl. No. 2017144699 12.07.2017; public. 15.01.2019. Bull. 2; 2. (rus.).
25. Zakirullin R.S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation. *Journal of the Optical Society of America A*. 2018; 35(9):1592. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001592
26. Zakirullin R.S. A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2020; 142(1). DOI: 10.1115/1.4044059
27. Zakirullin R.S. Chromogenic materials in smart windows for angular-selective filtering of solar radiation. *Materials Today Energy*. 2020; 17:100476. DOI: 10.1016/j.mtener.2020.100476
28. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Daylighting dynamic control by smart window with grating optical filter. *Light and Engineering*. 2021; 3:47-51. EDN SLEWEW. (rus.).
29. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Optimization of natural lighting and insolation in buildings with curved facades. *Academia. Architecture and Construction*. 2021; 2:111-116. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-111-116. EDN KFAAUZ. (rus.).
30. Zakirullin R.S. Typology of Buildings with Grating Smart Windows with Azimuthally Optimized Light Transmission. *Journal of Architectural Engineering*. 2022; 28(4). DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000566
31. 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
32. Hopkinson R.G., Longmore J., Petherbridge P. An Empirical Formula for the Computation of the Indirect Component of Daylight Factor. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*. 1954; 19(7):201-219. DOI: 10.1177/147715355401900701
33. Michael P.R., Johnston D.E., Moreno W. A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance. *Journal of Measurements in Engineering*. 2020; 8(4):153-166. DOI: 10.21595/jme.2020.21667

Received March 28, 2024.

Adopted in revised form on March 28, 2024.

Approved for publication on March 28, 2024.

B I O N O T E S : **Rustam S. Zakirullin** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydromechanic; **Orenburg State University**; 13 prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation; chief researcher; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 149818, Scopus: 55419487000, ResearcherID: B-5570-2015, ORCID: 0000-0002-9954-3480; rustam.zakirullin@gmail.com;

Irina A. Odenbakh — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydromechanic; **Orenburg State University**; 13 prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation; senior research; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 631027, Scopus: 57211785954, ResearcherID: AAH-4132-2020, ORCID: 0000-0002-9284-2162; irina.odembakh23@gmail.com;

Vladimir A. Girin — senior lecturer of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydromechanic; **Orenburg State University**; 13 prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation; lead engineer; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; ResearcherID: GZG-4218-2022, ORCID: 0000-0002-1323-9235; vladimirgirin@gmail.com;

Evgeniya V. Pikalova — lecturer of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Hydromechanic; **Orenburg State University**; 13 prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation; ID RSCI: slyotina.evgenia@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Rustam S. Zakirullin — idea, scientific leadership, research concept, collection and processing of material, development of method, numerical simulations, writing and scientific editing of article, design of drawings, final conclusions.

Irina A. Odenbakh — participation in collection and processing of material, in conducting numerical simulations, in writing article.

Vladimir A. Girin — participation in collection and processing of material, in numerical simulations.

Evgeniya V. Pikalova — participation in collection and processing of material, in numerical simulations.

The authors declare no conflict of interest.