

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 132–139.

Academia. Architecture and Construction, no. 3, pp. 132–139.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 697.132.3

DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-132-139

Моделирование притока тепла от солнечной радиации через решёточные смарт-окна

Закируллин Рустам Сабирович (Оренбург). Доктор технических наук, доцент, советник РААСН. Оренбургский государственный университет (Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, 13. ОГУ). Эл.почта: rustam.zakirullin@gmail.com

Оденбах Ирина Александровна (Оренбург). Кандидат педагогических наук. Оренбургский государственный университет (Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, 13. ОГУ). Эл.почта: 79128486201@yandex.com

Гунько Никита Максимович, Горьков Никита Алексеевич, Гирин Владимир Александрович, Пикалова Евгения Васильевна (Оренбург). Оренбургский государственный университет (Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, 13. ОГУ)

Аннотация. Разработан метод расчёта притока тепла от солнечной радиации для помещений с решёточными смарт-окнами с целью дальнейшей оценки влияния на функционирование систем ОВК. Получены формулы для расчёта коэффициентов пропускания прямой и диффузной солнечной радиации через смарт-окна с учётом геометрических параметров двух решёток фильтра. На основе коэффициентов пропускания рассчитывается первичная составляющая теплопритока от солнечной радиации, непосредственно прошедшая через решёточное смарт-окно, в виде суммы прямой и диффузной радиации. Вторичная составляющая теплопритока от поглощённой оконными стеклами солнечной радиации в виде излучения, а также поток тепла за счёт теплопередачи, рассчитываются известными методами, как и для помещений с обычными смарт-окнами. Разработанный метод апробирован с помощью численного моделирования в условиях города Оренбурга для одного выбранного хромогенного материала для обеих решёток фильтра. Предварительно выявлены некоторые преимущества и недостатки решёточных смарт-окон по сравнению с обычными.

Ключевые слова: приток тепла, солнечная радиация, смарт-окно, решёточный фильтр, хромогенные материалы, коэффициент пропускания, моделирование

Для цитирования. Закируллин Р.С., Оденбах И.А., Гунько Н.М., Горьков Н.А., Гирин В.А., Пикалова Е.В. Моделирование притока тепла от солнечной радиации через решёточные смарт-окна // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 3. – С. 132–139. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-132-139.

Modeling the Heat Gain from Solar Radiation through Grating Smart Windows

Zakirullin Rustam S. (Orenburg). Doctor of Sciences in Technology, Docent, Adviser of RAACS. Orenburg State University (13, Prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russia. OSU). 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). E-mail: 79128486201@yandex.com

Gun'ko Nikita M., Gor'kov Nikita A., Girin Vladimir A., Pikalova Evgeniya V. (Orenburg). Orenburg State University (13, Prospect Pobedy, Orenburg, 460018, Russia. OSU).

Abstract. A method has been developed for calculating the heat gain from solar radiation for rooms with grating smart windows in order to further assess the impact on the operation of HVAC systems. Equations are obtained for calculating the transmittances of direct and diffuse solar radiation through smart windows, taking into account the geometric parameters of two filter gratings. Based on the transmittances, the primary component of the heat gain from solar radiation, which directly passed through the grating smart window, is calculated as the sum of direct and diffuse radiation. The secondary component of heat gain due emission of radiation absorbed by window glass, as well as the heat flux due to heat transfer, are calculated by known methods as for rooms with conventional smart windows. The developed method was tested using numerical simulation in the conditions of Orenburg for one selected chromogenic material for both filter gratings. Some advantages and disadvantages of grating smart windows compared to conventional ones have been identified.

Keywords: heat gain, solar radiation, smart window, grating filter, chromogenic materials, transmittance, modeling

For citation. Zakirullin R.S, Odenbakh I.A., Gun'ko N.M., Gor'kov N.A., Girin V.A., Pikalova E.V. Modeling the Heat Gain from Solar Radiation through Grating Smart Windows. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2023, no. 3, pp. 132–139, doi: 10.22337/2077-9038-2023-3-132-139.

Приток тепла от солнечной радиации через окна помещения круглый год оказывает влияние на изменение значений микроклиматических параметров и функционирование систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВК). Исследования с целью поиска оптимальных конструкций и размеров окон и их размещения в ограждающих конструкциях, ограничения попадания прямой солнечной радиации в помещение, предотвращения слепимости и перенаправления потоков света вглубь помещения с помощью солнцезащитных и перенаправляющих устройств, в том числе голографических оптических элементов (ГОЭ), разработки современных подходов к нормированию естественного освещения проводятся в НИУ МГСУ [1; 2]. В НИИСФ РААСН проводятся мероприятия по обеспечению естественного и искусственного освещения, инсоляции и солнцезащиты при проектировании, реконструкции и эксплуатации зданий [3–5], разрабатываются системы освещения для энергоэффективных зданий [6; 7] и общероссийские, региональные и отраслевые нормы по естественному и искусственному освещению и инсоляции.

Контроль проходящей в помещение солнечной энергии в виде тепла через обычные окна со строительным стеклом осуществляется путём применения жалюзи, ГОЭ и т.п. дополнительных устройств перераспределения световых потоков [8–11]. Эти способы оптимизации естественного освещения, инсоляции и солнцезащиты способствуют удовлетворению нормативных гигиенических требований, но из-за использования дополнительных устройств приводят к удорожанию производства, монтажа и эксплуатации комбинированных оконных систем, затрате электроэнергии в случае автоматического управления этими устройствами, ухудшению эргономичности в случае ручного управления устройствами и из-за потребности в уходе за ними (чистка и т.п.), снижению эстетичности световых проёмов, особенно в панорамных окнах, снижению экологичности из-за отходов при производстве и утилизации, влияния пыли и других атмосферных явлений, снижению безопасности при электрическом управлении автоматическими жалюзи и т.п.

Более перспективными являются смарт-окна различного типа [12–14], полностью покрытые активным хромогенным слоем, меняющим оптические свойства светопропускания под воздействием окружающей среды или электрического тока. Преимущества и недостатки смарт-окон кратко рассмотрены в [15], там же представлены смарт-окна нового типа – с решёточными оптическими фильтрами, рассмотренными в [16–19]. Современное архитектурное проектирование немислимо без использования компьютерного пространственного комплекса «Моделирование характеристик здания» (англ. – Building Performance Simulation, BPS), который значительно облегчает всестороннюю количественную оценку тепловых, световых, акустических характеристик и характеристик воздушного потока здания на основе фундаментальных физических принципов и проверенной инженерной практики [20; 21]. Такие компьютерные программы BPS, как Radiance, Daysim, IDA ICE, Python, EnergyPlus, DALEC и др., разработанные для моделирования, анализа и прогнозирования всесторонних характеристик здания, применимы для помещений с обычными окнами и обычными смарт-окнами, однако для решёточных смарт-окон [15–19] соответствующие функции отсутствуют из-за их новизны.

В данной статье на основе ранее полученных результатов [15–19] рассмотрен метод расчёта притока тепла от солнечной радиации для помещений с решёточными смарт-окнами с целью дальнейшей оценки влияния на функционирование систем ОВК. Для достижения комфортного температурного режима и минимизации энергопотребления и затрат на ОВК необходимо определить количество солнечной энергии, поступающей через решёточные смарт-окна, предназначенные в основном для контроля светопропускания, однако влияющие также и на пропускание солнечной энергии в инфракрасном диапазоне. Рассмотрим только методологию, которая отличается от таковой для всех других типов окон, включая традиционные смарт-окна. С учётом закона косинусов Ламберта и площади окна для расчёта суммарной прямой и диффузной солнечной радиации, непосредственно прошедшей через

решётчатое смарт-окно, в качестве первичной составляющей теплопритока от солнечной радиации получаем:

$$I_w = F_w(DNI\tau_{cor} + 0,5DNI\tau_d + 0,5rGHI\tau_d), \quad (1)$$

где I_w – поток солнечной энергии через решётчатое смарт-окно за один расчётный час, Вт ч; F_w – площадь окна, м²; DNI, DHI и GHI – прямая нормальная, диффузная горизонтальная и суммарная горизонтальная солнечная радиация, соответственно, Вт ч/м²; τ_{cor} – скорректированный коэффициент пропускания прямой солнечной энергии; τ_d – коэффициент диффузного пропускания солнечной энергии; r – альbedo поверхности земли.

Множители 0,5 получены в соответствии с изотропной моделью рассеянного излучения путём деления пополам диффузной горизонтальной освещённости DHI при переходе к диффузной освещённости вертикального окна и деления пополам общей горизонтальной освещённости GHI для определения её части, отражённой от земли, падающей на вертикальное окно. Данные о значениях солнечной радиации, полученные по результатам многолетних наблюдений, для разных районов Земли приводятся в соответствующих справочниках, также их можно получить в виде файла ТМУ (Typical Meteorological Year – типичный метеорологический год). Для расчёта скорректированного с учётом отражения по формулам Френеля, а также поглощения по закону Бугера-Ламберта, коэффициента пропускания τ_{cor} солнечной энергии после уточнения формулы, приведённой ранее в [15–19], получаем для окна с тройным остеклением:

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

где τ – теоретический коэффициент пропускания прямой солнечной энергии; Θ – угол падения солнечных лучей, градус; Θ_n – соответствующий угол преломления, градус; α_a – натуральный коэффициент поглощения стекла (при расчёте солнечной энергии берётся среднее значение в диапазоне длин волн примерно от 300 до 2500 нм), мм⁻¹; n – показатель преломления стекла; s_Σ – общая толщина всех стёкол, мм. Показатель степени второго множителя равен 2, 4 и 6 для окон с одинарным, двойным и тройным остеклением соответственно.

Теоретический коэффициент пропускания прямой солнечной энергии решётчатыми фильтрами с хромогенными полосами как в окрашенном (затемнённом), так и в обесцвеченном состоянии хромогенных полос, в диапазонах с минимальным, максимальным и уменьшающимся/возрастающим коэффициентом пропускания вычисляется по формулам [16]:

$$\tau_{min} = \{c_1 + c_2\tau_{chr1} - c_4(1 - \tau_{chr2})\} / (c_1 + c_2);$$

$$\tau_{max} = \{c_1\tau_{chr2} + c_2\tau_{chr1}\tau_{chr2} + c_3(1 - \tau_{chr2})\} / (c_1 + c_2); \quad (3)$$

$$\tau = \frac{(\Delta - 0,5c_2 + 0,5c_3)(1 - \tau_{chr1} - \tau_{chr2} + \tau_{chr1}\tau_{chr2}) + c_1\tau_{chr2} + c_2\tau_{chr1}\tau_{chr2} + c_3(\tau_{chr1} - \tau_{chr1}\tau_{chr2})}{c_1 + c_2},$$

где τ_{chr1} и τ_{chr2} – коэффициенты светопропускания (при нормальном падении) хромогенных полос входной и выходной решёток в окрашенном или обесцвеченном состоянии; c_1 и c_3 – ширины пропускающих полос входной и выходной решёток фильтра, мм; c_2 и c_4 – ширины хромогенных полос входной и выходной решёток фильтра, мм; Δ – сдвиг между следами входных решёток на поверхности выходных решёток при характеристическом угле фильтра Θ_c показывает сдвиг входной и выходной решёток относительно друг друга, определяется трассировкой луча, проходящего через центры полос обеих решёток) и произвольном угле падения.

Угол падения солнечных лучей на вертикальное окно в формуле (2) в произвольный момент времени рассчитывается по формуле:

$$\Theta = \arccos(\cosh\cos\alpha), \quad (4)$$

где h – высота стояния солнца, градус; α – разность между азимутами солнца и окна в данный момент времени, градус. Высота стояния и азимут солнца вычисляются для любого района по одной из многочисленных онлайн-калькуляторов (например, <https://www.suncalc.org/>). Соответствующий угол преломления Θ_n рассчитывается по закону Снелла.

Полосы решёток фильтра, в отличие от горизонтальных и вертикальных жалюзи, могут быть наклонены под любым углом γ для адаптации к траектории Солнца относительно окна. Методика расчёта оптимальных значений угла наклона, характеристического угла и ширин всех полос фильтра подробно описаны в [15–19]. Сдвиг Δ между следами входных решёток на поверхности выходных решёток в формуле (3) рассчитывается как:

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

где s – расстояние между решётками фильтра, мм; q – проекция реального угла падения Θ солнечных лучей на плоскость, перпендикулярную полосам решёток, мм. Для окна с двойным или тройным остеклением рассчитывается по формуле:

$$\theta = \arctan \left\{ \sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{\tan^2(\Theta - |\alpha|)}{\cos^2 \alpha}} \cos \left[\gamma + \arctan \frac{\tan \alpha \cos \alpha}{\tan(\Theta - |\alpha|)} \right] \right\}. \quad (6)$$

Коэффициент диффузного пропускания солнечной энергии τ_d в формуле (1) в отличие от формулы, приведённой ранее в [18], рассчитаем как:

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

Попадающая внутрь помещения часть поглощённой оконными стеклами солнечной радиации как вторичная составляющая теплопритока от неё, а также поток тепла за счёт теплопередачи через окно из-за разницы наружной и внутренней температуры рассчитываются известными методами, как и для помещений с обычными окнами, с учётом соотношения пло-

щадей окон с пропускающими и непропускающими (хромогенными) полосами обеих решёток, коэффициентов поглощения, излучательной способности и теплопроводности материалов тонкоплёночных полос решёток и их толщин.

Для смарт-окна с хромогенными решётками расчёт значений притока тепла от солнечной радиации по формуле (1) следует выполнять, учитывая, что такие материалы имеют разные коэффициенты пропускания в окрашенном и отбелённом состояниях. Для оптимального годового регулирования светопропускания такие окна [12–14] переключаются между этими двумя режимами в зависимости от изменения наружной температуры и/или других параметров окружающей среды, либо принудительно (электрохромные окна и т.п., управляемые электрически).

Учёт внутреннего притока тепла от освещения и находящихся в помещении людей и оборудования для помещений с решёточными смарт-окнами ничем не отличается от такого для обычных помещений. Если напротив расчётного фасада находятся близко расположенные здания, то слагаемые рассеянного и отражённого от земли излучения в формуле (1) корректируются известными методами. Для помещения с несколькими окнами суммируются значения всех показателей приходящей солнечной энергии, рассчитанные для каждого окна с учётом его типа (включая и обычные окна без решёточных фильтров), азимута и других влияющих параметров.

Численное моделирование выполнено по формулам (1)–(7) для условий города Оренбурга, Россия (51,7727° с. ш., 55,0988° в. д., GMT+05:00) для юго-восточного фасада здания с азимутом 120° для 15 июня как дня с максимальной интенсивностью солнечной радиации в Оренбурге, выбранного по данным о годовом изменении прямой нормальной, рассеянной горизонтальной и суммарной горизонтальной

солнечной радиации при ясном небе [22]. Для этих условий оптимальный угол наклона решеток фильтра 42° получен [17] путём аппроксимации траектории Солнца с 7 ч. 49 мин. до 12 ч. 19 мин. Азимуты A и высоты стояния h Солнца в расчётный день через каждые полчаса светового дня относительно времени 10 ч. 49 мин. совпадения азимутов Солнца и окна $A = A_0 = 120^\circ$ приведены в таблице 1. Рассчитаны углы падения Θ и разности α между азимутами Солнца и окна.

Характеристический угол фильтра определён по формуле (6) для обеспечения минимума светопропускания окна в назначенное время совпадения азимутов окна и Солнца – 10 ч. 49 мин.: $Q_c = 40,89^\circ$. Численное моделирование по методам, приведенным в [15–19], проведено при минимальном и максимальном заданных теоретических коэффициентах пропускания фильтра $\tau_{\min} = 0$ и $\tau_{\max} = 0,5$ с целью получения одинаковых ширин всех полос: $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм.

Теоретические коэффициенты светопропускания рассчитаны по формулам (3) и скорректированы по формуле (2) для решёточного фильтра с полосами из хромогенного материала с интегрированной в тонкую плёнку 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 (для солнечной энергии) при повышении температуры от 25 °С до 85 °С [23]. Когда этот материал выбран для обеих решеток, то $\tau_{\text{chr1}} = \tau_{\text{chr2}} = 0,045$ и $\tau_{\text{chr1}} = \tau_{\text{chr2}} = 0,225$ в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. Для обычного смарт-окна, полностью покрытого активным слоем из того же хромогенного материала, скорректированные коэффициенты светопропускания рассчитаны по формуле (2) при подстановке $\tau = 0,045$ и $\tau = 0,225$ в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. Корректировка коэффициентов пропускания по формуле (2) проведена при $\alpha_a = 0,02$ мм⁻¹, $s_{\Sigma} = 12$ мм (три стекла тройного остекления

Таблица 1. Расчет коэффициента пропускания для 15 июня

Время, ч. : мин.	A, град.	h, град.	α, град.	Θ, град.	Коэффициент пропускания (окрашенное состояние)		
					τ (фильтр)	τ _{cor} (фильтр)	τ _{cor} (слой)
6:49	69,40	13,53	-50,60	51,89	0,063	0,032	0,023
7:19	74,90	17,95	-45,10	47,82	0,150	0,082	0,024
7:49	80,43	22,48	-39,57	44,58	0,212	0,119	0,025
8:19	86,07	27,09	-33,93	42,38	0,251	0,143	0,026
8:49	91,92	31,73	-28,08	41,37	0,271	0,156	0,026
9:19	98,09	36,35	-21,91	41,65	0,271	0,155	0,026
9:49	104,71	40,90	-15,29	43,19	0,246	0,139	0,026
10:19	111,98	45,30	-8,02	45,85	0,183	0,101	0,025
10:49	120,08	49,47	0,08	49,47	0,045	0,024	0,024
11:19	129,29	53,29	9,29	53,85	0,216	0,107	0,022
11:49	139,82	56,60	19,82	58,81	0,386	0,171	0,020
12:19	151,85	59,21	31,85	64,23	0,427	0,152	0,016

по 4 мм толщиной каждое) и $n = 1,5$. Результаты расчётов для 15 июня приведены в таблице 1. Минимум светопропускания решётчатого смарт-окна обеспечивается в назначенное при расчёте характеристического угла фильтра время совпадения азимутов окна и Солнца – в 11 ч. 49 мин. А светопропускание обычного смарт-окна со сплошным хромогенным слоем меняется лишь в зависимости от изменения угла падения, что свидетельствует об отсутствии угловой селективности светопропускания, в отличие от решётчатого смарт-окна. Аналогичные расчёты проведены для 15 числа каждого месяца.

Для решётчатого смарт-окна коэффициент диффузного пропускания $\tau_{\text{д}}$, рассчитанный по формуле (7), составляет 0,337 и 0,463 в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. Для обычного смарт-окна скорректированные коэффициенты прямого пропускания рассчитаны по формуле (2) при фактических углах падения при $\tau = \tau_{\text{chr}} = 0,045$ и $\tau = \tau_{\text{chr}} = 0,225$ в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно. А коэффициенты диффузного пропускания 0,028 и 0,139 для обычного смарт-окна в окрашенном и обесцвеченном состояниях соответственно, получены по формуле (7) при подстановке вместо произведения двух первых выражений в скобках значений $\tau = \tau_{\text{chr}} = 0,045$ и $\tau = \tau_{\text{chr}} = 0,225$. Значения альbedo поверхности земли принято 0,8 в месяцы со снежным покровом с ноября по март и 0,3 для остальных месяцев. Ширина и высота окна 2 и 1,5 м, то есть площадь окна $F_w = 3 \text{ м}^2$.

Суммарная прямая и диффузная солнечная радиация с учётом отражённой от земли радиации, прошедшая через решётчатое и обычное смарт-окна, в качестве первичной составляющей теплопритока рассчитана по формуле (1) на основе многолетних данных о солнечной радиации при ясном небе для города Оренбурга [22]. Поскольку данные о радиации приведены в [22] 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 расчёты проведены для рабочих часов с 7 ч. 50 мин. до 16 ч. 50 мин. Для сравнения приток тепла в течение года определён для решётчатого и обычного смарт-окон. При расчётах учтено, что выбранный термохромный материал переключается из обесцвеченного состояния

в окрашенное при превышении температуры 25 °C – для июня, июля и августа со средним максимумом температуры 27,5, 29,0°и 27,4 °C в Оренбурге, соответственно, приняты коэффициенты светопропускания в окрашенном состоянии материала. В остальные месяцы коэффициенты рассчитаны для обесцвеченного состояния.

Результаты численного моделирования притока тепла от солнечной радиации через решётчатые и обычные смарт-окна приведены на рисунке 1 в виде диаграммы суммарного притока тепла от прямой и диффузной радиации в течение рабочего времени с 7 ч. 50 мин. до 16 ч. 50 мин. для 15 числа каждого месяца. Приток тепла определён только для часов светового дня, когда в расчётное окно попадают прямые солнечные лучи, то есть в часы инсоляции.

На рисунке 2 результаты численного моделирования показаны в виде процентного соотношения притока тепла от солнечной радиации через решётчатые и обычные смарт-окна от прямой и диффузной радиации в течение рабочего времени с 7 ч. 50 мин. до 16 ч. 50 мин. для 15 числа каждого месяца.

Диаграмма суммарного притока тепла от прямой и диффузной радиации на рисунке 1 показывает, что в отопительный период в городе Оренбурге (с октября по апрель) суммарная радиация значительно выше для решётчатых окон по сравнению с обычным смарт-окном, превышение в среднем двухкратное. Это же соотношение наблюдается также в мае и сентябре – в месяцы с «переходным» температурным режимом, когда в Оренбурге могут быть достаточно холодные дни. Решётчатые смарт-окна имеют преимущество в качестве некоторой экономии средств на отопление из-за большего суммарного притока тепла от прямой и диффузной радиации. В наиболее жаркие месяцы (с июня по август), когда расчёты проделаны для окрашенного состояния выбранного термохромного материала, суммарная проникающая за день радиация значительно выше у решётчатых окон. Однако, как видно из таблицы 1, светопропускание решётчатого фильтра имеет минимальное значение в назначенное время 10 ч. 49 мин., то есть в течение светового дня светопропускание регулируется, для чего и предназначены такие окна, и это может дать некоторую экономию при кондиционировании воздуха.

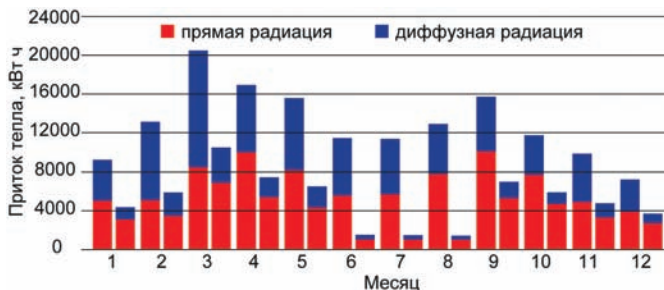


Рис. 1. Диаграмма суммарного притока тепла от прямой и диффузной радиации: для каждого месяца слева – решётчатое окно, справа – обычное окно. Построена авторами по результатам проведенных расчётов

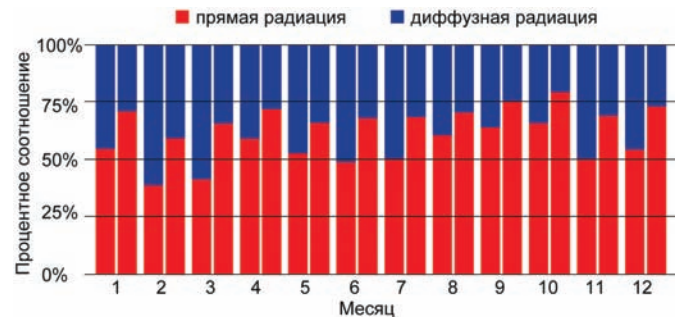


Рис. 2. Диаграмма процентного соотношения притока тепла от прямой и диффузной радиации: для каждого месяца слева – решётчатое окно, справа – обычное окно. Построена авторами по результатам проведенных расчётов

Главной задачей применения решётчатых оптических фильтров в смарт-окнах является угловое селективное регулирование светопропускания, а не пропускания энергии; преимущества в этом плане таких окон перед обычными смарт-окнами со сплошными слоями активных материалов подробно разобраны в [16; 18; 19]. Тем не менее сопутствующие факторы относительно влияния решёток фильтра на функционирование систем ОВК можно оптимизировать путём выбора активных материалов из огромного разнообразия [12–14; 16; 18], в том числе и разных материалов для двух решёток фильтра.

Из диаграммы процентного соотношения притока тепла от прямой и диффузной радиации, приведённой на рисунке 2, видно, что проникающая в помещение диффузная радиация в течение всего года больше у решётчатого окна по сравнению с обычным смарт-окном, что является следствием достижения более комфортных условий диффузного освещения. Вообще, изначально параметры оптического фильтра рассчитываются с целью максимального пропускания диффузного света при частичном или полном (в установленном заранее время) блокировании прямого солнечного света для повышения комфортности естественного освещения. А распределение притока тепла между прямой и диффузной составляющими является всего лишь следствием.

Таким образом, описанный в статье метод расчёта притока тепла от солнечной радиации для помещений с решётчатыми смарт-окнами апробирован с помощью численного моделирования в условиях города Оренбурга для одного выбранного материала для обеих решёток фильтра. Предварительно выявлены некоторые преимущества и недостатки решётчатых смарт-окон по сравнению с обычными. В дальнейшем планируется провести комплексные исследования при различных условиях с применением различных материалов, а также экспериментальное подтверждение результатов численного моделирования.

Список источников

1. Соловьёв, А.К. Современные подходы к нормированию естественного освещения жилых зданий. Результаты исследований / А.К. Соловьёв. – Текст : непосредственный // Светотехника. – 2020. – № 4. – С. 5–10.
2. Соловьёв, А.К. Голографические оптические элементы. Преимущества и недостатки для эффективного освещения, солнцезащиты и фотоэлектрического энергообеспечения зданий / А.К. Соловьёв, Ф.Т.Х. Тхам. – Текст : непосредственный // Светотехника. – 2022. – № 1. – С. 72–77.
3. 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.
4. Шмаров, И. Инсоляция помещений как средство ограничения распространения COVID-19, гриппа и ОРВИ в городской

среде / И. Шмаров, В. Земцов, А. Гуськов, Л. Бражникова. – Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – № 4. – С. 83–92.

5. 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 БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 6. – С. 35–42.

6. Дворецкий, А.Т. Низкоэнергетические здания: окна, фасады, солнцезащита, энергоэффективность / А.Т. Дворецкий, А.В. Спиридонов, И.Л. Шубин. – Москва : Директ-Медиа, 2022. – 232 с. – Текст : непосредственный

7. Korkina, E. Effectiveness of Energy-Saving Glazing in Various Climatic Zones of Russia / E. Korkina, I. Shmarov, M. Tyulenev. – Текст : электронный // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 869. – 072010. –URL: https://www.researchgate.net/publication/342850356_Effectiveness_of_energy-saving_glazing_in_various_climatic_zones_of_Russia (дата обращения 19.06.2023).

8. Rumbarger, J. Architectural Graphic Standards for Residential Construction / J. Rumbarger, R.J. Vitullo. – New York : John Wiley and Sons, 2003. – 505 p. – Текст : непосредственный.

9. James, P.A.B. Holographic Optical Elements: Various Principles for Solar Control of Conservatories and Sunrooms / P.A.B. James, A.S. Bahaj. – Текст : непосредственный // Solar Energy. – 2005. – Vol. 78. – P. 441–454.

10. Fernandes, L.L. Angular Selective Window Systems: Assessment of Technical Potential for Energy Savings / L.L. Fernandes, E.S. Lee, A. McNeil [et al.]. – Текст : непосредственный // Energ. Buildings. – 2015. – Vol. 90. – P. 188–206.

11. Do, C.T. Evaluation of the Effectiveness of a Multi-Sectional Facade with Venetian Blinds and Roller Shades with Automated Shading Control Strategies / C.T. Do, Y.-C. Chan. – Текст : непосредственный // Solar Energy. – 2020. – Vol. 212. – P. 241–257.

12. 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.

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

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

15. Оденбах, И.А. Оптимизация естественного освещения и инсоляции зданий с криволинейными фасадами / И.А. Оденбах, Р.С. Закируллин. – Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – № 2. – С. 111–116.

16. Zakirullin, R.S. Chromogenic Materials in Smart Windows for Angular-Selective Filtering of Solar Radiation / R.S.

Zakirullin. – Текст : непосредственный // Mater. Today Energy. – 2020. – Vol. 17. – 100476.

17. Zakirullin, R.S. A Smart Window for Angular Selective Filtering of Direct Solar Radiation / R.S. Zakirullin. – Текст : непосредственный // J. Sol. Energ.-T. ASME. – 2020. – Vol. 142. – 011001.

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

19. 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.

20. Vermeulen, T. Urban Layout Optimization Framework to Maximize Direct Solar Irradiation / T. Vermeulen, C. Knopf-Lenoir, P. Villon, B. Beckers. – Текст : непосредственный // Computers, Environment and Urban Systems. – 2015. – Vol. 51. – P. 1–12.

21. 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.

22. Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Выпуск 12. Татарская АССР, Ульяновская, Куйбышевская, Пензенская, Оренбургская и Саратовская области. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1988. . – Текст : непосредственный.

23. Seeboth, A. Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control / A. Seeboth, R. Ruhmann, O. Mühling. – Текст : непосредственный // Materials. – 2010. – Vol. 3. – P. 5143–5168.

References

1. Solov'ev A.K., Tham F.T.Kh. 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 [Light and Engineering], 2020. Iss. 4, pp. 5–10. (In Russ.)

2. Solov'ev A.K., Tham F.T.Kh. Golograficheskie opticheskie elementy. Preimushchestva i nedostatki dlya effektivnogo osveshcheniya, solntsezashchity i fotoelektricheskogo energoobespecheniya zdaniy [Holographic Optical Elements. Advantages and Disadvantages for Efficient Lighting, Solar Shading and Photovoltaic Energy in Buildings]. In: Svetotekhnika [Light and Engineering], 2022. Iss. 1, pp. 72–77. (In Russ.)

3. 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 [Proceedings of Higher Education Institutions.

Textile Industry Technology], 2016. Iss. 4, pp. 176–181. (In Russ., abstr.in Engl.)

4. Shmarov I., Zemtsov V., Guskov A., Brazhnikova L. Insolyatsiya pomeshchenii kak sredstvo ogranicheniya rasprostraneniya COVID-19, gripa i ORVI v gorodskoi srede [Insolation of Premises as a Means of Limiting the Spread of COVID-19, Influenza, and Acute Respiratory Viral Infections in an Urban Environment]. In: Akademiya. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction] 2021, no. 4, pp. 83–92. (In Russ., abstr.in Engl.)

5. 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 BGTU im. V.G. Shukhova [Bulletin of BSTU Named after V.G. Shukhov], 2022. Iss. 6, pp. 35–42. (In Russ., abstr. in Engl.)

6. Dvoretzky A.T., Spiridonov A.V., Shubin I.L. Energosberegayushchie zdaniya: okna, fasady, solntsezashchita, energoeffektivnost' [Low-Energy Buildings: Windows, Facades, Sun Protection, Energy Efficiency]. Moscow, Direkt-Media Publ., 2022, 232 p. (In Russ.)

7. Korkina E., Shmarov I., Tyulenev M. Effectiveness of energy-Saving Glazing in Various Climatic Zones of Russia. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2020, Volume 869, 072010. URL: https://www.researchgate.net/publication/342850356_Effectiveness_of_energy-saving_glazing_in_various_climatic_zones_of_Russia (Accessed 06/19/2023). (In Engl.)

8. Rumbarger J., Vitullo R.J. Architectural Graphic Standards for Residential Construction. New York, John Wiley and Sons, 2003, 505p. (In Engl.)

9. James P.A.B., Bahaj A.S. Holographic Optical Elements: Various Principles for Solar Control of Conservatories and Sunrooms. In: Solar Energy, 2005, Vol. 78, pp. 441–454. (In Engl.)

10. Fernandes L.L, Lee E.S., McNeil A., et al. Angular Selective Window Systems: Assessment of Technical Potential for Energy Savings. In: Energ. Buildings, 2015, Vol. 90, pp. 188–206. (In Engl.)

11. Do C.T., Chan Y.-C. Evaluation of the Effectiveness of a Multi-Sectional Facade with Venetian Blinds and Roller Shades with automated Shading Control Strategies. In: Solar Energy, 2020, Vol. 212, pp. 241–257. (In Engl.)

12. 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.)

13. Desideri U., Asdrubali F. Handbook of Energy Efficiency in Buildings. 1 Ed. Butterworth-Heinemann, 2018, 858 p. (In Engl.)

14. Casini M. Active Dynamic Windows for Buildings, A Review. In: Renew. Energ., 2018, Volume 119, pp. 923–934. (In Engl.)

15. Odenbakh I.A., Zakirullin R.S. Optimizatsiya yestestvennogo osveshcheniya i insolyatsii zdaniy s

krivolineynymi fasadami [Optimization of Natural Lighting and Insolation in Buildings with Curved Facades]. In: *Akademiya. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction], 2021. Iss. 2, pp. 111–116. (In Russ., abstr. in Engl.)

16. Zakirullin R.S. Chromogenic Materials in Smart Windows for Angular-Selective Filtering of Solar Radiation. In: *Mater. Today Energy*, 2020, Vol. 17, 100476. (In Engl.)

17. Zakirullin R.S. A Smart Window for Angular Selective Filtering of Direct Solar Radiation. In: *J. Sol. Energ.-T. ASME*, 2020, Vol. 142, 011001. (In Engl.)

18. 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.)

19. 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.)

20. 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.)

21. 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.)

22. Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Vypusk 12. Tatarskaya ASSR, Ul'yanovskaya, Kuybyshevskaya, Penzenskaya, Orenburgskaya i Saratovskaya oblasti [Scientific and Applied Reference Book on the Climate of the USSR. Issue 12. Tatar ASSR, Ulyanovsk, Kuibyshev, Penza, Orenburg and Saratov regions]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988. (In Russ.)

23. Seeboth A., Ruhmann R., Mühlhling O. Thermotropic and Thermo-chromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control. In: *Materials*, 2010, Vol. 3, pp. 5143–5168. (In Engl.)