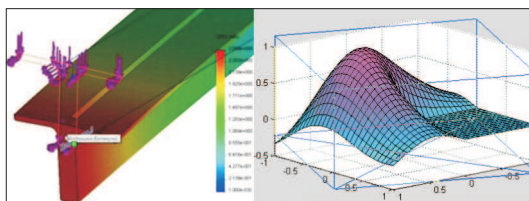


## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 628.925

Р.С. ЗАКИРУЛЛИН, И.А. ОДЕНБАХ

### СМАРТ-ОКНО С РЕШЕТОЧНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ФИЛЬТРОМ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДНЕВНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Поставлена задача решения проблемы динамического суточного и годового регулирования светопропускания окна без использования жалюзи и тому подобных устройств перераспределения светового потока за счет применения решеточного оптического фильтра. Такая возможность демонстрируется с помощью численного моделирования. Определены оптимальные геометрические параметры решеточного фильтра для смарт-окна с одинарным остеклением при заданном азимуте ориентации окна. Рассчитаны коэффициенты светопропускания фильтра ежедневно в течение светлого времени суток для 15 числа каждого месяца с апреля по сентябрь включительно и построены теоретические и реальные угловые характеристики светопропускания фильтра. Получены средние ежемесячные значения теоретического и реального коэффициентов светопропускания смарт-окна по результатам расчетов через каждый час относительно времени дня, когда азимуты Солнца и окна равны. Показано, что смарт-окно со встроенным оптическим фильтром обеспечивает минимальное светопропускание в заданное время дня или интервал времени вокруг него с учетом азимута окна, географических координат, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечной радиации без использования устройств перераспределения световых потоков.

**Ключевые слова:** смарт-окно, решеточный оптический фильтр, динамический контроль, дневное освещение, солнечная радиация, направленное светопропускание.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-732-12-96-107

Динамический контроль уровня дневного освещения и проникающей в помещение солнечной радиации при непрерывном изменении положения Солнца – актуальная проблема, особенно для районов с высокой интенсивностью солнечной радиации. Защита от чрезмерно яркого освещения и перегрева помещения осуществляется несколькими способами. Простейшим из них является применение в оконных конструкциях различных устройств перераспределения светового потока (жалюзи и т.п.), требующих ручного или автоматического управления положением затеняющих элементов [1].

Современные смарт-окна частично могут решить проблему углового селективного регулирования светопропускания окна с учетом траектории дви-

© Закируллин Р.С., Оденбах И.А., 2019

жения Солнца относительно него за счет переключения между пассивным и активным состояниями хромогенных поверхностных тонкослойных покрытий или многослойных хромогенных систем. Чтобы избежать бликов и перегрева от прямой солнечной радиации, в последние десятилетия в окнах используются смарт-стекла на основе различных хромогенных технологий [2]. Низкоэмиссионные [3], фотохромные [4], термохромные [5], термотропные [6] смарт-стекла могут изменять коэффициенты светопропускания и пропускания солнечной энергии в зависимости от интенсивности солнечной радиации или температуры, а электрохромные стекла [7] и устройства с жидкими кристаллами [8] и взвешенными частицами (SPD-технология (Suspended-particle device), разработанная ResearchFrontiersInc.) – под действием приложенного электрического напряжения. Оптическое пропускание газохромных тонких пленок обратимо переключается при попеременном воздействии разбавленных газов, обычно водорода и кислорода [9].

Смарт-окно на основе любой передовой технологии архитектурного стекла является важным компонентом для повышения энергоэффективности здания [10]. Однако разновидности смарт-окон, применяемые в настоящее время, не могут обеспечить селективное регулирование направленного светопропускания окна в динамическом режиме в зависимости от угла падения солнечных лучей, т.е. от положения Солнца, без использования дополнительных устройств перераспределения светового потока. Современные смарт-окна в активном состоянии ослабляют не только прямую, но и рассеянную и отраженную солнечную радиацию, поскольку хромогенные слои покрывают всю площадь окна. Это препятствует обеспечению в помещениях более комфортных условий естественного освещения, инсоляции и солнцезащиты для полного удовлетворения гигиенических требований, предъявляемых к окнам.

Целью исследования является проведение численного моделирования для демонстрации возможностей нового способа динамического суточного и годового регулирования светопропускания смарт-окна с помощью решеточного оптического фильтра, позволяющего решить рассмотренные проблемы без использования жалюзи и тому подобных устройств.

В [11–13] описан оптический фильтр, имеющий угловое селективное светопропускание за счет тонкопленочных решеточных слоев на двух поверхностях одинарного, двойного или тройного остекления. Входная и выходная решетки фильтра состоят из «непропускающих» (поглощающих, отражающих или рассеивающих) полос, чередующихся с направленно пропускающими полосами (рис. 1). Такой способ регулирования направленного светопропускания описан авторами в патентах РФ № 2509324 и № 2677069. При использовании в смарт-окне решеточный фильтр может пропускать только желаемую часть падающего излучения без изменения или при необходимости с изменением его спектра, в заданных диапазонах углов падения солнечных лучей, остальная часть излучения отражается, поглощается или рассеивается. Непропускающие полосы обеих решеток для обеспечения обзора через окно при низкой интенсивности солнечной радиации и низкой температуре, когда нет необходимости в солнцезащите, предпочтительно изготавливать из хромогенных материалов [2, 4–7, 9], несмотря на то что это

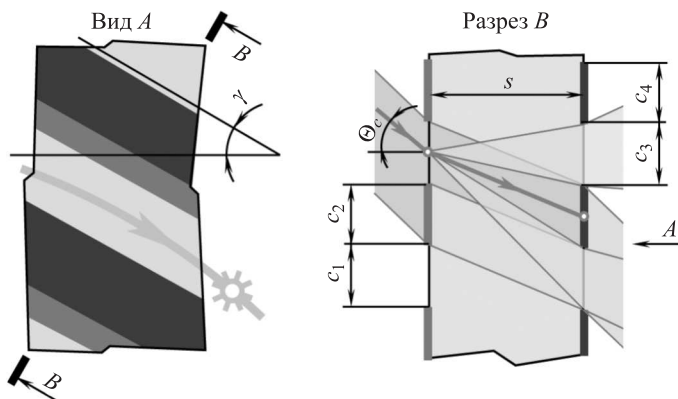


Рис. 1. Решеточный оптический фильтр в смарт-окне с одинарным остеклением

$\gamma$  – угол наклона решеток фильтра;  $c_1, c_2, c_3$  и  $c_4$  – ширины полос решеток;  $\Theta_c$  – характеристический угол фильтра;  $s$  – толщина стекла

приведет к некоторому удорожанию. Однако при этом функциональность смарт-окон с решеточными фильтрами значительно расширится, так как хромогенные полосы решеток при пассивном состоянии не будут препятствовать обзору.

Решетки фильтра наклонены под углом  $\gamma$  для адаптации к траектории Солнца по отношению к окну с азимутом в юго-западном секторе. Расчет угла наклона проводится для дня года с максимальными требованиями к солнцезащите, установленного с учетом местного климата. На рис. 1 показан фильтр с одинаковыми ширинами всех полос  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4$ . В этом случае при угле падения  $\Theta_c$  прямого солнечного луча, проходящего через центры полос обеих решеток (этот угол является характеристическим и показывает сдвиг входной и выходной решеток друг относительно друга), фильтр будет полностью блокировать прямую солнечную радиацию. Это также возможно при равенстве ширины полос  $c_1 = c_4$  и  $c_2 = c_3$ . Отраженные и рассеянные лучи, падающие в ту же точку под другими углами, проходят через пропускающие полосы выходной решетки (два таких угловых диапазона пропускания выделены на рис. 1). Толщина стекла  $s$  и показатель преломления также влияют на ход лучей.

Метод расчета угловых характеристик светопропускания фильтра для окон с одинарным и двойным остеклением приведен в [11], результаты расчетов при разных комбинациях ширины полос и разных характеристических углах подтверждены экспериментально на лабораторной модели. В [11] описаны универсальный метод (патент РФ № 2677069) для расчета оптимального угла наклона решеток оптического фильтра, ламелей жалюзи и полос жалюзи типа «зебра», и метод минимизации светопропускания окна в заданную дату и время суток с учетом азимута окна, географической широты, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечной радиации. Результаты численного моделирования оптимального угла наклона полос решеток, их ширины и относительного положения на двух поверхностях окна экспериментально подтверждены в [12]. На основе этих расчетных методов можно определять оптимальные углы наклона решеток для разных

дат, азимутов окна, широт, показателей преломления стекла и расстояний между решетками фильтра для окон с одинарным, двойным и тройным остеклением.

По методу, приведенному в [11], ширины полос решеток фильтра для окна с одинарным остеклением рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}
 c_3 &= 2s \sin \Theta_c / \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta_c} - 2s \sin \Theta_{av} / \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta_{av}}; \\
 c_4 &= c_3 (1 - \tau_{\max}) / \tau_{\max}; \\
 c_2 &= c_3 - \tau_{\min} (c_3 + c_4); \\
 c_1 &= c_3 + c_4 - c_2,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $n$  – показатель преломления стекла;

$\Theta_{av}$  – средний угол падения, при котором теоретический коэффициент светопропускания фильтра должен иметь среднее значение ( $\tau_{av} = 0,5(\tau_{\min} + \tau_{\max})$ );

$\tau_{\min}$  и  $\tau_{\max}$  – минимальное и максимальное теоретические значения коэффициента светопропускания.

Исходя из требуемых характеристик светопропускания окна, предварительно задаются  $\tau_{\min}$ ,  $\tau_{\max}$  и  $\Theta_{av}$  (с выполнением условия  $\Theta_{av} < \Theta_c$ ). Как следует из формул (1), при меньших значениях  $\Theta_{av}$  ширины полос будут увеличиваться и наоборот. При выполнении условий  $c_1 = c_4$  и  $c_2 = c_3$  (в частности, как на рис. 1), в соответствии с формулами (1), минимальный теоретический коэффициент светопропускания будет равен нулю  $\tau_{\min} = 0$ . Момент времени, когда фильтр будет полностью блокировать прямую солнечную радиацию, выбирается исходя из азимута окна. При невыполнении условий  $c_1 = c_4$  и  $c_2 = c_3$  коэффициент светопропускания будет минимальным в течение некоторого интервала времени симметрично относительно выбранного момента времени. Длительность интервала времени зависит от соотношений ширин полос обеих решеток. При азимуте окна до  $180^\circ$  временем минимального светопропускания может быть выбрано время максимальной солнечной радиации, так как оно наступает в утренние часы, до полудня. При азимуте окна более  $180^\circ$  (см. рис. 1) можно выбрать время нахождения Солнца в зените. С учетом принятого времени с минимальным требуемым теоретическим коэффициентом светопропускания, характеристический угол фильтра рассчитывается [12] как проекция  $\theta$  угла падения солнечного луча на плоскость, перпендикулярную к полосам решеток (разрез  $B$  на рис. 1), по формуле

$$\theta = \arctg \left( \left\{ \sqrt{x^2 + y^2} \cos[\gamma - \arctg(x/y)] \right\} / s \right),
 \tag{2}$$

где  $x$  и  $y$  – координаты следов точки падения солнечного луча на входную поверхность фильтра на его выходной поверхности (см. рис. 1). При расчете характеристического угла фильтра берутся их значения  $x_{\min}$  и  $y_{\min}$  для времени с требуемым минимальным светопропусканием. Координаты следов при одинарном остеклении вычисляются [12] по формулам:

$$x = \text{stg}[\alpha \arcsin(\sin \Theta / n) / \Theta],
 \tag{3}$$

$$y = - \left\{ \operatorname{stg} [\arcsin(\sin \Theta / n) - |\alpha \arcsin(\sin \Theta / n) / \Theta|] / \cos [\alpha \arcsin(\sin \Theta / n) / \Theta] \right\},$$

где  $\alpha$  – азимут Солнца, измеренный от перпендикуляра к окну (разность между азимутами окна и Солнца в данный момент времени);

$\Theta$  – угол падения солнечного луча на окно, для вертикальных окон определяется из первой теоремы косинусов для трехгранного угла

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

где  $h$  – высота стояния Солнца (вычисляется по одной из многочисленных компьютерных программ для выбранной расчетной даты, как и азимут Солнца).

Для построения угловой характеристики фильтра минимальный и максимальный теоретические коэффициенты светопропускания рассчитываются [11] по формулам:

$$\tau_{\min} = (c_1 - c_4) / (c_1 + c_2); \quad (5)$$

$$\tau_{\max} = c_3 / (c_1 + c_2).$$

Диапазоны угловой характеристики с уменьшающимся и увеличивающимся светопропусканием определяются по формуле

$$\tau = (|\Delta| - 0,5c_2 + 0,5c_3) / (c_1 + c_2), \quad (6)$$

где  $\Delta$  – сдвиг между следами пропускающей полосы входной решетки на поверхности выходной решетки при характеристическом угле фильтра и произвольном угле падения, рассчитываемый по формуле

$$\Delta = \sqrt{x_{\min}^2 + y_{\min}^2} \cos[\gamma - \operatorname{arctg}(x_{\min} / y_{\min})] - \sqrt{x^2 + y^2} \cos[\gamma - \operatorname{arctg}(x / y)]. \quad (7)$$

Для окна с одинарным остеклением значения скорректированного коэффициента светопропускания  $\tau_r$  вычисляются с учетом отражения по уравнениям Френеля и поглощения по закону Бугера–Ламберта по формуле

$$\tau_r = \tau \left( 1 - 0,5 \left\{ \frac{\sin^2[\Theta - \arcsin(\sin \Theta / n)]}{\sin^2[\Theta + \arcsin(\sin \Theta / n)]} + \frac{\operatorname{tg}^2[\Theta - \arcsin(\sin \Theta / n)]}{\operatorname{tg}^2[\Theta + \arcsin(\sin \Theta / n)]} \right\} \right)^2 \times \exp \left( -\alpha s \sqrt{\frac{1 + \sin^2 \Theta}{n^2 - \sin^2 \Theta}} \right), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – натуральный коэффициент поглощения стекла,  $\text{мм}^{-1}$ ;

$s$  – толщина стекла, мм.

Оптимальные геометрические параметры фильтра были определены для окна с одинарным остеклением с азимутом ориентации  $210^\circ$  (юго-западный сектор, как на рис. 1) и толщиной стекла 4 мм, чтобы обеспечить минимальное светопропускание в 13 ч 20 мин (время нахождения Солнца в зените в г. Оренбург). Азимут Солнца равен  $180,03^\circ$ , высота стояния –  $61,52^\circ$ .

Для г. Оренбург, Россия (широта  $51^\circ 46'$ , долгота  $55^\circ 06'$ , GMT +05:00) оптимальный угол наклона решеток фильтра для окон с азимутом  $150^\circ$ , рассчитанный для дня максимальной солнечной радиации в Оренбурге (15 июня), составляет  $34^\circ$  [12]. Учитывая симметричность траектории Солнца относи-

тельно меридиана (а также относительно зенитного положения Солнца в полдень по солнечному времени), для окна с азимутом  $210^\circ$  оптимальным будет такой же угол, с той лишь разницей, что угол отсчитывается от горизонтали по часовой стрелке (при азимуте  $150^\circ$  он отсчитывается против часовой стрелки).

В табл. 1 приведены результаты расчета азимута и высоты стояния Солнца для 15 июня 2019 г. через каждые полчаса симметрично относительно времени, когда азимуты Солнца и окна равны (14 ч 25 мин). Расчеты проведены с 11 ч 25 мин до 18 ч 25 мин. В табл. 1 не включены результаты для времени, когда азимуты Солнца по отношению к окну и/или углы падения солнечных лучей на окно превышают  $70^\circ$  – коэффициенты отражения и поглощения резко возрастают соответственно коэффициент пропускания незначителен. Кроме того, при таких углах падения прошедшие в помещение солнечные лучи попадают в область непосредственно около окна и необходимость солнцезащиты несущественна.

Наиболее близким к времени нахождения Солнца в зените (13 ч 20 мин) в табл. 1 является время 13 ч 25 мин. Поэтому при расчете характеристического угла фильтра по формуле (2) приняты значения  $x_{\min} = -1,129$  мм и  $y_{\min} = -1,629$  мм (см. табл. 1). Характеристический угол равен  $26,46^\circ$ . В табл. 1 приведены также значения углов падения солнечных лучей на окно и координат следов точки их падения на входную поверхность фильтра на его выходной поверхности, рассчитанные по формулам (4) и (3) соответственно.

Коэффициенты светопропускания фильтра в зависимости от времени суток рассчитаны (см. табл. 1) для двух случаев: при требуемых минимальных

Таблица 1. Коэффициенты светопропускания фильтра в зависимости от времени суток

Время, ч. мин	Высота стояния Солнца $h$ , град.	Азимут Солнца $A$ , град.	Разность азимутов окна и Солнца $\alpha$ , град.	Угол падения $\Theta$ , град.	Координаты следов точки падения, мм		$\tau_{\min} = 0,5$ $\tau_{\max} = 0,75$		$\tau_{\min} = 0$ $\tau_{\max} = 0,5$	
					$x$	$y$	$\tau$	$\tau_r$	$\tau$	$\tau_r$
12.55	61,12	168,08	-41,92	68,94	-1,730	-1,174	0,50	0,34	0,01	0,01
13.25	61,50	182,44	-27,56	64,97	-1,129	-1,629	0,50	0,37	0,00	0,00
13.55	60,73	196,64	-13,36	61,60	-0,547	-2,157	0,50	0,39	0,03	0,02
14.25	58,89	209,87	-0,13	58,89	-0,006	-2,772	0,50	0,40	0,08	0,06
14.55	56,18	221,68	11,68	56,97	0,489	-2,054	0,50	0,41	0,14	0,11
15.25	52,79	232,03	22,03	55,90	0,939	-1,520	0,56	0,46	0,31	0,26
15.55	48,92	241,07	31,07	55,75	1,349	-1,115	0,70	0,58	0,45	0,37
16.25	44,71	249,05	39,05	56,50	1,726	-0,802	0,68	0,56	0,43	0,35
16.55	40,28	256,21	46,21	58,13	2,074	-0,559	0,58	0,47	0,33	0,27
17.25	35,72	262,77	52,77	60,58	2,396	-0,374	0,50	0,39	0,25	0,20
17.55	31,09	268,88	58,88	63,73	2,690	-0,235	0,50	0,38	0,18	0,13
18.25	26,45	274,70	64,70	67,50	2,953	-0,137	0,50	0,35	0,12	0,08

и максимальных теоретических значениях коэффициента светопропускания  $\tau_{\min} = 0,5$  и  $\tau_{\max} = 0,75$  (средний угол падения  $\Theta_{av} = 22,5458^\circ$ ), и  $\tau_{\min} = 0$  и  $\tau_{\max} = 0,5$  ( $\Theta_{av} = 22,3635^\circ$ ). При расчете по формулам (1) получены следующие значения ширины полос:  $c_1 = 3$  мм,  $c_2 = 1$  мм,  $c_3 = 3$  мм и  $c_4 = 1$  мм (для первого случая) и  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 2$  мм (для второго случая).

Во втором случае фильтр имеет одинаковые ширины всех полос, как на рис. 1. Средние углы падения заданы таким образом, чтобы периоды решеток ( $c_1 + c_2 = c_3 + c_4$ ) в обоих случаях были равны 4 мм. Видно, что при одном и том же характеристическом угле фильтра задаваемое значение среднего угла падения сильно влияет на распределение значений ширины полос решеток фильтра, следовательно, коэффициентов светопропускания. Кроме расчетов для 15 июня, при тех же геометрических параметрах фильтров, с целью исследования возможности динамического контроля дневного освещения и обеспечения солнцезащиты в течение месяцев с наиболее интенсивной солнечной радиацией проведены аналогичные расчеты для 15 числа каждого месяца с апреля по сентябрь включительно.

Теоретические и реальные (скорректированные по формуле (8) при  $n = 1,5$ ;  $\alpha = 0,01$  мм<sup>-1</sup> и  $s = 4$  мм) угловые характеристики фильтра для 15 числа каждого месяца с апреля по сентябрь при заданных минимальных и максимальных теоретических значениях коэффициента светопропускания  $\tau_{\min} = 0,5$ ;  $\tau_{\max} = 0,75$  и  $\tau_{\min} = 0$ ;  $\tau_{\max} = 0,5$ , полученные в результате численного моделирования, представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Значения коэффициентов светопропускания рассчитаны через каждый час, в отличие от табл. 1.

На рис. 2 заданный минимальный теоретический коэффициент светопропускания  $\tau_{\min} = 0,5$  для всех месяцев наблюдается примерно с 11 ч 30 мин до 14 ч 30 мин, т.е. при разных истинных углах падения солнечных лучей, азимуты и высоты стояния Солнца распределены таким образом (например,

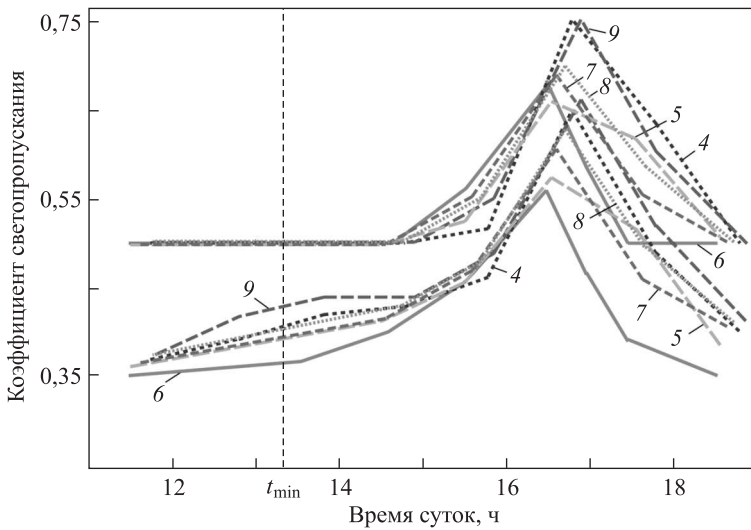


Рис. 2. Ежемесячные (4–9) зависимости теоретического (верхние линии) и реального (нижние линии) коэффициентов светопропускания смарт-окна от времени суток при  $\tau_{\min} = 0,5$  и  $\tau_{\max} = 0,75$

см. табл. 1 для 15 июня), что проекции истинных углов падения на плоскость, перпендикулярную к полосам решеток (плоскость разреза *B* на рис. 1), одинаковы. Расчетное время  $t_{\min}$  с минимальным светопропусканием – 13 ч 20 мин, т.е. время нахождения Солнца в зените, находится в середине данного временного интервала. Поскольку время дня, когда азимуты Солнца и окна равны, отличается от месяца к месяцу, характеристики, построенные по ежечасным расчетам относительно этого времени, сдвинуты друг относительно друга по оси абсцисс. Незквидистантность теоретических и реальных (скорректированных по формуле (8)) характеристик смарт-окна на рис. 2 для 15.06.2019 объясняется повышением коэффициента отражения с увеличением угла падения, наблюдаемым в табл. 1. Такая же особенность характерна и для других месяцев. Характеристики, приведенные на рис. 3 для других заданных минимальных и максимальных теоретических коэффициентов светопропускания, имеют аналогичные закономерности. Однако минимальные значения как теоретического, так и скорректированного коэффициентов наблюдаются в узком временном интервале в непосредственной близости от времени  $t_{\min}$ , в отличие от рис. 2, т.е. они зависят также от распределения ширин полос обеих решеток, а не только от распределения азимутов и высот стояния Солнца.

Результаты численного моделирования подтверждают, что на основе описанного выше метода можно минимизировать светопропускание смарт-окна в заданную дату и время суток с учетом азимута окна, географической широты, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечной радиации. Длительность временного интервала с минимумом светопропускания зависит от распределения ширин полос решеток фильтра и азимутов и высот стояния Солнца в выбранный расчетный день. В табл. 2 представлены средние значения теоретического и реального коэффициентов светопропускания смарт-окна по результатам расчетов через каждый час

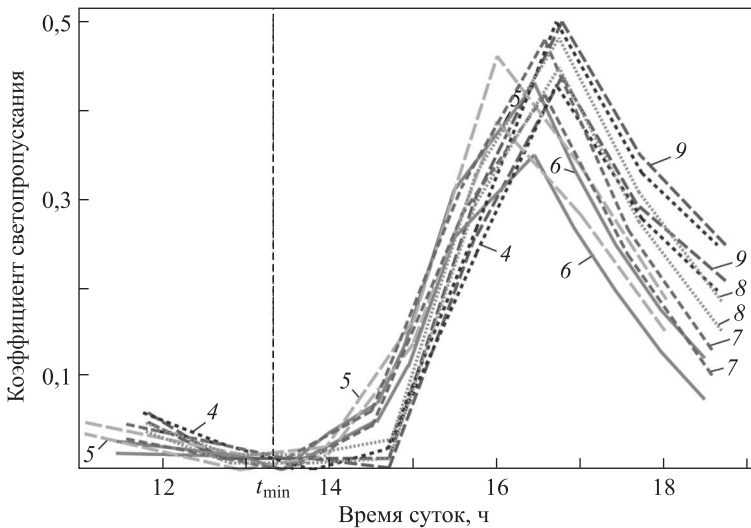


Рис. 3. Ежемесячные (4–9) зависимости теоретического (верхние линии) и реального (нижние линии) коэффициентов светопропускания смарт-окна от времени суток при  $\tau_{\min} = 0$  и  $\tau_{\max} = 0,5$



Таблица 2. Средние коэффициенты светопропускания фильтра по месяцам

Месяц	Интервал времени, ч. мин	$\tau_{\min} = 0,5$ $\tau_{\max} = 0,75$		$\tau_{\min} = 0$ $\tau_{\max} = 0,5$	
		$\tau$	$\tau_r$	$\tau$	$\tau_r$
Апрель	11.45–18.45	0,57	0,45	0,24	0,19
Май	11.28–18.28	0,55	0,44	0,21	0,17
Июнь	11.25–18.25	0,54	0,43	0,19	0,16
Июль	11.34–18.34	0,54	0,42	0,20	0,16
Август	11.43–18.43	0,56	0,44	0,23	0,18
Сентябрь	11.48–18.48	0,60	0,46	0,26	0,20

относительно времени дня, когда азимуты Солнца и окна равны, для шести месяцев. Данные демонстрируют минимальные средние теоретические и реальные коэффициенты светопропускания окна в июне и июле, т.е. в месяцы с наиболее востребованной защитой от солнечной радиации на широте Оренбурга.

Таким образом, смарт-окно со встроенным оптическим фильтром обеспечивает динамический контроль дневного освещения в помещении в течение месяцев года с наибольшей интенсивностью солнечной радиации без использования устройств перераспределения световых потоков и вмешательства человека. Чтобы в остальное время года с недостаточной солнечной радиацией окно пропускало максимальное количество света, полосы решеток фильтра предпочтительно изготавливать с применением хромогенных технологий, переключающих смарт-окно в пассивное состояние. Рассчитанные коэффициенты направленного светопропускания показывают изменение только прямой солнечной радиации, проходящей в помещение. Рассеянное и отраженное излучение при этом проходит через решетки фильтра, повышая комфортность дневного освещения.

**Выводы.** Впервые определены оптимальные геометрические параметры решеточного фильтра для смарт-окна западного азимута ориентации при одинарном остеклении для минимизации светопропускания при нахождении Солнца в зените в день максимальной солнечной радиации в районе с заданными географическими координатами. Впервые проведено численное моделирование светопропускания такого смарт-окна для шести месяцев с наибольшей интенсивностью солнечной радиации в заданном районе.

Полученные результаты подтвердили, что смарт-окно со встроенным оптическим фильтром обеспечивает минимальное светопропускание в заданное время дня или интервал времени вокруг него без использования устройств перераспределения световых потоков и вмешательства человека. Установлено, что смарт-окно с фильтром за счет возможности любого угла наклона решеток имеет преимущества по сравнению с жалюзи, которые не обеспечивают оптимальную солнцезащиту при любом азимуте окна из-за отсутствия разновидностей с наклонными ламелями. В отличие от известных статических угловых селективных систем затенения, смарт-окно с фильтром может блокировать прямой солнечный свет в более широком диапазоне уг-

лов падения. Оно не требует исполнительного оборудования и датчиков, как, например, активные оконные системы с автоматическим управлением.

Представленное смарт-окно в первую очередь рекомендуется для применения в помещениях с длительным нахождением людей в светлое время суток, т.е. в офисных и промышленных помещениях, чтобы обеспечить комфортное дневное освещение, требуемый инсоляционный и тепловой режим в рабочее время.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rumbarger J., Vitullo R.J. Architectural graphic standards for residential construction. John Wiley and Sons, 2003.
2. Walker A., Renné D., Bilo S., Kutscher C., Burch J., Balcomb D., Judkoff R., Warner C., King R.J., Eiffert P. Advances in solar buildings // J. Sol. Energy Eng. 2003. No. 125 (3). P. 236–244.
3. Baloukas B., Loquais S., Martin L. VO<sub>2</sub>-based thermally active low emissivity coatings // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2018. No. 183. P. 25–33.
4. Dürr H., Bouas-Laurent H. Photochromism: Molecules and systems. First ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2003.
5. Wang N., Goh Q.S., Lee P.L., Magdassi S., Long Y. One-step hydrothermal synthesis of rare earth/W-codoped VO<sub>2</sub> nanoparticles: Reduced phase transition temperature and improved thermochromic properties // J. Alloys Compd. 2017. No. 711. P. 222–228.
6. Gladen A.C., Davidson J.H., Mantell S.C. The effect of a thermotropic material on the optical efficiency and stagnation temperature of a polymer flat plate solar collector // ASME J. Sol. Energy Eng. 2014. No. 137 (2). P. 021003.
7. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Electrochromics for smart windows: thin films of tungsten oxide and nickel oxide, and devices based on these // J. Mater. Chem. 2007. No. 17. P. 127–156.
8. Hakemi H. Polymer-dispersed liquid crystal technology ‘industrial evolution and current market situation’ // Liquid Crystals Today. 2017. Vol. 26 (3). P. 70–73.
9. Nishizawa K., Yamada Y., Yoshimura K. Low-temperature chemical fabrication of Pt-WO<sub>3</sub> gasochromic switchable films using UV irradiation // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2017. Vol. 170. P. 21–26.
10. Casini M. Smart buildings: Advanced materials and nanotechnology to Improve energy-efficiency and environmental performance. Woodhead Publishing, 2016.
11. Zakirullin R.S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation // J. Opt. Soc. Am. A. 2018. Vol. 35. P. 1592–1598.
12. Zakirullin R.S. A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation // J. Sol. Energy Eng. 2019. Vol. 142 (1). 011001-011001-5.
13. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Оптимизированная угловая селективная фильтрация прямого солнечного излучения // Известия вузов. Строительство. 2018. № 10. С. 91–97.

**Закируллин Рустам Сабирович**, д-р техн. наук, доц.;

E-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

Оренбургский государственный университет

**Оденбах Ирина Александровна**, канд. пед. наук; E-mail: 79128486201@yandex.com

Оренбургский государственный университет

Получено 18.11.2019

**Zakirullin Rustam Sabirovich**, DSc, Ass. Professor;

E-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

Orenburg State University, Russia

**Odenbakh Irina Aleksandrovna**, PhD; E-mail: 79128486201@yandex.com  
Orenburg State University, Russia

## **SMART WINDOW WITH GRATING OPTICAL FILTER FOR DYNAMIC CONTROL OF DAYLIGHTING**

The article sets the task of solving the problem of dynamic daily and annual regulation of light transmission of a window without using blinds or other devices for redistributing the light flux through the use of a grating optical filter. This possibility has been demonstrated using numerical simulation. The optimal geometric parameters of the grating filter for a single-glazed smart window have been determined for a given azimuth of the window orientation. The filter transmittance has been calculated hourly during daylight hours for the 15th day of each month from April to September, and theoretical and real angular transmittance characteristics of the filter have been constructed. The average monthly values of the theoretical and real light transmittances of the smart window have been obtained from the calculation results every hour relative to the time of day, when the azimuths of the Sun and the window are equal. It is shown that a smart window with an integrated optical filter provides minimal light transmission at a given time of the day or the time interval around it, taking into account the azimuth of the window, geographical coordinates, seasonal and daily distribution of solar radiation intensity without the use of light distribution devices.

**Key words:** smart window, grating optical filter, dynamic control, daylighting, solar radiation, directional light transmission.

### REFERENCES

1. Rumbarger J., Vitullo R.J. Architectural graphic standards for residential construction. John Wiley and Sons, 2003.
2. Walker A., Renné D., Bilo S., Kutscher C., Burch J., Balcomb D., Judkoff R., Warner C., King R.J., Eiffert P. Advances in solar buildings. *J. Sol. Energy Eng.* 2003. No. 125 (3). Pp. 236–244.
3. Baloukas B., Loquais S., Martinu L. VO<sub>2</sub>-based thermally active low emissivity coatings. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018. No. 183. Pp. 25–33.
4. Dürr H., Bouas-Laurent H. Photochromism: Molecules and systems. First ed. Amsterdam, Elsevier Science, 2003.
5. Wang N., Goh Q.S., Lee P.L., Magdassi S., Long Y. One-step hydrothermal synthesis of rare earth/W-codoped VO<sub>2</sub> nanoparticles: Reduced phase transition temperature and improved thermochromic properties. *J. Alloys Compd.* 2017. No. 711. Pp. 222–228.
6. Gladen A.C., Davidson J.H., Mantell S.C. The effect of a thermotropic material on the optical efficiency and stagnation temperature of a polymer flat plate solar collector. *ASME J. Sol. Energy Eng.* 2014. No. 137 (2). P. 021003.
7. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Electrochromics for smart windows: thin films of tungsten oxide and nickel oxide, and devices based on these. *J. Mater. Chem.* 2007. No. 17. Pp. 127–156.
8. Hakemi H. Polymer-dispersed liquid crystal technology ‘industrial evolution and current market situation’. *Liquid Crystals Today.* 2017. Vol. 26 (3). Pp. 70–73.
9. Nishizawa K., Yamada Y., Yoshimura K. Low-temperature chemical fabrication of Pt-WO<sub>3</sub> gasochromic switchable films using UV irradiation. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2017. Vol. 170. Pp. 21–26.
10. Casini M. Smart buildings: Advanced materials and nanotechnology to improve energy-efficiency and environmental performance. Woodhead Publishing, 2016.

11. Zakirullin R.S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation. J. Opt. Soc. Am. A. 2018. Vol. 35. Pp. 1592–1598.
  12. Zakirullin R.S. A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation. J. Sol. EnergyEng. 2019. Vol. 142 (1). 011001-011001-5.
  13. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Optimizirovannaya uglovaya selektivnaya fil'tratsiya pryamogo solnechnogo izlucheniya [Optimized angular selective filtering direct solar radiation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2018. No. 10. Pp. 91–97. (in Russian)
-