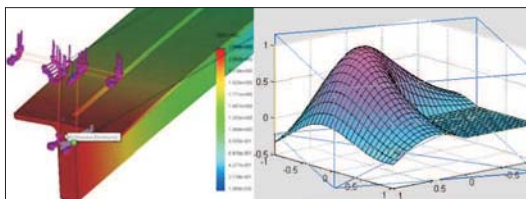


## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 699.885:694.6

Р.С. ЗАКИРУЛЛИН, И.А. ОДЕНБАХ

### ОПТИМИЗИРОВАННАЯ УГЛОВАЯ СЕЛЕКТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПРЯМОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Статья посвящена проблеме разработки инновационных смарт-окон с применением современных материалов и новым подходом к обеспечению в помещениях комфортных условий естественного освещения, инсоляции и солнцезащиты для выполнения гигиенических требований. Смарт-окна предназначены для адаптированного регулирования светопропускания окна при сложной траектории движения солнца относительно окна без применения жалюзи или других вспомогательных механических устройств. Рассмотрен метод оптимизации угловой селективной фильтрации прямого солнечного излучения путем минимизации светопропускания окна в заданную дату и время суток с учетом азимута ориентации окна, географической широты, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечной радиации. Оптимизация осуществляется за счет использования оптического фильтра нового типа, имеющего две тонкопленочные поверхностные решетки с чередующимися пропускающими и непропускающими параллельными полосами, расположенными на поверхности окна наклонно под оптимальным углом, рассчитанным по новому методу для адаптации к действительной траектории солнца относительно плоскости вертикального окна.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** солнечная радиация, смарт-окно, оптический фильтр, тонкопленочная поверхностная решетка, угловая селективная фильтрация.

**DOI 10.32683/0536-1052-2018-718-10-91-97**

Проблема углового селективного регулирования светопропускания окна с учетом траектории движения солнца относительно него может быть решена частично с помощью современных смарт-окон. В последние десятилетия в окнах используются смарт-стекла на основе хромогенных материалов, чтобы избежать бликов и перегрева от солнечной радиации [1]. Низкоэмиссионные [2], фотохромные [3], термохромные [4], термотропные [5] и электрохромные [6] смарт-стекла могут изменять коэффициент пропускания в зависимости от интенсивности солнечного излучения и температуры или из-за приложенного электрического напряжения.

Для управления прямым солнечным светом, проходящим через окно при изменении положения солнца, используются жалюзи или другие вспомогательные механические устройства [7]. Потенциал статических угловых селективных систем затенения с микроперфорированным экраном, трубчатой

© Закируллин Р.С., Оденбах И.А., 2018

затеняющей структурой и расширенной металлической сеткой количественно определяется для уменьшения использования энергии [8]. Для автоматического управления прямой солнечной энергией, проходящей через окно, разработаны конструкции активных оконных затенителей [9].

В настоящее время нет методов, обеспечивающих селективное регулирование направленного светопропускания окна в зависимости от угла падения солнечных лучей без использования дополнительных устройств перераспределения светового потока. Такой метод, используемый в оптическом фильтре, представлен в [10–13]. Фильтр пропускает только желаемую часть падающего излучения без изменения или, при необходимости, с изменением его спектра в разных диапазонах углов падения [12], остальная часть излучения отражается, поглощается или рассеивается. Фильтр состоит из тонкопленочных решеточных слоев на двух поверхностях одинарного, двойного или тройного остекления. Входные и выходные решетки формируются с помощью «непропускающих» (поглощающих, отражающих или рассеивающих) полос, чередующихся с направленно пропускающими полосами. Расчетные данные угловых характеристик светопропускания фильтров подтверждены экспериментально [11]. Данная статья посвящена оптимизации параметров фильтра для смарт-окна с помощью нового метода определения угла наклона решеток фильтра, разработанного взамен метода, описанного в [13].

Схемы фильтров с пропускающими и поглощающими полосами для одинарного и двойного остекления представлены на рис. 1. При тройном остеклении для фильтра используется одна из двух камер по принципу, изображенному на рис. 1, б. Характеристический угол фильтра  $\Theta_c$  показывает относительный сдвиг входных и выходных решеток, а луч проходит через центры полос на обеих решетках. Если этот луч проходит через центр поглощающей полосы на выходной решетке (как на рис. 1), фильтр обеспечивает минимальное светопропускание при характеристическом угле или в угловом диапазоне симметрично относительно него. Блокируя прямое солнечное излучение частично или полностью в заданном угловом диапазоне, фильтр передает диффузное и отраженное от земли (альбедо) излучение и обеспечивает комфортный дневной свет и инсоляцию. Из рис. 1 видно, что при другом угле падения  $\Theta$  луч проходит не только через входную, но и через выходную решетку, т.е. коэффициент светопропускания зависит от угла падения солнечных

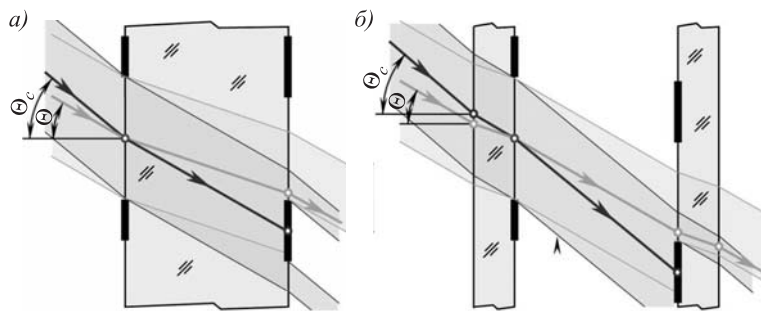


Рис. 1. Оптические фильтры при одинарном (а) и двойном (б) остеклении

лучей. В отличие от горизонтальных или вертикальных жалюзи фильтр может быть адаптирован к траектории солнца относительно окна с учетом азимута его ориентации по сторонам света из-за возможности расположения полос под любым углом наклона.

Поглощающие, отражающие или рассеивающие полосы могут препятствовать просмотру через окно и могут быть применены к вертикальным окнам, не используемым для просмотра, к наклонным или криволинейным окнам и потолочным световым фонарям. Чтобы обеспечить достаточную видимость, более предпочтительно формировать непронускающие полосы с помощью фотохромных, термохромных, электрохромных или других хромогенных технологий. В этом случае решеточный фильтр, имеющий все преимущества смарт-стекла, будет отображать его свойства только при соответствующем изменении внешних условий или приложении электрического напряжения и ослаблять прямое излучение, передавая диффузное и отраженное излучение.

Для определения угла наклона решеток фильтра необходимо выбрать расчетную дату с учетом местного климата. В качестве такой даты может быть середина самого жаркого периода года или день с максимальной солнечной радиацией в году. Эти две даты могут отличаться более чем на месяц. Затем для выбранной даты определяется время максимальной солнечной радиации. Максимальное излучение падает на верхние слои атмосферы в полдень. Однако прозрачность атмосферы значительно влияет на дневное изменение интенсивности радиации, особенно в летние месяцы. Атмосфера менее прозрачна во второй половине дня из-за ее более высокой запыленности и влажности и появления конвективной облачности. Поэтому максимальная интенсивность прямого солнечного излучения летом наблюдается в утренние часы. Оптимальный угол наклона решеток фильтра определяется по следующему алгоритму.

1. По одной из многочисленных компьютерных программ с учетом географических координат здания рассчитываются высота  $h$  и азимут  $A$  солнца для выбранной даты через определенный интервал времени (каждую минуту или час и т.п.) относительно времени, когда азимут солнца и азимут окна  $A_0$  ( $0^\circ \leq A_0 < 360^\circ$ ) равны между собой ( $A = A_0$ ). В это время солнечные лучи падают на плоскость, перпендикулярную окну (ось  $y$  на рис. 2). На рис. 2 определена траектория движения солнца относительно окна с азимутом  $120^\circ$  и углы наклона решеток фильтра на оконном стекле для г. Оренбурга, Россия ( $51^\circ 47'00''N$ ,  $55^\circ 06'00''E$ ,  $UTC + 05:00$ ) для 15.07.2015 (середина самого жаркого периода в Оренбурге). Получены углы наклона решеток фильтра  $39^\circ$  (при аппроксимации траектории) и  $42^\circ$  (при проведении касательной к траектории в точке, соответствующей 11 ч 30 мин, т.е. времени максимальной солнечной радиации в Оренбурге).

2. Азимут солнца, измеренный от перпендикуляра к окну, вычисляется по формуле:  $\alpha = A - A_0$ . Для дальнейших расчетов следует учитывать только азимуты в пределах  $-60^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  из-за увеличения коэффициента отражения при больших углах падения.

3. Угол падения солнечного луча на вертикальное плоское окно вычисляется с помощью частного случая первой теоремы косинусов для трех-

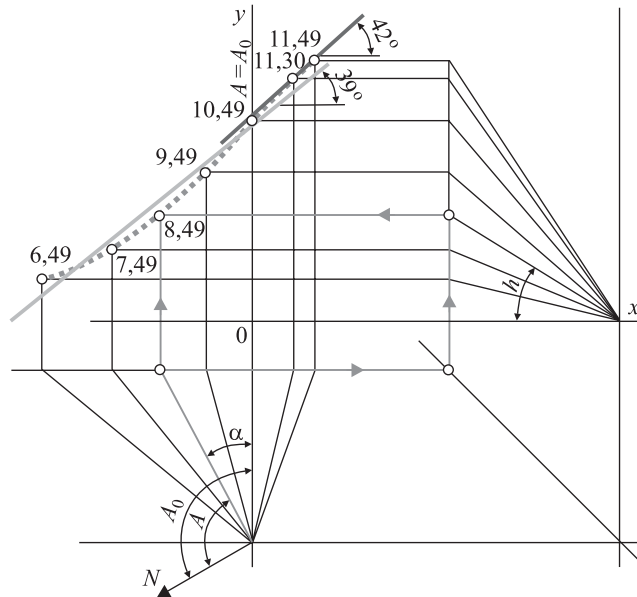


Рис. 2. Определение траектории движения солнца относительно окна и углов наклона решеток фильтра

гранного угла, когда двугранный угол перед расчетным плоским углом равен  $90^\circ$ :  $\cos\Theta = \cosh\cos\alpha$ . Угол падения равен  $\Theta = \arccos(\cosh\cos\alpha)$ . Для дальнейших расчетов следует использовать только углы  $\Theta \leq 60^\circ$ .

4. Значения координат следов траектории солнца на вертикальной плоскости окна рассчитываются в диапазоне углов падения  $\Theta \leq 60^\circ$ :  $x = \text{tg}\alpha$ ;  $y = \text{tgh}$  (из анализа рис. 2). По результатам расчета нанесен след траектории солнца (пунктирная линия на рис. 2). Расчетные точки указаны через каждый час относительно 10 ч 49 мин (время при  $A = A_0$ ), а также для 11 ч 30 мин (времени максимальной солнечной радиации). Для 8 ч 49 мин при азимуте  $A$  и высоте  $h$  солнца стрелками показан порядок получения точки «следа» солнца на плоскости окна.

5. Если задано время  $t_{\min}$  требуемого минимального светопропускания окна (как правило, это время максимальной солнечной радиации), уравнение криволинейной траектории солнца определяется через полученные расчетные точки траектории в выбранный временной интервал (например,  $t_{\min} \pm 30$  мин). Уравнение функции можно найти, используя непараметрический регрессионный анализ. Производная полученной функции, вычисленная для точки, соответствующей  $t_{\min}$ , будет равна угловому коэффициенту  $k_{\text{tg}}$  прямой  $y = k_{\text{tg}}x + b$ , касательной к траектории в этой точке. Искомый оптимальный угол наклона решетки фильтра на плоскости окна, полученный путем построения касательной, равен  $\gamma_{\text{tg}} = \arctg k_{\text{tg}}$  ( $42^\circ$  на рис. 2).

Если время  $t_{\min}$  не задано, выполняется линейная аппроксимация криволинейной траектории и находится уравнение прямой  $y = k_{\text{app}}x + b$ . Используя  $k_{\text{app}} = \text{tg}\gamma_{\text{app}}$ , искомый оптимальный угол наклона решеток фильтра, полученный путем аппроксимации, будет равен  $\gamma_{\text{app}} = \arctg k_{\text{app}}$  ( $39^\circ$  на рис. 2). Определенные обоими способами углы наклона решеток фильтра адаптиро-

ваны к траектории движения солнца относительно окна. В таблице приведены результаты расчета углов наклона решеток фильтра для разных азимутов окон, определенные путем аппроксимации по алгоритму, приведенному в [13], и по предложенному новому алгоритму.

Углы наклона, полученные по новому алгоритму, имеют большие значения. Для южного окна с азимутом  $180^\circ$  углы одинаковы, так как траектория солнца в этом случае симметрична относительно его зенитного положения.

Разработанный метод оптимизации угловой селективной фильтрации прямого солнечного излучения путем минимизации светопропускания окна за счет наклонного расположения на его поверхности двух тонкопленочных поверхностных решеток оптического фильтра с чередующимися пропускающими и непропускающими параллельными полосами под оптимальным углом, рассчитанным для заданной даты и времени суток с учетом азимута ориентации окна, географической широты, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечной радиации, имеет перспективы для применения в архитектуре и строительстве. Особенно это касается рабочих и административных помещений, так как в рабочее (дневное) время есть необходимость углового селективного регулирования прямого солнечного излучения, проходящего внутрь помещений. Смарт-окна с подобными фильтрами позволят достичь адаптированного регулирования светопропускания окна при сложной траектории движения солнца относительно него без применения жалюзи или других вспомогательных механических устройств, обеспечивая комфортный дневной свет и инсоляцию, блокируя прямое излучение в заданном интервале времени и передавая диффузное и отраженное излучение.

**Углы наклона решеток фильтра для разных азимутов окон, град.**

Азимут окна	Угол наклона решеток	
	по алгоритму [13]	по новому алгоритму
90	35	42
120	30	38
150	18	30
180	0	0

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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* // ASME J. Sol. Energy Eng. 2003. No. 125 (3). P. 236–244.
2. Horowitz F., Pereira M.B., de Azambuja G.B. *Glass window coatings for sunlight heat reflection and co-utilization* // Appl. Opt. 2011. No. 50. P. C250–C252.
3. Ferrari J.A., Perciante C.D. *Two-state model of light induced activation and thermal bleaching of photochromic glasses: theory and experiments* // Appl. Opt. 2008. No. 47. P. 3669–3673.
4. Jostmeier T., Mangold M., Zimmer J., Karl H., Krenner H.J., Ruppert C., Betz M. *Thermochromic modulation of surface plasmon polaritons in vanadium dioxide nanocomposites* // Opt. Express. 2016. No. 24 (15). P. 17322.
5. 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.

6. 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.
7. Rumbarger J., Vitullo R.J. *Architectural Graphic Standards for Residential Construction.* John Wiley and Sons, 2003.
8. Fernandes L.L., Lee E.S., McNeil A., Jonsson J.C., Nouidui T., Pang X., Hoffmann S. Angular selective window systems: Assessment of technical potential for energy savings // *Energy and Buildings.* 2015. No. 90. P. 188–206.
9. Luecke G.R., Slaughter J. Design, development, and testing of an automated window shade controller // *ASME J. Sol. Energy Eng.* 1995. No. 117(4). P. 326–332.
10. Закируллин Р.С. Интеллектуальное окно с угловым селективным светопропусканием // *Изв. вузов. Строительство.* 2013. № 5. С. 101–106.
11. Zakirullin R.S. An optical filter with angular selectivity of the transmittance // *Journal of Optical Technology.* 2013. No. 80 (8). P. 480–485.
12. Zakirullin R.S. Creating optical filters with angular-selective light transmission // *Appl. Opt.* 2015. No. 54 (21). P. 6416–6419.
13. Zakirullin R.S., Letuta S.N. A smart window for angular selective filtering solar radiation // *Solar Energy.* 2015. No. 120. P. 585–592.

**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 12.09.18

**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

## **OPTIMIZED ANGULAR SELECTIVE FILTERING DIRECT SOLAR RADIATION**

The article is devoted to the actual problem of developing innovative smart windows with the use of modern materials and a new approach to providing in rooms comfortable condition for natural lighting, insolation and sun protection to meet the hygienic requirements imposed. Such smart windows are designed for the adapted regulation of the light transmission of a window with a complex trajectory of the sun's movement relative to it without the use of blinds or other auxiliary mechanical devices. A method for optimizing the angular selective filtering of direct solar radiation is considered by minimizing the light transmission of a window at a given date and time of day, taking into account the azimuth of the orientation of the window, geographical latitude, and the seasonal and daily distribution of the intensity of solar radiation. Optimization is carried out through the use of a new type of optical filter having two thin-film surface gratings with alternating transmissive and non-transmissive parallel strips located obliquely on the window surface at an optimal angle calculated by the new method to adapt to the actual trajectory of the sun's movement relative to the plane of the vertical window.

**Key words:** solar radiation, smart window, optical filter, thin-film surface gratings, angular selective filtering.

REFERENCES

1. 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. ASME J. Sol. Energy Eng. 2003. No. 125 (3). Pp. 236–244.
2. Horowitz F., Pereira M.B., de Azambuja G.B. Glass window coatings for sunlight heat reflection and co-utilization. Appl. Opt. 2011. No. 50. Pp. C250–C252.
3. Ferrari J.A., Perciante C.D. Two-state model of light induced activation and thermal bleaching of photochromic glasses: theory and experiments. Appl. Opt. 2008. No. 47. Pp. 3669–3673.
4. Jostmeier T., Mangold M., Zimmer J., Karl H., Krenner H.J., Ruppert C., Betz M. Thermochromic modulation of surface plasmonpolaritons in vanadium dioxide nanocomposites. Opt. Express. 2016. No. 24 (15). P. 17322.
5. 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.
6. 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.
7. Rumbarger J., Vitullo R.J. Architectural Graphic Standards for Residential Construction. John Wiley and Sons, 2003.
8. Fernandes L.L., Lee E.S., McNeil A., Jonsson J.C., Nouidui T., Pang X., Hoffmann S. Angular selective window systems: Assessment of technical potential for energy savings. Energy and Buildings. 2015. No. 90. Pp. 188–206.
9. Luecke G.R., Slaughter J. Design, development, and testing of an automated window shade controller. ASMEJ. Sol. Energy Eng. 1995. No. 117 (4). Pp. 326–332.
10. Zakirullin R.S. Intellektual'noe okno s uglovym selektivnym svetopropuskaniem [A smart window with angular selectivity of light transmission]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 5. Pp. 101–106. (in Russian)
11. Zakirullin R.S. An optical filter with angular selectivity of the transmittance. Journal of Optical Technology. 2013. No. 80 (8). Pp. 480–485.
12. Zakirullin R.S. Creating optical filters with angular-selective light transmission. Appl. Opt. 2015. No. 54 (21). Pp. 6416–6419.
13. Zakirullin R.S., Letuta S.N. A smart window for angular selective filtering solar radiation. Solar Energy. 2015. No. 120. Pp. 585–592.