

УДК 001.895

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШЕТОЧНОГО СМАРТ-ОКНА В ЧАСТИ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ И ИНСОЛЯЦИИ В ПОМЕЩЕНИИ

**Е.В. Пикалова**

Оренбургский государственный университет, Российская Федерация

e-mail: slyotina.evgenia@yandex.ru

*Смарт-окна с передовыми покрытиями стекол, обеспечивающие комфортный дневной свет и тепловую среду в помещении, являются важным компонентом повышения энергоэффективности зданий. Рассмотрено смарт-окно с дополнительной функцией угловой фильтрации солнечного излучения без использования жалюзи и других устройств. Такое окно имеет оптический фильтр, состоящий из параллельных непрозрачных полос на двух поверхностях стекла. Фильтр обеспечивает комфортное дневное освещение в помещении. Приведены методы оптимизации распределения естественного освещения и инсоляции в помещении с помощью окна с решеточным фильтром.*

**Ключевые слова:** решеточный оптический фильтр, смарт-окно, угловое селективное светопропускание, солнечное излучение, хромогенные материалы, угловые и временные характеристики светопропускания.

## METHODS FOR OPTIMIZING THE DISTRIBUTION OF NATURAL LIGHT AND INSOLATION IN A ROOM USING A WINDOW WITH A LATTICE FILTER

**E. Pikalova**

Orenburg State University, Russian Federation

e-mail: slyotina.evgenia@yandex.ru

*Smart windows with advanced glass coatings that provide comfortable daylight and a warm indoor environment are an important component of improving the energy efficiency of buildings. A smart window with an additional function of angular filtration of solar radiation without the use of blinds and other devices is considered. Such a window has an optical filter consisting of parallel opaque stripes on two glass surfaces. The filter provides comfortable daylight in the room. The methods of optimizing the distribution of natural light and insolation in the room using a window with a lattice filter are given.*

**Keywords:** lattice optical filter, smart window, angular selective light transmission, solar radiation, chromogenic materials, angular and temporal characteristics of light transmission.

**Введение.** Последние несколько десятилетий довольно широко применяются смарт-окна с особыми покрытиями поверхности стёкол. Использование таких окон обеспечивает комфортный для людей световой и тепловой режимы внутри различных помещений. Смарт-окна в значительной мере повышают энергоэффективность зданий [1; 2]. В целях фильтрации излучения Солнца в смарт-окнах применяются хромогенные и другие материалы, обладающие различными механизмами пропускания света в зависимости от внешних условий окружающей среды либо действия электрического тока.

Смарт-окно при переводе в непрозрачный режим работы ослабляет пропускание нескольких излучений. Первым является прямое солнечное излучение, вторым – рассеянное солнечное излучение, третьим – отражённое солнечное излучение. Для комфортных человеку условий нахождения в помещении необходимо обеспечить пропускание в помещение рассеянный свет неба и свет, который отражается от поверхностей окружающих зданий и земли, а также ограничить пропускание прямых солнечных лучей в зависимости от положения Солнца относительно окна. Такое регулирование пропускания света окна относительно угла падения солнечных лучей в настоящее время осуществляется при помощи жалюзи и других устройств. Применяемые в настоящее время в смарт-окнах плёнки, характеризующиеся наклонно-столбчатой микроструктурой, не могут в полной мере управлять пропусканием солнечных лучей в сплошном спектре солнечного излучения при движении Солнца в широких угловых диапазонах. Такие стёкла позволяют регулировать температуру в помещении, инсоляцию и уровень освещённости, однако не обеспечивают угловое селективное светопропускание окон в зависимости от положения Солнца. Приведённое угловое селективное светопропускание окон, динамически адаптирующихся к положению Солнца, обеспечивает решеточный оптический фильтр без необходимости применения жалюзи и других устройств [3–5]. Особое размещение решёток фильтра, которые состоят из пропускающих и непропускающих полос, обеспечивает защиту помещения от воздействия прямых солнечных лучей в заданном интервале углов падения. При данном расположении решёток фильтр пропускает рассеянный свет.

Научные исследования в области хромогенных технологий показывают, что наиболее перспективными материалами для применения в смарт-окнах являются фотохромные, газохромные, термохромные, электрохромные и термотропные материалы.

**Экспериментальная часть.** В настоящее время жалюзи вертикального и горизонтального расположения выступают лучшими устройствами для регулирования пропускаемого солнечного излучения. Наиболее значимым превосходством решеточного фильтра относительно указанных жалюзи является то, что для оптимизации светопропускания в помещении необходимое количество полос решеток, расположенных чередованием, можно разместить на стекле под любым углом. В рассматриваемых окнах, как правило, могут быть использованы такие полосы, которые способны инфракрасный или ультрафиолетовый спектр излучения отразить или поглотить. И при этом расположении полос угол наклона решеток оптического фильтра определяется по нижеуказанному алгоритму, при этом толщина и показатель преломления стекла, ширина и долгота размещения здания ранее известны [3].

1. Значения высоты  $H$  и азимута  $A$  Солнца следует находить в определённые дни года. Их следует устанавливать при помощи некоторых компьютерных программ в дни весеннего и осеннего равноденствия и дни летнего и зимнего солнцестояния каждый час относительно Солнца, расположенного в зените.

2. Для исследуемого смарт-окна с решеточным оптическим фильтром азимут Солнца  $\alpha$  отсчитывается от перпендикуляра к плоскости окна в точке падения и определяется по следующей формуле:

$$\alpha = A - A_0. \quad (1)$$

3. Далее по приведённой формуле (2) рассчитывается угол падения солнечного луча на окно с ровной поверхностью, расположенной в вертикальной плоскости. При этом приве-

дённый угол определяется посредством частного случая первой теоремы косинусов для трехгранного угла в том случае, когда двугранный угол перед искомым плоским углом равен  $90^\circ$ .

$$\cos \theta = \cos H \cos \alpha . \quad (2)$$

По формуле (3) находится угол падения:

$$\theta = \arccos[\cos H \cos(A - A_0)] . \quad (3)$$

4. Следующим этапом, выделенным в формуле (4), является расчёт угла преломления согласно закону Снеллиуса:

$$\theta_n = \arcsin(\sin \theta / n) . \quad (4)$$

5. Для окна, имеющего одинарное остекление и ровную поверхность, расположенную в вертикальной плоскости, (рисунок 1, а) координаты следа выходной поверхности  $x$  и  $y$  точки  $O$  падения на входную поверхность решеточного оптического фильтра определяются по формуле (5):

$$\begin{cases} x = \tan \beta \\ y = -\{\tan(\theta_n - |\beta|) / \cos \beta\} \end{cases} , \quad (5)$$

где  $\beta$  – угол преломления, соответствующий азимутальному углу падения  $\alpha$ , вычисленный из следующей пропорции:

$$\beta = \theta_n \alpha / \theta . \quad (6)$$

Координаты следов точек падения на входную поверхность решеточного фильтра определяются через равные промежутки времени, соответствующие одному часу для дней весеннего и осеннего равноденствия и дней летнего и зимнего солнцестояния. Для окна, имеющего двойное остекление (рисунок 1, б), координаты следа выходной поверхности  $x$  и  $y$  определяются по следующей формуле:

$$\begin{cases} x = \tan \alpha \\ y = -\{\tan(\theta - |\alpha|) / \cos \alpha\} \end{cases} . \quad (7)$$

6. Далее строятся траектории следа выходной поверхности точки падения за дни весеннего и осеннего равноденствия и дни летнего и зимнего солнцестояния.

7. По построенным следам с одинаковым временем в дальнейшем строятся изохроны. Траектория следов симметрична относительно вертикали для окна с южной ориентацией. Следовательно, точка падения на входную поверхность оставляет следы на выходной поверхности по достаточно сложной и изменяющейся траектории в зависимости от времени года и времени суток.

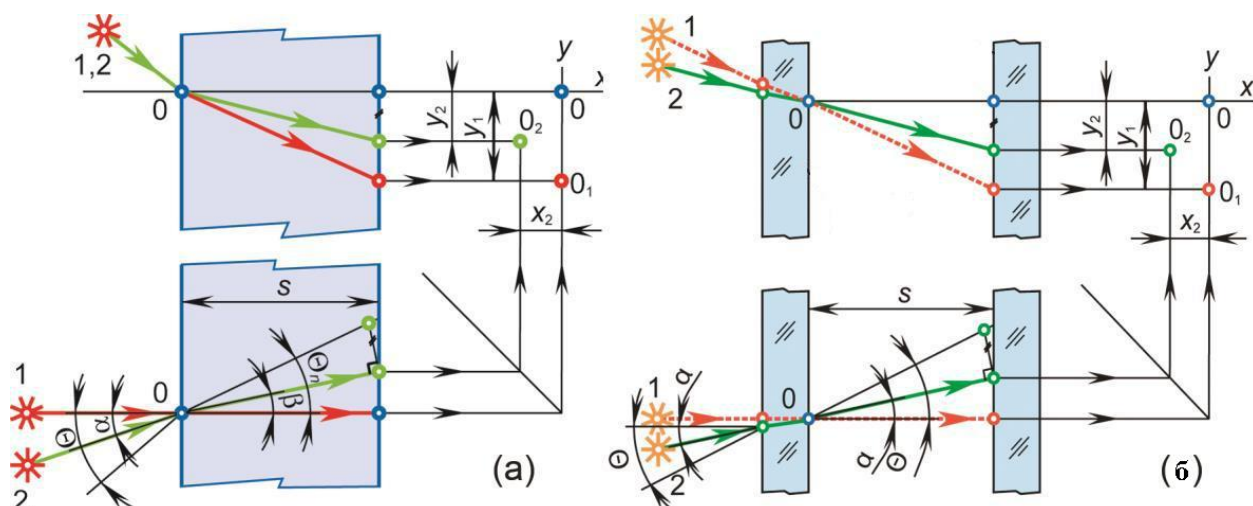


Рисунок 1. – Координаты  $x$  и  $y$  следов  $O_1$  и  $O_2$  на выходной поверхности решеточного фильтра для точки падения  $O$  на одинарном (а) [3] и двойном (б) [5] остеклении

8. В целях нахождения наиболее оптимального угла наклона решеток фильтра следует назначить определённые дату и время, учитывая максимальные требования к защите от Солнца.

Приведённый алгоритм определения угла наклона решеток фильтра позволяет оптимизировать пропускание солнечного света в зависимости от ориентации определённого смарт-окна по различным сторонам света и известной траектории движения Солнца. Данный алгоритм в дальнейшем был усовершенствован в [5] посредством выбора даты для расчета с учетом местных климатических условий. В качестве указанной даты принимается середина самого тёплого периода года в регионе или день с максимальным излучением солнечного света. В дальнейшем определяется время положения Солнца в зените и время максимального излучения солнечного света в выбранную дату. В связи со снижением прозрачности атмосферы во второй половине дня, связанной с наличием конвективной облачности и увеличением запылённости и влажности, наибольшая интенсивность прямого солнечного излучения в летний период приходится на утренние часы. Усовершенствованный алгоритм [5] отличается от алгоритма, приведённого выше, с пункта б.

9. В выбранную дату строятся траектории следа выходной поверхности точки падения через часовые точки с рассчитанными координатами  $x$  и  $y$ . Симметричность траектории следа относительно прямой, проходящей сквозь точку момента равенства азимута Солнца и смарт-окна, будет видна исключительно у смарт-окна с азимутом, равным  $180^\circ$ . В этот момент траектория Солнца будет симметрична относительно исследуемого окна. В рассматриваемом случае полосы решеток оптического фильтра необходимо располагать на смарт-окне строго горизонтально.

10. Строится линия симметрии траектории следа. При этом время принимается различное, например, время с максимальным излучением солнечного света. В этом случае оптимальным углом наклона решеток фильтра на рассматриваемом стекле смарт-окна будет являться угол между перпендикуляром к указанной линии симметрии, проведенным через точку траектории следов, и горизонталью.

Одним из более эффективных способов определения оптимального угла наклона решеток фильтра смарт-окна является метод, рассмотренный ниже [4].

1. Для расчёта высоты  $H$  и азимута  $A$  Солнца необходимо определить дату и обозначить определённый промежуток времени для исследования (например, каждый час, минута и т.п.). Данный расчёт производится относительно момента времени, когда азимут Солнца  $A$  и азимут

смарт-окна  $A_0$  ( $0^\circ \leq A_0 < 360^\circ$ ) становятся равны ( $A=A_0$ ). Расчёты необходимо осуществлять посредством компьютерных программ, в требования которых входит наличие учёта географических координат здания. При этом следует учитывать, что солнечные лучи падают в той плоскости, которая является перпендикулярной смарт-окну.

2. Азимут Солнца  $\alpha$  измеряется от перпендикуляра к плоскости окна в точке падения и определяется по приведённой ранее формуле (1).

Для осуществления произведения дальнейших расчётов следует принимать во внимание только азимуты в пределах, равных  $-70^\circ \leq \alpha \leq +70^\circ$ . Данный учёт связан с увеличением коэффициента отражения при больших углах падения.

3. Далее по приведённым ранее формулам (2) и (3) рассчитывается угол падения. Для всех следующих расчётов следует использовать углы  $\Theta \leq 70^\circ$ .

4. В предпоследнем этапе данного метода рассчитываются по формуле (8) значения координат следа выходной поверхности  $x$  и  $y$  траектории Солнца на вертикальной плоскости смарт-окна в диапазоне углов падения  $\Theta \leq 70^\circ$ :

$$\begin{cases} x = \tan \alpha \\ y = \tan H \end{cases} \quad (8)$$

В результате произведённых расчетов строится след траектории Солнца.

5. При наличии необходимого времени минимальной светопропускной способности исследуемого окна  $t_{\min}$  (как правило, это время максимального солнечного излучения) уравнение криволинейной траектории следует определять посредством определенных точек траектории в выбранном интервале времени (например,  $t_{\min} \pm 15$  мин.). Посредством непараметрического регрессионного анализа определяется уравнение функции. Производная найденной функции рассчитывается для точки минимальной светопропускной способности окна  $t_{\min}$  (время максимального солнечного излучения). Данная производная будет равна угловому коэффициенту  $k_{\tan}$  касательной к траектории для точки в  $t_{\min}$ . Желаемый оптимальный угол наклона решеток оптического фильтра  $\gamma_{\tan}$  на стекле смарт-окна, полученный при построении касательной, находится по формуле:

$$\gamma_{\tan} = \arctan k_{\tan} \quad (9)$$

В том случае, если время минимальной светопропускной способности смарт-окна  $t_{\min}$  изначально не известно, следует произвести линейную аппроксимацию криволинейной траектории, что в дальнейшем позволит определить уравнение прямой:

$$y_{app} = k_{app} x_{app} + b_{app} \quad (10)$$

После проведения аппроксимации искомым оптимальный угол наклона  $\gamma_{app}$  решеток оптического фильтра смарт-окна (с учётом  $k_{app} = \tan \gamma_{app}$ ) определяется по приведённой формуле:

$$\gamma_{app} = \arctan k_{app} \quad (11)$$

На основании изложенного следует, что углы наклона решеток фильтров, найденные по первому алгоритму [3; 5], оказываются меньше, чем по второму алгоритму [4]. Второй алгоритм [4] является более универсальным, а также применим для окон с любым остеклением (одинарным, двойным).

Приведённые методы оптимизации распределения естественного освещения и инсоляции в помещении применены при разработке двухрешеточного смарт-окна с переменной шириной полос решеток [6]. Изобретение относится к области строительства и применяется для углового селективного саморегулирования светопропускания окна с адаптацией к траектории Солнца.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rezaei, S.D., Shannigrahi, S., Ramakrishna, S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. – Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 159. – P. 26–51. – 2017.
2. Casini, M. Active dynamic windows for buildings: A review. – Renewable Energy. – 119. – P. 923–934. – 2018.
3. Zakirullin, R.S., Letuta, S.N. A smart window for angular selective filtering solar radiation. – Sol. Energy. – 120. – P. 585-592. – 2019.
4. Zakirullin, R.S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation. – J. Opt. Soc. Am. A. – 35. – P. 1592–1598. – 2018.
5. Zakirullin, R.S. Optimized Angular Selective Filtering of Direct Solar Radiation. – Applied Solar Energy. – 55. – P. 48–56. – 2019.
6. Двухрешеточное смарт-окно с переменной шириной полос решеток : патент 2804540 Российская Федерация / Р. С. Закируллин, И. А. Оденбах, В. А. Гирин, Е. В. Пикалова; патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. – № 2023111249 заявл. 02.05.2023, опубли. 02.10.2023, бюл. № 28, 2023. – 1 с.