

МЕТОД РАСЧЕТА РЕШЕТОЧНОГО ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ СМАРТ-ОКНА

Представлен метод расчета оптического фильтра с тонкопленочными решеточными слоями на двух поверхностях смарт-окна с одинарным и двойным остеклением. Поверхностные решетки образованы поглощающими, отражающими или рассеивающими параллельными полосами из хромогенных или других смарт-материалов, чередующимися с направленно пропускающими полосами с необработанной частью поверхности чистого стекла. Рассмотрены устройство фильтра и различия в расчете угловой селективной характеристики направленного светопропускания и геометрических параметров фильтра для окон с одинарным и двойным остеклением. Приведен расчет фильтра для окна с двойным остеклением с заданной характеристикой светопропускания при известных широте населенного пункта и азимуте ориентации окна по сторонам света. Результаты расчета подтверждены экспериментально. Смарт-окна с оптическими фильтрами предназначены для обеспечения гигиенических требований к естественному и искусственному освещению и инсоляции, приведенных в санитарно-эпидемиологических правилах и нормативах СанПиН 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях».

Ключевые слова: солнечное излучение, направленное светопропускание, оптический фильтр, поверхностная решетка с чередующимися полосами, угловая селективная фильтрация, гигиенические нормы.

Применение угловой селективной фильтрации солнечного излучения в последние годы постоянно расширяется. Оптический фильтр, основанный на угловой селективной фотонной структуре, используется для увеличения длины пути прохождения излучения через солнечный элемент [1]. Различные концепции для реализации тонкопленочных фильтров с угловой селективностью пропускания сравниваются относительно пределов их эффективности и выходной мощности на единицу площади солнечных батарей [2]. Потенциальные возможности адаптивного пространственного оптического фильтра для обеспечения увеличенной генерации солнечного элемента определены количественно для различных степеней турбулентности и интенсивности рассеянного света неба и для разных углов падения солнечных лучей [3]. В последние десятилетия различные типы смарт-стекла, которые могут быть рассмотрены в качестве оптических фильтров, используются в окнах для достижения оптимального естественного освещения и инсоляции.

Теплосберегающие смарт-стекла с низкоэмиссионными спектрально-селективными тонкопленочными покрытиями [4]–[6] передают видимый спектр и отражают инфракрасное излучение. Светопропускание фотохромного

стекла [7]–[9] обратимо изменяется в зависимости от интенсивности падающего ультрафиолетового или коротковолнового видимого света. Термохромные смарт-окна прозрачны для видимого света при относительно низких температурах и могут контролировать количество проходящей через окно солнечной радиации в ответ на увеличение температуры окружающей среды [10]. В термотропных системах наблюдается зависящее от температуры изменение свойств рассеяния света [11]. Электрохромное смарт-стекло [12], [13] может плавно изменять свою прозрачность и/или цвет при пропускании электрического тока.

Применение смарт-стекол не позволяет добиться селективного регулирования направленного светопропускания по диапазонам углов падения солнечных лучей и динамически адаптироваться к положению солнца. Такое регулирование требует использования дополнительных устройств перераспределения световых потоков (жалюзи и т. п.). Светопропускание окон с жалюзи характеризуется расчетами трассировки лучей, основанными на двунаправленной функции распределения светопропускания [14]. Потенциал статических угловых селективных систем затенения с микроперфорированным экраном, с трубчатой структурой затенения и с расширенной металлической сет-

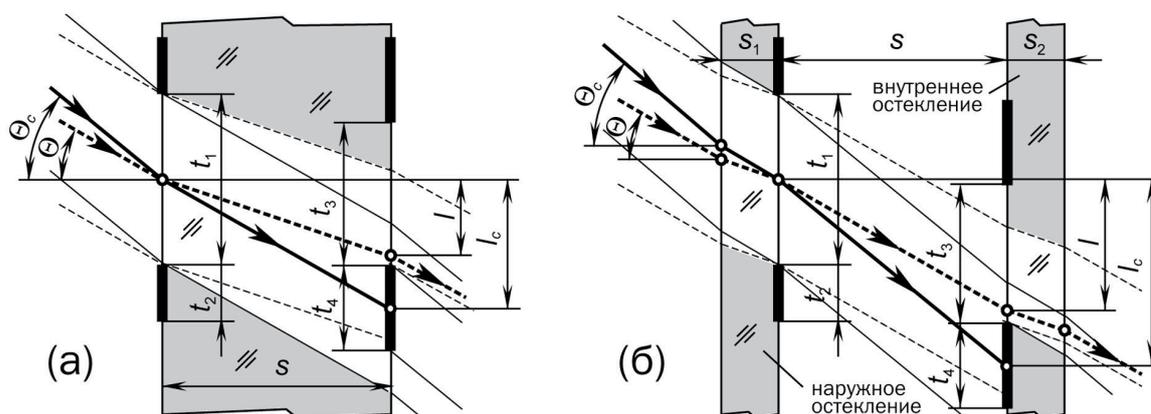
кой определен количественно для сокращения потребления энергии [15]. Основной целью применения дополнительных устройств перераспределения является блокирование прямого солнечного света, чтобы избежать дискомфорта, а также повышения температуры. Количество прямой солнечной радиации [16], падающей на поверхность окна, постоянно меняется в зависимости от времени суток и сезона. База данных метеорологических наблюдений за интенсивностью солнечной радиации по территории Земли приведена в справочниках [17], [18]. На этой основе разработаны методы расчета данных о солнечной радиации для различных районов [19], [20].

Целью работы является обновление и расширение методов расчета угловой селективной характеристики направленного светопропускания и геометрических параметров решетчатого оптического фильтра, приведенных в [21]. Такой фильтр [22]–[24] обеспечивает угловую селективную фильтрацию прямого солнечного излучения с адаптацией к положению солнца без использования дополнительных устройств перераспределения световых потоков, а также гигиенические требования к естественному и искусственному освещению и инсоляции, приведенные в санитарно-эпидемиологических правилах и нормах СанПиН 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях». Способ запатентован в Российской Федерации [25], подана заявка на изобретение в

патентное ведомство США [26]. В статье описана конструкция фильтра, приведены методы его расчета для смарт-окон с одинарным и двойным остеклением, а также результаты расчета фильтра для заданных условий с экспериментальным подтверждением.

Конструкция фильтра

Фильтр состоит из тонкопленочных решетчатых слоев на двух поверхностях окна с одинарным или двойным остеклением (рис. 1). Входные и выходные решетки образованы поглощающими, отражающими или рассеивающими полосами, чередующимися с направленно пропускающими полосами. «Непропускающие» полосы могут быть изготовлены любым из известных способов обработки поверхности, в том числе путем приклеивания пленки с предварительно нанесенными полосами. Выбор ширины чередующихся полос обеих решеток и их смещения друг относительно друга обеспечивает селективное пропускание света в угловых диапазонах. Относительный сдвиг входных и выходных решеток характеризуется углом падения луча (характеристический угол Θ_c фильтра), проходящего через центры их чередующихся полос. На рис. 1 показано, что при изменении угла падения доля направленно проходящего излучения также изменяется. Блокируя прямое излучение частично или полностью в заданном угловом диапазоне, фильтр пропускает рассеянное и отраженное излучение и обеспечивает комфортное естественное освещение и инсоляцию помещения.



t_1 и t_3 – ширины пропускающих полос; t_2 и t_4 – ширины непропускающих полос; s – расстояние между входной и выходной решетками; s_1 и s_2 – толщины наружных и внутренних стекол, Θ_c – характеристический угол фильтра, Θ – угол падения, l_c и l – смещения лучей при характеристическом угле и угле падения

Рисунок 1 – Схемы решетчатого оптического фильтра для окон с одинарным (а) и двойным (б) остеклением

Поглощающие, отражающие или рассеивающие полосы могут затруднять обзор через окно и могут быть применены в вертикальных окнах, не используемых для обзора наружной территории, в окнах с наклонными или криволинейными поверхностями на последних этажах зданий и в световых люках на крыше. Для обеспечения достаточного обзора через окно непронускающие полосы предпочтительнее изготавливать из фотохромных, термохромных, электрохромных или других смарт-материалов. В этом случае решеточный фильтр, имея все преимущества смарт-стекла, будет изменять свои свойства в зависимости от изменения параметров окружающей среды или при пропускании электрического тока.

Использование хромогенных материалов увеличивает стоимость изготовления фильтра, однако общая площадь непронускающих полос двух решеток фильтра всегда меньше, чем площадь полностью покрытой активным слоем одной поверхности обычного смарт-окна [23]. Меньший расход дорогих хромогенных материалов может компенсировать более высокую стоимость изготовления окна с решеточным оптическим фильтром, чем обычного смарт-окна, так что их общая стоимость будет сравнима. Смарт-окна известных типов [21], [23] не обеспечивают угловую селективность пропускания света (без дополнительных устройств) и ослабляют не только прямое, но и рассеянное и отраженное излучение. При примерно одинаковой стоимости окна с решеточным фильтром будут иметь большую функциональность. Кроме того, фильтр не требует ручного или автоматического управления и затрат на электроэнергию, прост в использовании в наклонных и криволинейных окнах, в панорамном остеклении, и создает возможность деления площади окна на зоны с разными характеристиками светопропускания.

Метод расчета угловой характеристики фильтра

Угловая характеристика светопропускания $\tau = f(\Theta)$ вычисляется с помощью графоаналитического метода, подтвержденного экспериментально для различных коэффициентов пропускания в диапазоне углов падения 0° – 90° [23]. Расчет основан на функции смещения луча $l = f(\Theta)$, полученной для окон с одинарным и

двойным остеклением при тригонометрическом анализе рис. 1 с учетом закона Снелла:

$$l = s \sin \Theta / (n^2 - \sin^2 \Theta)^{1/2}; \quad (1)$$

$$l = s \operatorname{tg} \Theta, \quad (2)$$

где s – расстояние между входной и выходной решетками, Θ – угол падения, n – показатель преломления стекла. Теоретическая угловая характеристика фильтра состоит из последовательных областей с увеличивающимся, постоянным максимальным, уменьшающимся и постоянным минимальным направленным светопропусканием τ , вычисляемым соответственно по формулам (3)–(6):

$$\tau = (0,5_{t1} - 0,5_{t4} - l_c + l) / (t_1 + t_2); \quad (3)$$

$$\tau = t_3 / (t_1 + t_2); \quad (4)$$

$$\tau = (0,5_{t1} - 0,5_{t4} + l_c - l) / (t_1 + t_2); \quad (5)$$

$$\tau = (t_1 - t_4) / (t_1 + t_2), \quad (6)$$

где t_1 – ширины полос, l_c и l – смещения лучей при характеристическом угле Θ_c и угле падения Θ (рис. 1). Теоретический коэффициент пропускания должен быть скорректирован с учетом отражения по формулам Френеля, а также поглощения в соответствии с законом Бугера-Ламберта. Пропускание чистого стекла τ_{raw} через окна с одинарным и двойным остеклением рассчитывается, соответственно:

$$\tau_{raw} = (1 - \rho)^4 \exp \{-\alpha s [1 + \sin^2 \Theta / (n^2 - \sin^2 \Theta)^{1/2}]\}; \quad (7)$$

$$\tau_{raw} = (1 - \rho)^4 \exp \{-\alpha_1 s_1 [1 + \sin^2 \Theta / (n_1^2 - \sin^2 \Theta)^{1/2}]\} \exp \{-\alpha_2 s_2 [1 + \sin^2 \Theta / (n_2^2 - \sin^2 \Theta)^{1/2}]\}, \quad (8)$$

где α – натуральный коэффициент поглощения стекла, ρ – коэффициент отражения поверхностей стекла, s – толщина одинарного остекления, α_1 , s_1 , n_1 , α_2 , s_2 и n_2 – параметры наружной и внутренней слоев двойного остекления.

Метод расчета геометрических параметров фильтра

Ширины полос обеих решеток и характеристический угол фильтра для удовлетворения заданной угловой характеристике светопропускания окна определяются по следующему алгоритму (первоначальная версия [21] обновляется и расширяется для окна с двойным остеклением).

1) Заданная угловая характеристика $\tau_{pre} = f(\Theta)$ корректируется, чтобы исключить влияние отражения и поглощения. Скорректированная характеристика вычисляется по формуле: $\tau_{cor} = \tau_{pre} / \tau_{raw}$, где τ_{raw} вычисляется для

окон с одинарным и двойным остеклением по формулам (7) и (8), соответственно.

2) Скорректированная линия τ_{cor} заменяется ломаной линией τ_{app} , полученной в результате кусочно-линейной аппроксимации, т. к. участки теоретических угловых характеристик, вычисленных по формулам (3)–(6) с учетом соотношений (1) и (2), близки к ломаным линиям [23].

3) Значение характеристического угла фильтра Θ_c определяется графически по вертикальной оси симметрии между увеличивающимся и уменьшающимся участками ломаной линии τ_{app} . Эта симметрия значений коэффициента светопропускания является результатом реверсивной замены знаков перед слагаемыми в формулах (3) и (5).

4) Значения ширин полос t_1, t_2, t_3 и t_4 определяются путем решения системы четырех уравнений, одно из которых (рис. 1): $t_1 + t_2 = t_3 + t_4$. Другие три уравнения основаны на формулах (3)–(6) для участков аппроксимированной угловой характеристики τ_{app} . Для составления трех уравнения необходимо взять произвольно три точки на различных участках этой линии и определить графически значения их коэффициентов пропускания τ_i и углов падения Θ_i .

5) Для фильтра с определенными геометрическими параметрами t_1, t_2, t_3, t_4 and Θ_c осуществляется графоаналитический расчет по формулам (1)–(6). Рассчитывается характеристика $\tau_{cal} = f(\Theta)$, которая может отличаться от аппроксимированной линии τ_{app} , если значения геометрических параметров, определенных путем решения системы четырех уравнений, округлены.

6) Действительная (фактическая) угловая характеристика фильтра τ_{fin} с принятыми геометрическими параметрами получается путем коррекции с учетом угловой зависимости коэффициентов отражения и поглощения по формуле: $\tau_{fin} = \tau_{cal} \tau_{raw}$.

Расчет фильтра

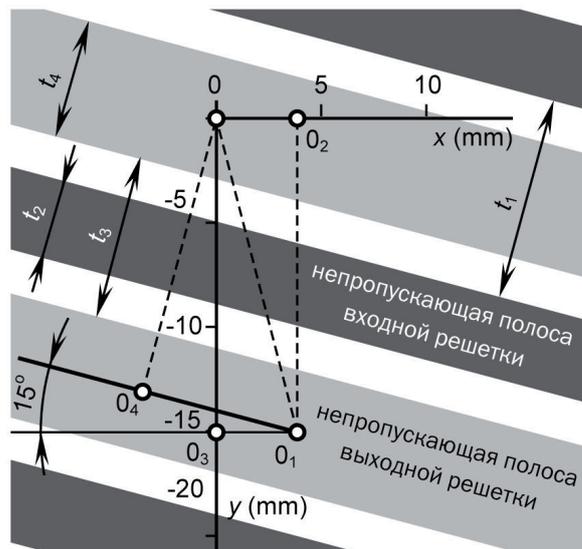
Ширины полос решеток и характеристический угол фильтра для окна с азимутом 120° , обеспечивающие заданный коэффициент направленного светопропускания, определяются по рис. 2–4. На рис. 2 показана схема определения характеристического угла фильтра с учетом оптимального угла наклона его решеток 15° , рассчитанного по методу, приведенному

в [21], для широты г. Оренбурга при азимуте окна 120° . Позиции точек 0 и 0_1 взяты для 11 ч. 30 мин. (момент времени с максимумом солнечной радиации в Оренбурге) для 15 июня (день с максимумом солнечной радиации в Оренбурге). Точка 0_4 является проекцией точки 0_1 на плоскость, перпендикулярную к поверхности стекла. Характеристический угол рассчитывается по расстоянию между точками 0 и 0_4 : $\Theta_c = \arctg |004| / s$. При расстоянии между стеклами 16 мм характеристический угол равен: $\Theta_c = 40,245^\circ$.

Заданная угловая зависимость светопропускания фильтра с $\Theta_c = 40,245^\circ$ представлена на рис. 3 линией τ_{pre} . В соответствии с описанным выше алгоритмом, скорректированная характеристика вычисляется по формуле: $\tau_{cor} = \tau_{pre} / \tau_{raw}$ с учетом формулы (8). Она заменена ломаной линией τ_{app} , возрастающие и убывающие участки которой расположены симметрично относительно вертикальной оси характеристического угла. Для расчета ширин чередующихся полос оставлена система уравнений:

$$\begin{aligned} t_1 + t_2 &= t_3 + t_4; \\ \tau_1 &= (0,5 t_1 - 0,5 t_4 + s \operatorname{tg} \Theta_c - s \operatorname{tg} \Theta_1) / (t_1 + t_2); \\ \tau_2 &= t_3 / (t_1 + t_2); \\ \tau_3 &= (t_1 - t_4) / (t_1 + t_2), \end{aligned} \quad (9)$$

где τ_1, τ_2, τ_3 и Θ_1 взяты из рис. 3 для участков аппроксимированной характеристики τ_{app} . По-



0 – точка падения на входную решетку, 0_1 – ее след на выходной решетке, $0_2, 0_3$ и 0_4 – проекции точки 0_1

Рисунок 2 – Определение характеристического угла фильтра

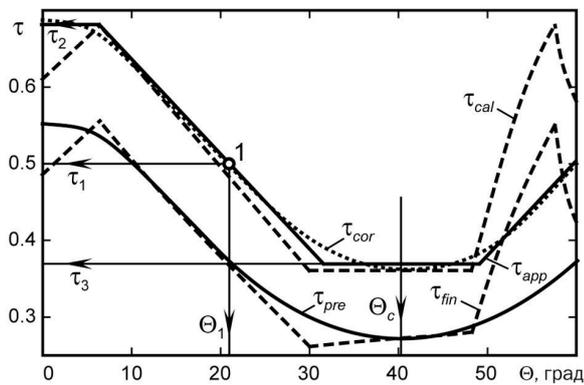
сле решения этой системы получены значения ширин полос: $t_1 = 16,1408$ мм, $t_2 = 7,3538$ мм, $t_3 = 16,0468$ мм, и $t_4 = 7,4478$ мм. Результаты расчета угловой характеристики фильтра с округленными значениями его геометрических параметров $t_1 = 16$ мм, $t_2 = 7,5$ мм, $t_3 = 16$ мм, $t_4 = 7,5$ мм и $\Theta_c = 40^\circ$ показаны на рис. 3 линией τ_{cal} .

Рис. 4 представляет собой схему для графоаналитического расчета фильтра. Лучи, отмеченные $0^\circ, 1-4$ и 60° , обозначают границы солнечного излучения, проходящего через окно (полосы пропускания). Эти лучи проходят через края полос и определяют пять последовательных областей линии τ_{cal} с увеличением, уменьшением, постоянным минимумом, увеличением и уменьшением светопропускания.

Действительная характеристика фильтра τ_{fin} получается после коррекции расчетной характеристики τ_{cal} с учетом угловой зависимости коэффициентов отражения и поглощения по формуле: $\tau_{fin} = \tau_{cal} \tau_{traw}$ с учетом формулы (8). Эти характеристики отличаются друг от друга достаточно сильно при больших углах падения, при которых прямое солнечное излучение проходит в комнату только в приоконное пространство.

Эксперимент

Результаты расчета ширин чередующихся полос решеток и характеристического угла фильтра при оптимальном угле наклона решеток подтверждены экспериментально. Эксперименты проведены 15.06.2016 на модели окна с



$\tau_{pre}, \tau_{cor}, \tau_{app}, \tau_{cal}$ и τ_{fin} – заданная, скорректированная, аппроксимированная, расчетная и действительная характеристики, соответственно

Рисунок 3 – Угловые характеристики фильтра

двойным остеклением с зонами с решеточным оптическим фильтром и без него (чистое стекло). Расстояние между стеклами составляет 16 мм, толщина стекол 4 мм. Геометрические параметры фильтра взяты из предыдущего пункта: $t_1 = 16$ мм, $t_2 = 7,5$ мм, $t_3 = 16$ мм, $t_4 = 7,5$ мм и $\Theta_c = 40^\circ$. Оптимальный угол наклона решеток фильтра составляет 15° для окна с азимутом 120° . Решетки изготовлены путем приклеивания полос черной пленки. Измерения освещенности выполнялись с помощью люксметра перед моделью окна и за ней. Экспериментальный коэффициент пропускания рассчитывался как отношение падающей и проходящей освещенности.

Для сравнения, коэффициент светопропускания модели рассчитывается по времени суток, как отношение полосы пропускания фильтра на сумму: $t_1 + t_2$ [21]. Принцип определения полосы пропускания как расстояния между непропускающими полосами выходной решетки и следа непропускающей полосы входной решетки на поверхности выходной решетки представлен на рис. 5 для 9 ч. 19 мин. Положение точки 0_1 для 11 ч. 30 мин. взято из рис. 2, через эту точку проходит центр непрозрачной полосы выходной решетки. Точка 0_1 является следом точки падения 0 на поверхности выходной решетки в 9 ч. 19 мин. Следы непропускающих полос входной решетки симметричны относительно этой точки.

Расчетные и экспериментальные зависимости светопропускания модели окна от времени суток представлены на рис. 6. Светопропуска-

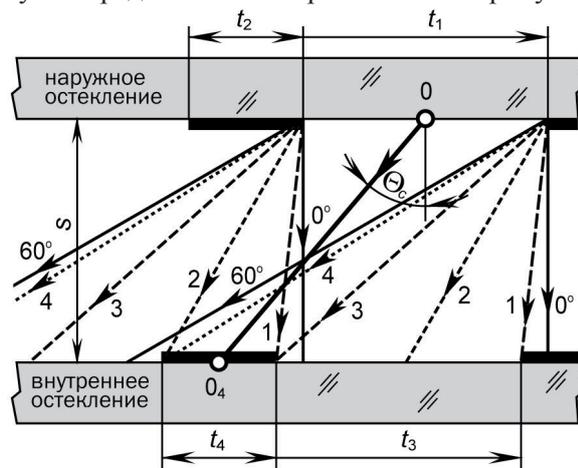
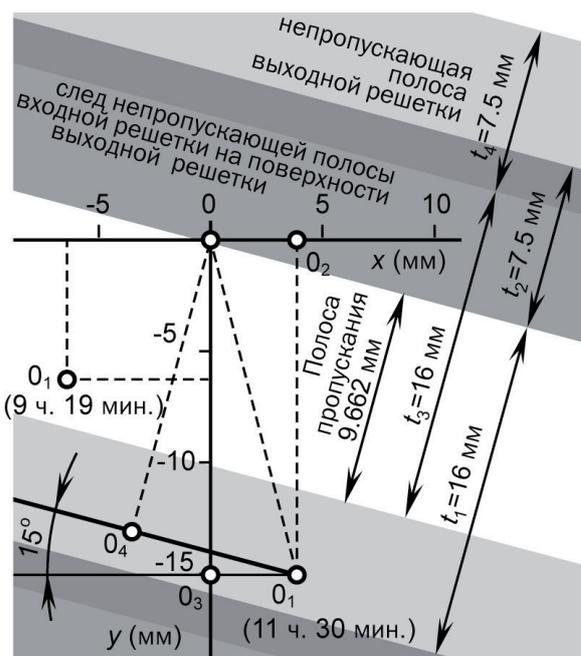


Рисунок 4 – Границы солнечного излучения, проходящего через окно в пределах одного шага полос фильтра



0 – точка падения на входную решетку, O_1 – ее след на выходной решетке

Рисунок 5 – Определение полосы пропускания фильтра

ние зоны чистого стекла рассчитывается по формуле (8) для углов падения прямых солнечных лучей, соответствующих времени суток. Расчетные характеристики построены без учета рассеянного света неба, поэтому их отличие от экспериментальных характеристик достаточно большое. Для широты г. Оренбурга суммарная радиация в середине июня состоит из примерно 58% прямого излучения и 42% рассеянного света неба. Тем не менее, расчетные и экспериментальные характеристики эквидистантны, исключая характеристику фильтра для азимута 120° между 11 час. 49 мин. и 12 ч. 49 мин. (из-за отсутствия экспериментальных данных).

Различие между характеристиками зон с чистым стеклом и фильтром показывает работу фильтра, т. е. принудительное угловое селективное регулирование светопропускания в дополнение к угловой зависимости пропускания чистого стекла из-за изменения коэффициентов отражения и поглощения. Из сравнения характеристик при разных азимутах ориентации модели видно, что угол наклона решеток фильтра 15° более оптимален для окна с азимутом 120° .

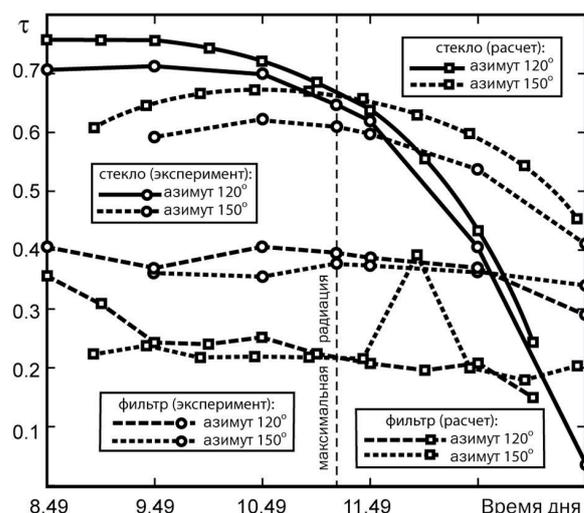


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента светопропускания от времени суток

Заключение

В статье представлен метод расчета оптического фильтра с тонкопленочными решеточными слоями на двух поверхностях смарт-окна с одинарным и двойным остеклением. Рассмотрены устройство и принцип действия фильтра. Показаны различия в расчете угловой селективной характеристики направленного светопропускания и геометрических параметров фильтра для окон с одинарным и двойным остеклением. Приведен пример расчета фильтра для окна с двойным остеклением с заданной характеристикой светопропускания при широте г. Оренбурга и азимуте ориентации окна по сторонам света. Некоторые результаты расчета подтверждены экспериментально при натурных исследованиях модели окна в условиях г. Оренбурга. Фильтр с оптимизированными геометрическими параметрами обеспечивает регулирование светопропускания, адаптированное к положению солнца, без использования в оконной системе дополнительных устройств перераспределения световых потоков. Смарт-окна с разработанными оптическими фильтрами предназначены для обеспечения гигиенических требований к естественному и искусственному освещению и инсоляции, приведенных в санитарно-эпидемиологических правилах и нормах СанПиН 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях».

19.05.2017

Список литературы:

1. Lighttrapping with angular selective filters / M. Peters et al. // Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – Valencia, Spain. – 1–5 September 2008.
2. Maximal power output by solar cells with angular confinement / O. Höhn et al. // Opt. Express. – 22 (S3). – A721. – 2014.
3. Adaptive spatial filtering of daytime sky noise in a satellite quantum key distribution downlink receiver / M.T. Gruneisen et al. // Optical Engineering. – 55 (2). – 026104. – 2016.
4. Macleod, H.A. Thin-Film Optical Filters / H.A. Macleod. – 3rd ed. – Institute of Physics. – Philadelphia, Pa. – 2001.
5. Berning, P.H. Principles of design of architectural coatings / P.H. Berning. – Appl. Opt. – 1983. – 22. – P. 4127–4141.
6. Horowitz, F. Glass window coatings for sunlight heat reflection and co-utilization / F. Horowitz, M.B. Pereira, G.B. de Azambuja. – 2011. – Appl. Opt. – 50. – С. 250–252.
7. Барачевский, В.А. Фотохромизм и его применение / В.А. Барачевский, Г.И. Лашков, В.А. Цехомский. – М.: Химия. – 1977. – 279 с.
8. Nikonorov, N.V. Low-threshold nonlinear-optical response of photochromic glasses with copper chloride nanocrystals / N.V. Nikonorov et al. // J. Opt. Technol. – 2008. – 75. – P. 809–812.
9. Ferrari, J.A. Two-state model of light induced activation and thermal bleaching of photochromic glasses: theory and experiments / J.A. Ferrari, C.D. Perciante // Appl. Opt., 47. – 2008. – P. 3669–3673.
10. Nanoceramic VO₂ thermochromic smart glass: A review on progress in solution processing / Y. Gao et al. // Nano Energy. – 2012. – 1(2). – P. 221–246.
11. Seeboth, A. Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control / A. Seeboth, R. Ruhmann, O. Mühling // Materials. – 2010. – 3. – P. 5143–5168.
12. Andersson, A.M. Electrochromic Li_xWO₃/polymer laminate/Li_yV₂O₅ device: toward an all-solid-state smart window / A.M. Andersson, C.G. Granqvist, J.R. Stevens. – 1989 – Appl. Opt. – 28. – P. 3295–3302.
13. Niklasson, G.A. Electrochromics for smart windows: thin films of tungsten oxide and nickel oxide, and devices based on these / G.A. Niklasson, C.G. Granqvist // J. Mater. Chem. – 2007. – 17. – P. 127–156.
14. Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations / M. Andersen et al. // Solar Energy. – 2005. – 78 (2). – P. 187–198.
15. Angular selective window systems: Assessment of technical potential for energy savings / L.L. Fernandes // Energy and Buildings. – 2015. – 90. – P. 188–206.
16. Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue / P. Blanc // Solar Energy. – 2014. – 110. – P. 561–577.
17. Page, J. The European Solar Radiation Atlas: A valuable digital tool / J. Page, M. Albuisson, L. Wald // Solar Energy. – 2001. – 71 (1). – P. 81–83.
18. Lee, T. Australian Solar Radiation Data Handbook / T. Lee, D. Oppenheim, T.J. Williamson. – Energy Research and Development Corporation, Canberra. – 1995.
19. Marion, W. Calculation of solar radiation using a methodology with worldwide potential / W. Marion, R. George // Solar Energy. – 2001. – 71 (4). – P. 275–283.
20. Gueymard, C. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models / C. Gueymard // Solar Energy. – 2004. – 76 (4). – P. 423–453.
21. Zakirullin, R.S. A smart window for angular selective filtering solar radiation / R.S. Zakirullin, S.N. Letuta // Solar Energy. – 2015. – 120. – P. 585–592.
22. Zakirullin, R.S. Creating optical filters with angular-selective light transmission / R.S. Zakirullin // Appl. Opt. – 2015. – 54. – No. 21. – P. 6416–6419.
23. Закируллин, Р.С. Оптические фильтры с поверхностными решетками для углового селективного регулирования направленного светопропускания : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.05 / Р.С. Закируллин. – Москва, 2016. – 38 с.
24. Zakirullin, R.S. An optical filter with angular selectivity of the light transmission / R.S. Zakirullin // Proc. SPIE. – 2015. – Vol. 9579. – 95790Q. – 9 p.
25. Пат. 2509324 Российская Федерация. Способ регулирования направленного светопропускания / Закируллин Р.С. – №2012130148/28; заявл. 17.07.12; опубл. 10.03.14, Бюл. № 7. – 3 с.
26. Application 13/138,812 US, INT CL6 G 02 B 5/22, U.S. Cl. 359/359; 359/613. Expedient of regulation of the directional gear transmission of light / Zakirullin R. S. (Russian Federation) ; applicant Zakirullin R. S. – № US 13/138,812; fil. 11.05.10; § 371 (c) (1), (2), (4) 29.09.11; publ. 08.03.12, US 2012/0057225 A1. – 22 p.

Сведения об авторе:

Закируллин Рустам Сабирович, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики архитектурно-строительного факультета Оренбургского государственного университета,
доктор технических наук, доцент
460018, Россия, г. Оренбург, пр. Победы, 13, ауд. 3015, т. (3532) 372426, e-mail: rustam.zakirullin@gmail.com