

УДК 628.925:004.925.8

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-53-58

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ, ИНСОЛЯЦИИ И СОЛНЦЕЗАЩИТЫ

канд. пед. наук **И.А. ОДЕНБАХ**
(Оренбургский государственный университет)

В статье описывается численное моделирование геометрических параметров решеток, угловых и временных характеристик светопропускания и пропускания солнечной энергии, оптимизации естественного освещения, инсоляции и солнцезащиты, а также притока тепла от солнечной радиации для оценки влияния на функционирование систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВиК). Представлены эксклюзивные особенности угловых фильтров, включая уникальную формулу для вычисления смещения между входными и выходными решетками при характеристическом угле фильтра и произвольном угле падения света. В удобном табличном формате приведены расчетные формулы и параметры пропускания света для различных границ диапазонов в зависимости от соотношений ширины полос.

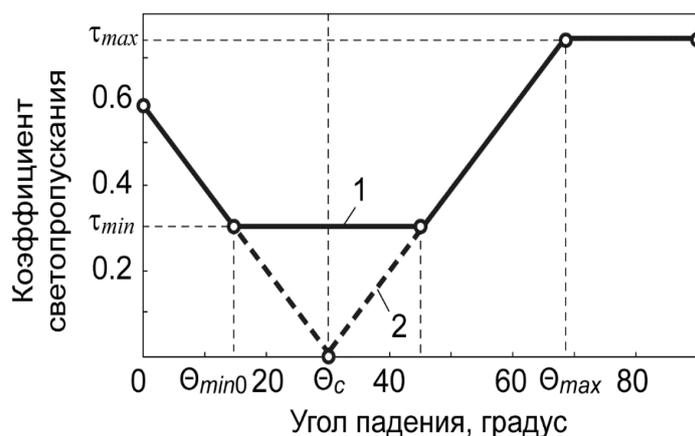
Основным преимуществом смарт-окон, оборудованных такими фильтрами, является возможность изменения угла наклона решеток, что выделяет их среди прочих солнцезащитных устройств, таких как жалюзи, своей универсальностью. Это позволяет обеспечить оптимальную защиту от солнечного света при любом азимуте окна, что наглядно демонстрируется на примере схемы смарт-окон с различными азимутами для здания с круглым фасадом.

Указывается на целесообразность использования смарт-окон, имеющих решетчатые фильтры для зданий с непрямыми фасадами. Это позволит сделать более комфортным естественное освещение в помещениях, регулировать инсоляцию и защищать помещения от попадания прямых лучей солнца.

Ключевые слова: естественное освещение, инсоляция, солнцезащита, смарт-окна, решетчатый фильтр.

Введение. В исследовании [1] были подробно рассмотрены уникальные аспекты пропускания света через смарт-окна с инновационной угловой селективной фильтрацией солнечного излучения. Нами был представлен метод, позволяющий проводить как теоретические, так и практические расчеты характеристик пропускания света через такие окна, учитывая разнообразные геометрические параметры оптического фильтра. Данная методика создана для того, чтобы сократить уровень проникновения света в конкретный момент или за определенный период, принимая во внимание распределение ширины линий на каждой из сеток фильтра.

Угловые характеристики фильтра. Для теоретической характеристики углового значения фильтра в его пропускании света необходимо проследить различные стадии: через минимум к максимуму пропускания света (что отражено на рисунке 1 в первой линии). Диапазон значений пропускания света показывает тот временной период, в рамках которого для фильтра характерно наименьшее пропускание света.



- 1 – с минимальным коэффициентом светопропускания в интервале углов падения;
2 – с минимальным коэффициентом светопропускания при одном угле падения

Рисунок 1. – Угловые характеристики фильтра

На представленном выше графике (см. рисунок 1) вторая линия является примером того, как складывается идеальная ситуация, при которой свет проходит через фильтр в строго обозначенное время, которое соответствует углу облучения. В таком случае пропускные возможности фильтра почти сводятся к нулю. Пропускание света фильтром зависит от угла облучения и имеет симметрию вокруг угла Θ_c .

Для достижения минимального пропускания света через окно в определенный момент дня устанавливается определенное начальное время $t_{\min 0}$ для этого временного интервала. Посредством применения соответствующих математических уравнений определяются координаты точек x и y , в которых солнечный луч падает на входную поверхность фильтра, оставляя свой отпечаток на его выходной стороне.

Формулы, которые применяются для тройного остекления, аналогичны формулам, используемым для двойного остекления. Это связано с тем, что решетки фильтра расположены на внутренней поверхности одного и того же слоя стекла.

Также на рисунке 1 представлено нахождение проекции $\Theta_{\min 0}$ угла падения для определенного времени $t_{\min 0}$ на плоскость, которая перпендикулярна полосам решеток фильтра.

Максимально возможное значение критерия прохождения света через окно варьируется в пределах от 0,30 до 0,88 для одинарного остекления, от 0,30 до 0,80 для двойного остекления и от 0,30 до 0,72 для тройного остекления. Также обозначается определенный временной период t_{\max} , когда показатель пропускания света достигает своего наибольшего значения.

В отношении такого времени найдем координаты x , y , вычислим проекцию угла падения на плоскость, которая является перпендикулярной полосам решеток фильтра.

Показатель пропускания света при одинарном остеклении принимается за основу в качестве отражения (через уравнение Френеля), а также в качестве поглощения (на основе закона Бугера-Ламберта). При расчете используются особые формулы. Минимальный и максимальный теоретические показатели пропускания находятся на основе аналогичных формул при задействовании значений $\Theta_{\min 0}$ и Θ_{\max} , а также τ_{\min} и τ_{\max} .

При формировании линий 1 и 2 на диаграмме (см. рисунок 1) во внимание принимается симметричность прохождения света по отношению к углу фильтра.

Для того чтобы найти значение критерия пропускания света под различным углом, важно определить смещение следов, оставленных на решетках при входе и выходе (Δ):

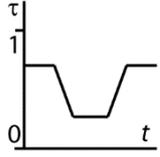
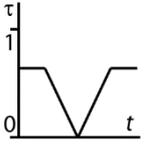
$$\Delta = \sqrt{x_{\min}^2 + y_{\min}^2} \cdot \cos(\gamma - \arctan \frac{x_{\min}}{|y_{\min}|}) - \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos(\gamma - \arctan \frac{x}{|y|}). \tag{1}$$

Расположенная далее таблица 1 содержит необходимые для расчетов формулы и временные периоды, которые соответствуют углам направленности лучей солнца в разные периоды дня.

$\tau = f(t)$ отражает зависимость показателя пропускания света и времени суток. Данная теоретическая характеристика изменяется в зависимости от показателей отражения и поглощения.

На основе этого показателя определяется зависимость фактического показателя пропускания света от времени дня, что обозначается как $\tau_r = f(t)$.

Таблица 1. – Диапазоны, формулы и данные о пропускании света с учетом соотношения ширины полос

Соотношение ширины полос	Границы диапазона	Расчетная формула	Характеристика светопропускания
1	2	3	4
$c_2 < c_4; c_2 < c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta \leq -0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3$ $-0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3 \leq \Delta \leq -0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 < \Delta < 0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3$ $0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3 - c_2}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$	
$c_2 < c_4; c_2 = c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3$ $-0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3 \leq \Delta \leq 0$ $0 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3$ $0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$	

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
$c_2 < c_4; c_2 > c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3$ $-0,5 \cdot c_2 - 0,5 \cdot c_3 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 < \Delta < -0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3$ $0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = 0$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$	
$c_2 = c_4; c_2 = c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta \leq 0$ $0 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{ \Delta }{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta }{c_1 + c_2}$	
$c_2 > c_4; c_2 < c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq -0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 < \Delta < 0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3 - c_2}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$	
$c_2 > c_4; c_2 = c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0$ $0 < \Delta < 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$	$\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$	
$c_2 > c_4; c_2 > c_3$	$-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_2 \leq \Delta < -0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 - 0,5 \cdot c_4 < \Delta < -0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $-0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 \leq \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4$ $0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_4 < \Delta \leq 0,5 \cdot c_1 + 0,5 \cdot c_2$	$\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = 0$ $\tau = \frac{ \Delta - 0,5 \cdot c_2 + 0,5 \cdot c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$	

Рассчитанные коэффициенты направленного пропускания света отображают изменение прямой солнечной радиации, проникающей в помещение. Отраженное и рассеянное излучение, проходящее через фильтрующие решетки, способствует повышению комфорта дневного освещения.

Научные исследования [2; 3] подтверждают преимущества смарт-окон с фильтрами по сравнению с жалюзи, обеспечивая оптимальную солнцезащиту при любом азимуте окна благодаря наличию различных углов наклона решеток. Смарт-окна с фильтрами способны эффективно блокировать прямой солнечный свет в более широком диапазоне углов падения, что делает их более удобными и эффективными для мест с длительным пребыванием людей в светлое время суток, таких как учебные, офисные и промышленные помещения.

Дополнительные исследования¹ показывают, что влияние дифракции на светопропускание решетчатого фильтра в обычных условиях эксплуатации можно считать незначительным. Однако при углах падения более 70°

¹ Zakirullin R., Odenbakh I. Diffraction of Sunlight by Grating Optical Filters in Smart Windows // Advanced Photonics Congress (IPR, Networks, NOMA, PVLED, SPPCom): proceedings of the Conference, OSA, 26–30 July 2021. – P. 1–2.

отражательная способность возрастает, что может усилить дифракционный эффект. Тем не менее, даже при таких углах фильтры эффективно снижают прямую солнечную радиацию.

Было проведено численное моделирование [4], направленное на оптимизацию естественного освещения и инсоляции в зданиях с криволинейными фасадами. Моделирование базируется на оптимизированных параметрах для различных географических регионов, что позволяет определить оптимальные угловые и временные характеристики пропускания света и оценить комфортность микроклимата и экономическую эффективность вентиляции и кондиционирования воздуха.

Схема смарт-окон. Схема на рисунке 2 дает возможность наглядно представить характеристики фильтров для смарт-окон при наличии у зданий круглых фасадов. Данные азимутов принимаются по 135° , 180° и 225° . Несмотря на то, что окна с двойным стеклом имеют одинаковые размеры, используемые для них решетчатые фильтры должны отличаться по своим характеристикам. Таким образом, можно добиться сокращения проникновения света, если солнечные лучи расположены в плоскостях, которые являются перпендикулярными окнам.

Расчеты осуществлялись для Оренбурга по состоянию на 15.06.2020, когда своего наибольшего значения достиг показатель солнечной радиации. Выяснилось, что предпочтительным значением угла наклона для решетчатых фильтров является 36° и 0° [5].

Расчетная схема смарт-окон представлена на рисунке 2.

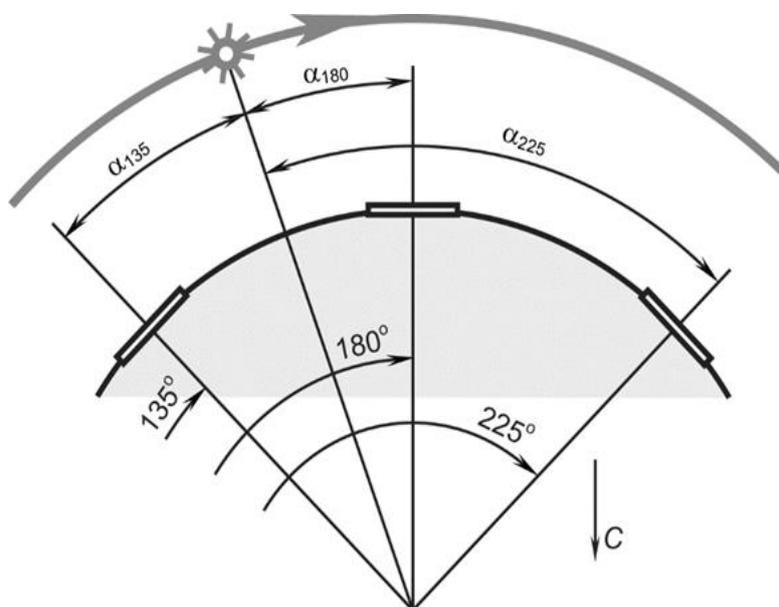


Рисунок 2. – Расчетная схема смарт-окон с разными азимутами для здания с круглым фасадом

Для того чтобы сократить возможность попадания света через окна, азимуты которых равны 135° , 180° и 225° при их непосредственном совпадении с азимутами солнца, на основе специальной избранной формулы был произведен расчет оптимального значения углов. Ширины полос фильтрации были рассчитаны с учетом этих формул и заданных минимальных и максимальных теоретических значений пропускания света $\tau_{\min} = 0$ и $\tau_{\max} = 0,5$. Чтобы обеспечить более ясное сравнение результатов, было проведено численное моделирование с учетом одинаковых ширин полос решеток фильтра для трех типов окон. Это было достигнуто путем установки соответствующих значений среднего угла падения. В результате расчетов были получены следующие данные:

- для азимута 135° $\Theta_c = 49,3872^\circ$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм при $\Theta_{av} = 40,4872^\circ$;
- для азимута 180° $\Theta_c = 61,55^\circ$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм при $\Theta_{av} = 56,88485^\circ$;
- для азимута 225° $\Theta_c = 49,4084^\circ$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм при $\Theta_c = 40,51605^\circ$.

Для вычисления теоретических временных характеристик смарт-окон использовались данные о высоте расположения и азимутах солнца, полученные с помощью онлайн-калькулятора на ресурсе <https://planetcalc.ru/320/>. Информация была собрана с интервалом в 30 минут в течение солнечного дня 15 июня 2020 года, начиная с 06:30 и заканчивая 20:30. Для анализа были выбраны временные точки 11:36, 13:20 и 15:04, когда азимуты солнца совпадали с азимутами окон.

В последующем на основе необходимых формул будет установлен коэффициент пропускания света, применительно к термохромному материалу, имеющему систему, встроенную в тонкую пленку. Исходя из произведенных расчетов, было установлено, что показатели пропускания света и энергии солнца при окрашивании являются равными 0,045 [6]. На основе данной формулы также были найдены коэффициенты пропускания смарт-окна, имеющего по всей площади покрытие в виде термохромного материала.

Данные о пропускании света смарт-окон. На расположенной ниже диаграмме (рисунок 3) содержатся в наглядном виде сведения о прохождении света через смарт-окна, которые имеют решетчатые фильтры (что обозначено верхними линиями на диаграмме), скорректированные версии профилей (средние линии диаграммы), данные обычных смарт-окон (нижние линии диаграммы). Также обозначены те периоды, при которых азимуты солнца и окон являются одинаковыми. За основу были приняты три различных азимута окон: 135° (с 06:30 до 14:30), 180° (с 10:00 до 16:30) и 225° (с 12:30 до 20:30).

Профили прохождения света через смарт-окна отражают минимумы в определенные периоды, когда азимуты окон и солнца совпадают. Следовательно, для окон зданий, имеющих криволинейный фасад, можно установить наиболее эффективный угол наклона решеток, а также подобрать материал, который в окрашенном виде имеет необходимые показатели пропускания света. Это позволит добиться в определенные периоды времени минимального прохождения света через окно.

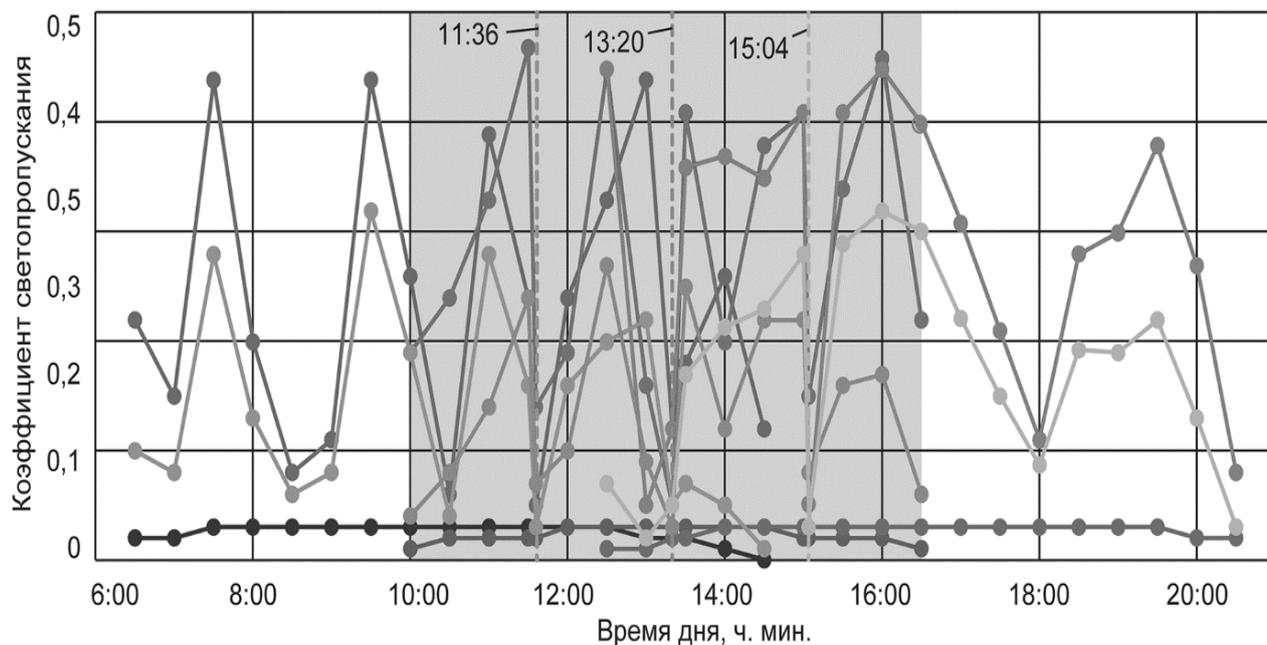


Рисунок 3. – Временные характеристики светопропускания смарт-окон с разными азимутами

На рисунке 3 видно, что решетчатые фильтры содействуют сокращению прохождения света в определенные периоды времени. В те периоды, когда пропускание света не соответствует заданным параметрам, смарт-материалы могут активироваться для перехода на обесцвечивание.

Закключение. На рисунке 3 можно увидеть, что показатели прохождения света для смарт-окна являются неизменными на протяжении всего дня. Решетчатые смарт-окна имеют приоритет перед обычными окнами, так как позволяют под определенным углом регулировать пропускание света, приспосабливать окна к постоянному движению солнца и изменению освещения. Применение данного типа смарт-окон дает возможность сделать более комфортным освещение в помещении, прямой свет такими окнами будет блокироваться, в помещение попадет только рассеянный свет.

При отсутствии штор, жалюзи и аналогичных занавесей повышаются эргономичные и экологические показатели окон, они выглядят гораздо более эстетично. Задействование решетчатых фильтров в зданиях с криволинейными фасадами позволяет сохранить параметры прохождения света, наиболее приемлемые для различных азимуты.

По итогам проведенного исследования было установлено, что смарт-окна, снабженные решетчатыми фильтрами, необходимо задействовать в зданиях, имеющих криволинейные фасады. Это позволит сделать более комфортным естественное освещение в помещениях здания, приспособить пропускание солнечного света через окна к изменению положения солнца по отношению к данным окнам². Исследование показало, что можно провести подсчет оптимальных характеристик фильтров для смарт-окон и сократить проходящий через них солнечный свет в определенный период времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Характеристика светопропускания смарт-окон с угловой селективной фильтрацией солнечного излучения // Изв. вузов. Стр.-во. – 2019. – № 4. – С. 106–113.

² Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Simulation of daylight in buildings with curved facades for rational use of solar energy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Atlanta, GA, US, 9–13 October 2022. – Vol. 979, № 1. – P. 1–6.

2. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Смарт-окно с решеточным оптическим фильтром для динамического контроля дневного освещения // Изв. вузов. Стр-во. – 2019. – № 12. – С. 96–107.
3. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Динамический контроль естественного освещения с помощью смарт-окна с решеточным оптическим фильтром // Светотехника. – 2021. – № 3. – С. 47–51.
4. Оденбах И.А., Закируллин Р.С. Оптимизация естественного освещения и инсоляции зданий с криволинейными фасадами // Academia. Архитектура и стр-во. – 2021. – № 2. – С. 111–116.
5. Zakirullin R.S. A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation // J. Sol. Energy Eng. – 2020. – Vol. 142, № 1. DOI: 10.1115/1.4044059.
6. Seeboth A., Ruhmann R., Mühling O. Thermotropic and thermochromic polymer based materials for adaptive solar control // Materials. – 2010. – № 3(12). – P. 5143–5168.

REFERENCES

1. Zakirullin, R.S. & Odenbakh, I.A. (2019). Kharakteristika svetopropuskaniya smart-okon s uglovoi selektivnoi fil'tratsiei solnechnogo izlucheniya [Light transmission characteristics of smart windows with angular selective filtering of solar radiation]. *Izv. vuzov. Str-vo [News of higher educational institutions. Construction]*, (4), 106–113. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-724-4-106-113. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Zakirullin, R.S. & Odenbakh, I.A. (2019). Smart-okno s reshetochnym opticheskim fil'trom dlya dinamicheskogo kontrolya dnevnogo osveshcheniya [Smart window with grating optical filter for dynamic control of daylighting]. *Izv. vuzov. Str-vo [News of higher educational institutions. Construction]*, (12), 96–107. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-732-12-96-107. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Zakirullin, R.S. & Odenbakh, I.A. (2021). Dinamicheskii kontrol' estestvennogo osveshcheniya s pomoshch'yu smart-okna s reshetochnym opticheskim fil'trom [Daylighting dynamic control by smart window with grating optical filter]. *Svetotekhnika [Light & Engineering]*, (3), 47–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Odenbakh, I.A. & Zakirullin, R.S. (2021). Optimizatsiya estestvennogo osveshcheniya i insolyatsii zdaniy s krivolineinymi fasadami [Optimization of natural lighting and insolation in buildings with curved facades]. *Academia. Arkhitektura i str-vo [Academia. Architecture and construction]*, (2), 111–116. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-111-116. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Zakirullin, R.S. (2020). A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation. *J. Sol. Energy Eng.*, 142(1). DOI: 10.1115/1.4044059.
6. Seeboth, A., Ruhmann, R. & Mühling, O. (2010). Thermotropic and thermo-chromic polymer-based materials for adaptive solar control. *Materials*, 3(12), 5143–5168. DOI: 10.3390/ma3125143.

Поступила 10.11.2023

NUMERICAL MODELING OF NATURAL LIGHTING, INSOLATION AND SUN PROTECTION

I. ODENBAKH
(Orenburg State University)

The article describes numerical modeling of geometric parameters of gratings, angular and temporal characteristics of light transmission and transmission of solar energy, optimization of natural lighting, insolation and sun protection, as well as heat inflow from solar radiation to assess the impact on the functioning of heating, ventilation and air conditioning systems (HVC). The angular characteristics of the filter are presented, a formula for determining the shift between the traces of the input on the plane of the output lattice at the characteristic angle of the filter and an arbitrary angle of incidence. In tabular, calculation formulas and light transmission characteristics are indicated for certain range boundaries, depending on the ratio of band widths.

The advantages of a smart window with a filter are also justified due to the possibility of any angle of inclination of the grilles compared to blinds, which cannot provide optimal sun protection at any azimuth of the window, and the figure shows a diagram of smart windows with different azimuths for a building with a round facade.

The expediency of using smart windows with grid filters in buildings with curved facades to increase the comfort of natural lighting and insolation, protection from direct sunlight is substantiated.

Keywords: natural lighting, insolation, sun protection, smart windows, grid filter.