

УДК 697.7

## МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПРИТОКА ТЕПЛА ОТ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА (ОВК)

**И.А. Оденбах**

Оренбургский государственный университет (ОГУ), г. Оренбург, Российская Федерация  
e-mail: [irina.odembakh23@gmail.com](mailto:irina.odembakh23@gmail.com)

*Рассмотрена методика определения количества солнечной энергии, поступающей через решётчатые смарт-окно, которая отличается от методик, применяемых для других типов окон, включая традиционные смарт-окна. Использование новой методики позволяет достичь в помещении комфортного температурного режима, минимизировать энергопотребление, снизить затраты на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха (ОВК). Для определения интегрального значения величины прямой и рассеянной солнечной радиации, прошедшей через окно, использовался закон Ламберта.*

**Ключевые слова:** солнечная радиация, решётчатое смарт-окно, системы ОВК, освещённость, солнечная энергия.

## METHODS FOR CALCULATING THE HEAT INFLOW FROM SOLAR RADIATION TO ASSESS THE IMPACT ON THE FUNCTIONING OF HEATING SYSTEMS, VENTILATION AND AIR CONDITIONING (HVC)

**I. Odenbakh**

Orenburg State University (OSU), Orenburg, Russian Federation  
e-mail: [irina.odembakh23@gmail.com](mailto:irina.odembakh23@gmail.com)

*The methodology for determining the amount of solar energy coming through lattice smart windows is considered, which differs for other types of windows, including traditional smart windows, to achieve a comfortable temperature regime and minimize energy consumption and costs for heating, ventilation and air conditioning (HVC), taking into account Lambert's law of cosines and window area to calculate the total line and scattered solar radiation that directly passed through the lattice smart window.*

**Keywords:** solar radiation, lattice smart window, HVC systems, illumination, solar energy.

**Введение.** Чтобы поддерживать в помещении заданный тепловой режим, и одновременно свести к минимуму затраты на электричество, теплоснабжение, кондиционирование и воздухообмен, требуется знать, какое количество тепла от солнечного излучения пропускают сквозь себя решётчатые оконные блоки, изготовленные по смарт-технологии. Остановимся на методике расчета, которая качественным образом отличается от методик, обычно используемых для разных моделей оконных блоков, в том числе для классических окон, изготовленных по смарт-технологиям.

**Экспериментальная часть.** Для получения на поверхности оконного стекла покрытий с заданными свойствами, которые имеют необходимые показатели по рассеиванию светового излучения, его отражению и поглощению, применяется широкий спектр технологий. Самыми распространенными среди них являются: диффузия частиц в поверхностный слой; абразивная обработка с целью получения матовой поверхности; химическое травление; электролитическая

обработка; конденсация на поверхности; технологии горячего осаждения оксидов металлов на холодную или нагретую поверхность; обработка поверхности высокочастотными токами; обработка при помощи ионизирующих излучений разной природы. Это далеко не полный перечень современных технологий, которые могут использоваться для достижения необходимого результата. При этом при использовании каждой технологии необходимо строго следовать имеющимся методическим рекомендациям, правильно готовить изделие к обработке, соблюдать технологический режим по всем необходимым параметрам [1].

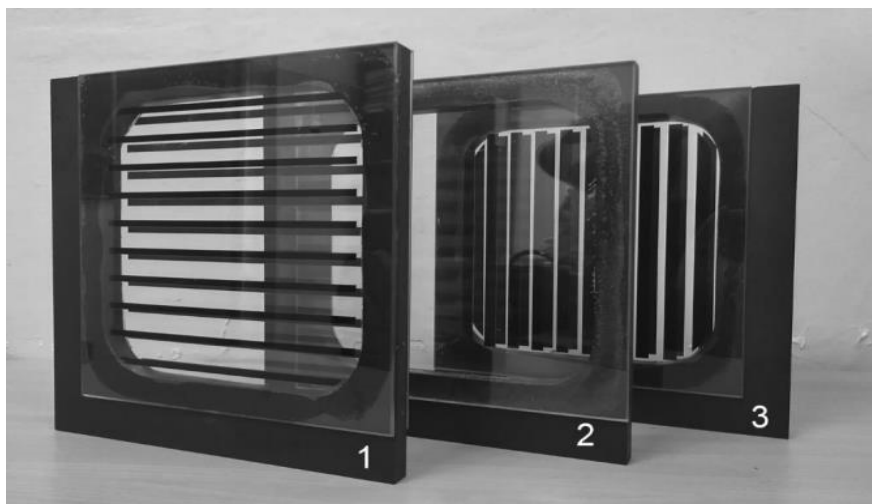
Процесс изготовления решеточных оконных блоков в технологическом плане заметно отличается от процесса производства классических оконных покрытий. Для создания эффекта решетки используется нанесение нанослоя хромогенного реагента. И если при использовании классических технологий получается сплошное покрытие, то в данном случае хромоген ложится на поверхность стекла тонкими параллельными линиями. Если для обработки применяются такие технологии, как абразивная обработка, химическое травление, нанесение краски, осаждение из растворов, облучение, использование высокочастотных токов, то для получения эффекта решетки нужно использовать трафареты, которые защищают необходимую часть поверхности стекла от внешнего воздействия. Такие трафареты обычно называют масками. Чаще всего они имеют вид параллельных щелей, между которыми расположены участки, защищающие стекло от обработки.

Поскольку хромогенные покрытия достаточно чувствительны к внешним воздействиям, особенно механическим, то при изготовлении стеклопакетов их наносят на внутреннюю сторону стекла. При этом нужно принимать во внимание конструктивные особенности стеклопакета (двухкамерный или однокамерный), а также расстояние между стеклами и химический состав газа в камере. Если же хромогенное покрытие наносится на простое стекло (не стеклопакет), то его необходимо обрабатывать защитным слоем.

Маски, при помощи которых создаются необходимые полосы на поверхности стекла, можно выполнить с использованием 2-D или 3-D принтеров. При необходимости можно сделать более толстое покрытие, но для этого потребуется несколько проходов принтера.

Как вариант, можно использовать сплошную пленку, на которой уже нанесены необходимые полосы. Ее в этом случае наклеивают на поверхность стекла, а после обработки снимают. Защита тех участков стекла, которые не нужно обрабатывать, достигается использованием преломляющих, рассеивающих, хромогенных и иных покрытий. Выбор в данном случае зависит от технологии, которую решено использовать. При этом можно обрабатывать не только стекла для новых стеклопакетов, но и стеклопакеты, которые уже находились в эксплуатации. Электрохромные покрытия легко наносятся, так как применяемая для этого защитная пленка выпускается в рулонах, либо листах разного размера. Таким покрытием ламинируют поверхность оконного стекла. Существуют покрытия, с помощью которых можно регулировать поток солнечного излучения сквозь стекло [2]. Варианты окон с двумя стеклами, одно из которых чистое, а на второе наносится покрытие в виде полос разного размера, изображены на рисунке 1. Они используются для проведения научных исследований в данной области.

Результаты научных исследований показали, что при использовании большинства имеющихся технологий нанесения пленочных покрытий наиболее целесообразно наносить широкие полосы на внутреннюю поверхность стекол стеклопакета. Технически это проще, чем делать полосы с двух сторон стекла, если оно используется самостоятельно, или применять термотропную пленку между стеклами. Качество и характеристики решеток в первую очередь определяются используемыми технологиями их нанесения. В большинстве случаев используется осаждение активного вещества на поверхность стекла из газовой среды. От выбора активного вещества и от условий его осаждения также будут зависеть характеристики решеток.



1 – с решёткой с разными ширинами полос решёток; 2 – без решеток;  
3 – с решёткой с одинаковыми ширинами полос решёток

Рисунок 1 – Модели смарт-окон с двойным остеклением

Эффективность работы решеток во многом зависит от правильно выбранного угла их наклона относительно потока солнечного излучения. При этом нужно принимать во внимание местные погодные условия и высоту солнца над горизонтом, которая зависит от широты местности [3]. Для проведения расчетов необходимо определить, какой период в данной местности является самым жарким. В границах этого периода выбирается день, в который наблюдалось самое сильное тепловое излучение от солнца. Также нужно знать, в какое время солнце находится максимально высоко над горизонтом, и в какое время тепловой поток от него максимальный. Расчет наиболее эффективного угла решетки представляет последовательность следующих действий:

1. В день проведения измерений с интервалом в один час определяют высоту солнца над горизонтом и угол между направлением солнечного теплового потока и поверхностью оконного стекла.

2. Для каждого окна определяется угол между перпендикуляром к оконной поверхности и направлением на солнце.

3. Измерения проводятся при условии, что поверхность оконного стекла перпендикулярна поверхности земли.

4. С интервалом раз в час отмечают точки, куда солнечный тепловой поток падает, и куда потом выходит.

5. В конце дня определяется траектория, по которой перемещается пятно солнечного потока, прошедшего через фильтр.

6. На основании этой траектории рассчитывается наиболее эффективный угол, на который должны быть выставлены решетки, чтобы внутрь помещения попадало как можно больше солнечной энергии в течение светового дня [3].

В данном случае были усовершенствованы варианты определения наиболее эффективного угла решеток, а также определено наилучшее значение ширины пропускающих и поглощающих полос. При этом принималось во внимание расположение окна относительно солнца, географическая широта местности, изменения интенсивности теплового потока от солнца в зависимости от сезона и времени суток. Оптимальное значение искомого угла определялось на заранее выбранную дату. Были выведены уравнения для определения значений

$x$  и  $y$  в случае использования одного стекла:  $\frac{\alpha_n}{\alpha} = \frac{\theta_n}{\theta}$  а также определена величина искомого отрезка (4):

$$x = \frac{-s \tan\{\alpha \arcsin(\frac{\sin\theta}{n})\}}{\theta};$$

$$y = \frac{\frac{-s \tan\{h \arcsin(\frac{\sin\theta}{n})\}}{\theta}}{\frac{\cos\{\alpha \arcsin(\frac{\sin\theta}{n})\}}{\theta}}.$$

При использовании двухкамерного стеклопакета величины координат определяются по уравнению:

$$x = \tan \alpha \cdot s_0;$$

$$y = \frac{\tan h \cdot (-s_0)}{\cos \alpha}.$$

Способ вычисления угла фильтра показан на рисунке 2:

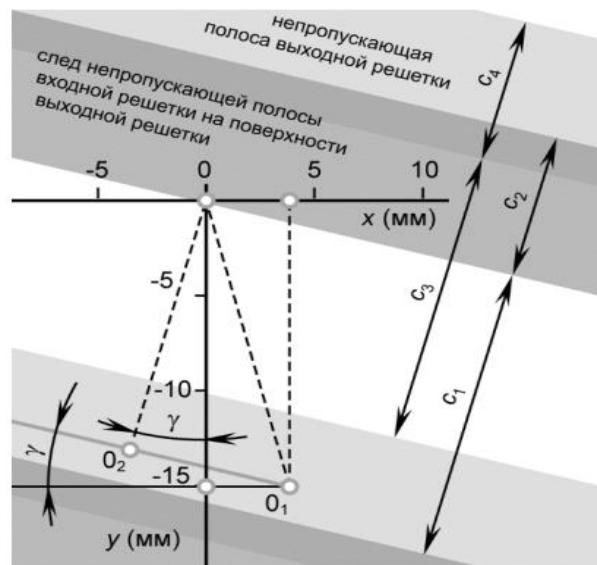


Рисунок 2 – Схема определения характеристического угла фильтра

След  $O_1$  точки падения  $O$  на вход фильтра при соблюдении величины характеристического угла спроецирован на  $O_2$ , которая расположена в плоскости, перпендикулярной расположению решеток. Расстояние между  $O$  и  $O_2$  это сдвиг между решетками. Зная значение сдвига и величину показателя  $s$ , можно вычислить угол фильтра с учетом значения величин  $x$  и  $y$ , для определенного часа. Этот угол будет обеспечивать минимальное заданное значение величины светопропускания стекла при имеющемся угле между тепловым потоком от солнца и поверхностью стекла. Требуемое значение вычисляется по уравнению:

$$\theta_c = \arctan \left( \frac{\{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos[y - \arctan(\frac{x}{y})]\}}{s} \right).$$

Для нахождения наиболее эффективной ширины полосы нужно знать интервал, в котором величина коэффициента светопропускания будет считаться приемлемой. Обычно  $\tau_r$  задается в интервале:  $0,3 \leq \tau_{r\ max} \leq 0,88$  и  $0 \leq \tau_{r\ min} \leq 0,5$  – в случае использования одного стекла,  $0,3 \leq \tau_{r\ max} \leq 0,80$  – в случае использования двухкамерного стеклопакета и  $0,3 \leq \tau_{r\ max} \leq 0,72$  – в случае использования трёхкамерного стеклопакета. Максимум в указанных диапазонах определяется ограничениями, связанными с особенностями прохождения солнечной радиации через фильтр. Минимум в данном диапазоне гарантируется в заранее определенное время, для которого он и рассчитан, либо в определенный интервал вблизи него, что во многом зависит от размеров полос каждой из решеток.

Тепловой солнечный поток, идущий от солнца сквозь решетку фильтра, можно определить, зная размер окна. Для этого используют уравнение Ламберта (4, 5):

$$I_w = F_w \cdot (DNI\tau_{cor} + 0,5 \cdot DHI\tau_d + 0,5 \cdot \rho \cdot GHI\tau_d),$$

здесь  $I_w$  – величина солнечной энергии, которая за час прошла через окно, изготовленное по smart-технологии (Вт · ч). Поправочный коэффициент 0,5 учитывает изотропию рассеянного света, поскольку тепловой солнечный поток не только проходит через окно, также частично отражается и рассеивается, в том числе, отражается от поверхности земли, и эти особенности необходимо учитывать для получения точных и непротиворечивых результатов.

Поправочный коэффициент  $\tau_{cor}$  учитывает особенности прохождения теплового потока сквозь стекло, и в первую очередь поглощение тепла самим стеклом. Он корректен для волнового диапазона в интервале от 300 до 2 500 нм. Этот коэффициент справедлив для всех материалов, и необходимо помнить, что есть материалы, которые целиком задерживают излучение видимого диапазона, но пропускают инфракрасный свет (тепловое излучение). В данном примере  $\tau_{chr1}$  и  $\tau_{chr2}$  – это поправочные коэффициенты для первой и второй решетки соответственно. Поправочный коэффициент  $\tau_d$  дает поправку на диффузию теплового потока при прохождении сквозь стекло. Он справедлив для структурных материалов с теми же величинами  $\alpha_a$ ,  $\tau_{chr1}$  и  $\tau_{chr2}$ , которые имеются для поправочного коэффициента  $\tau_{cor}$ , коррелирующего пропускание теплового потока.

Определенная часть тепловой солнечной энергии поглощается стеклом. В результате процессов теплопередачи эта поглощенная энергия частично попадает в помещение. Ее количество можно рассчитать, используя известные уравнения, описывающие процесс теплопередачи между телами с разной температурой. При этом необходимо учитывать большое количество факторов. Это площадь поверхности окон, площадь полос, их характеристики по поглощению, отражению и рассеиванию тепловой радиации, их теплопроводность, толщина камеры стеклопакета, характеристики газового наполнителя в нем.

Раньше для расчетов в основном использовалась изотропная модель [4, 5], здесь же выведено уравнение для определения величины теплового солнечного потока с использованием анизотропной модели. Она подразумевает использование поправочного коэффициента  $k_w$ , который отражает потери теплового потока при его прохождении сквозь окно. При этом, кроме прямого излучения, учитывается отраженное и рассеянное, что позволяет получить более точные искомые значения. Для расчета используется следующее уравнение:

$$I_w = F_w \cdot k_w \cdot (\tau_{cor}DNI + \frac{\tau_d}{180^\circ} \{0,677 \cdot \varepsilon_s DHI [1 + \cos^2 \theta \sin^3 (90^\circ - h)] + 0,5 \cdot \rho_b \cdot \varepsilon_b DHI + 0,5 \cdot \rho \cdot \varepsilon_g GHI [1 + \sin^2 (\frac{90^\circ - h}{2}) | \cos \alpha | ] \})$$

Для окон, изготовленных по смарт-технологиям, при определении величин DGP, cDA, ASE и sDA нужно помнить, что рассматриваемые технологические материалы в зависимости от их состояния (окрашены, или нет) будут иметь разную пропускную способность для теплового потока. Для корреляции значений показатели освещенности определяют в разных плоскостях относительно направления потока, с использованием разных поправочных коэффициентов, отражающих способность материалов пропускать тепловой поток. Также это делают в разное время года. На основании полученных результатов определяют наиболее эффективный режим работы окна, либо определяют два режима, если есть возможность осуществлять между ними переход [6]. Смена режима происходит при изменении величины падающего теплового потока, а если речь идет об окнах с электрохромным покрытием, то режимы можно менять принудительно.

**Заключение.** Генерация тепла внутри помещения от находящихся в нем людей, работы световых приборов или оборудования учитывается по стандартным классическим методикам. При этом не имеет значения, какие в помещении установлены окна. Если имеется несколько окон, изготовленных по смарт-технологиям, то все необходимые показатели определяются для каждого окна отдельно, а потом суммируются. Такие же показатели определяются и для окон с обычным остеклением, и тоже суммируются. В итоге получается общее интегральное значение по рассматриваемому помещению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. James, P. A. B. Holographic optical elements: various principles for solar control of conservatories and sunrooms / P. A. B. James, A. S. Bahaj // *Solar Energy*. – 2005. – N 78. – P. 441-454.
2. Granqvist, C. G. Electrochromics on a roll : Web-coating and lamination for smart windows / C. G. Granqvist, I. B. Pehlivan, G. A. Niklasson // *Surf. Coat. Tech.* – 2018. – N 336. – P. 133-138.
3. Zakirullin, R. S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation / R. S. Zakirullin // *Appl. Sol. Energy*. – 2019. – N 55. – P. 48-56.
4. Zakirullin, R. S. Simulating annual autoregulation of daylight by grating smart window with angular-selective transmission / R. S. Zakirullin, I. A. Odenbakh // *Journal of Building Performance Simulation*. – 2023. – N 17(2). – P. 253-273.
5. Закируллин, Р. С., Оденбах И.А., Гунько Н.М., Горьков Н.А., Гирин В.А., Пикалова Е.В. Моделирование притока тепла от солнечной радиации через решёточные смарт-окна // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2023. – № 3. – С. 132-139.
6. Закируллин, Р. С. Оптический фильтр для смарт-окна с угловым селективным светопропусканием // *Оптический журнал*. – 2019. – N 86(5). – С. 23-29.