

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СМАРТ-ОКОН В АРХИТЕКТУРЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Закируллин Р.С.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

В последние годы в архитектуре и строительстве часто используется понятие «интеллектуальное окно». Такое окно предназначено для решения многофункциональных задач, зачастую противоречащих друг другу. Окно должно обеспечивать оптимальное светопропускание по временам года и суток, защиту помещения от излишней освещенности и перегрева в жаркое время года и сохранение в нем тепла в отопительный сезон, защиту от заглядывания в окна и возможность обзора из самого помещения.

Проходящее через световые проемы солнечное излучение устанавливает светотехнический режим в помещениях, а также влияет на их температурно-влажностный режим. Вместо наиболее распространенного в настоящее время полированного флоат-стекла в оконных конструкциях все шире применяются специальные стекла: солнцезащитные (окрашенные в массу или с рефлексивным покрытием), «мягкие» самоочищающиеся, рифленые светорассеивающие и селективные низкоэмиссионные теплосберегающие *e*-стекла. Используются также приклеиваемые пленки: теплосберегающие, солнцезащитные, антибликовые и с эффектом односторонней видимости. Преимуществом пленочных технологий является возможность изменения характеристик существующих светопрозрачных конструкций без их демонтажа.

Современные научные исследования направлены на создание и совершенствование «смарт-стекол», регулирующих температуру и степень освещения в помещениях или в прямой зависимости от изменения параметров окружающей среды (термохромные и фотохромные стекла), или с помощью электрического тока, пропускаемого через активный слой ламинированного стекла (стекла с электрохромными, жидкокристаллическими и ионовыми слоями и слоями с мелкодисперсными частицами).

В Лондонском университетском колледже создано термохромное стекло, которое при повышении температуры до 29°C начинает отражать поступающее солнечное излучение в инфракрасном диапазоне, защищая помещение от перегрева. В технологическом университете Сиднея разработан новый тип оконного ламинированного стекла на основе LaV_6 . При пропускании электрического тока ламинированное стекло прозрачно, при отсутствии тока проходящий свет рассеивается. Оптические параметры стекла, разработанного в Research Frontiers Inc. (США), регулируются с помощью особых микрочастиц. При пропускании тока через специальное покрытие микрочастицы организуются таким образом, что свет беспрепятственно проникает сквозь стекло, при отсутствии тока окно становится непрозрачным из-за «дезорганизации» частиц.

Светопроницаемость некоторых электрохромных смарт-стекол зависит от поведения ионного слоя, находящегося между двумя проводящими слоями. В

данном случае в зависимости от пропускаемого тока можно плавно изменять оптические характеристики стекла, в отличие от многих других видов подобных стекол, работающих лишь в двух режимах. При этом и переключение режимов происходит значительно быстрее. В Московском государственном университете разработаны электрохромные стекла на основе нового материала – поливиологена, синтезированного в ИНЭОС РАН. Преимуществом этих стекол является возможность постепенного изменения степени окраски от нейтрального до синего цвета путем увеличения подаваемого напряжения от 0 В до 2 В.

В Университете Миннесоты (США) проводятся исследования с целью превращения к 2030 году Миннесоты в штат со строительством зданий только с нулевым потреблением энергии извне. Применение новых технологий в энергоэффективных окнах является важнейшей частью этой амбициозной программы [1]. Улучшение характеристик светопропускания в инфракрасной области (теплопропускания) обеспечивает применение в оконных конструкциях «теплового зеркала», предложенного Southwall Technologies Inc. (США). Тонкая прозрачная ткань, натянутая между слоями остекления, отражает тепловые лучи в сторону поступления – в холодный период длинноволновое излучение отопительного прибора возвращается в помещение, а в жаркое время года интенсивное солнечное излучение отражается обратно.

Имеющие большие перспективы для применения смарт-стекла обеспечивают контроль интенсивности и спектра проходящего излучения, однако не позволяют достичь селективного регулирования свето- и теплопропускания по диапазонам углов падения солнечных лучей. Самопроизвольное изменение светопропускания, происходящее из-за угловой зависимости коэффициентов отражения и поглощения, не всегда является оптимальным. Поэтому для регулирования светопропускания с адаптацией к траектории движения солнца используются дополнительные устройства перераспределения световых потоков (жалюзи и т. п.). Подобные устройства имеют такие недостатки, как необходимость ручного или автоматического управления и связанные с этим сложность и дороговизна, ограниченность позонного регулирования по площади окна, сложность применения в криволинейных и наклонных остекленных конструкциях. Из-за сложной криволинейной траектории движения солнца регулируемые устройства не могут обеспечить оптимального распределения светопропускания и направлений проходящих световых лучей при любой ориентации окна по сторонам света. Для этого были бы необходимы, например, жалюзи с разным углом наклона ламелей по отношению к положению самих окон при разных азимутах их ориентации. Однако жалюзи имеют только горизонтальные и вертикальные разновидности.

Для решения перечисленных проблем углового селективного регулирования светопропускания, более подробно рассмотренных в [2], предлагаются решеточные оптические фильтры, разработанные в Оренбургском государственном университете. Действие данного типа оптических фильтров основано на новом способе регулирования

светопропускания [3]. Способ запатентован в Российской Федерации [4], заявка на изобретение подана в USPTO (патентное ведомство США). Угловое селективное регулирование осуществляется за счет относительного расположения тонкослойных решеток на двух поверхностях светопрозрачной подложки. Поверхностные решетки состоят из поглощающих (или рассеивающих, отражающих) полос, чередующихся с направленно пропускающими полосами.

Устройство и принцип действия решеточного оптического фильтра, влияние геометрических и оптических параметров чередующихся полос решеток и подложки на угловые селективные характеристики светопропускания рассмотрены в [5–7]. Зависимость коэффициента светопропускания фильтра от угла падения лучей рассчитывается графоаналитическим методом, разработанным на основе законов классической геометрической оптики [5–9]. Метод расчета основан на специально введенной функции смещения преломленного луча [8, 9]. Результаты численного моделирования угловых характеристик светопропускания фильтров при разных параметрах чередующихся полос решеток, а также экспериментальные данные, подтверждающие их, приведены в [6, 7].

Важнейшим преимуществом решеточного фильтра является возможность предварительной адаптации характеристик его светопропускания к требуемым и заранее заданным значениям, если траектория движения источника света относительно фильтра известна. Разработан [10] соответствующий алгоритм для расчета геометрических параметров фильтра с предварительно заданными характеристиками. Для применения решеточного оптического фильтра в оконных конструкциях разработан метод оптимизации углового селективного фильтрования солнечного излучения [11], суть которого вкратце излагается ниже.

В отличие от горизонтальных и вертикальных жалюзи, чередующиеся полосы решеток оптического фильтра можно наносить на оконное остекление под любым углом – наиболее оптимальным для окна с заданным азимутом. Оптимальный угол наклона решеток фильтра определяется при заданных толщине s и показателе преломления n стекла, географической широте ϕ и долготе λ местности, азимуте ориентации окна A_0 . Ниже приводится алгоритм оптимизации фильтрования солнечного излучения.

1. Рассчитываются высота стояния h и азимут A солнца через каждый час относительно положения солнца в зените для дней весеннего и осеннего равноденствия и летнего и зимнего солнцестояния.

2. Определяется азимут солнца α для данного окна, отсчитанный от перпендикуляра к плоскости окна в точке падения луча:

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

3. Угол падения луча на вертикальное плоское окно рассчитывается по частному случаю первой теоремы косинусов для трехгранного угла, когда двухгранный угол напротив искомого плоского угла равен 90° :

$$\cos \Theta = \cos h \cos \alpha, \quad (2)$$

откуда с учетом формулы (1):

$$\Theta = \arccos(\cosh \cos(A - A_0)). \quad (3)$$

4. Рассчитывается угол преломления луча:

$$\Theta_n = \arcsin\left(\frac{\sin\Theta}{n}\right). \quad (4)$$

5. По правилам начертательной геометрии определяются координаты x и y следа точки O падения луча, оставляемого после преломления на выходной поверхности фильтра (окна). На рисунке 1 приведена схема определения этих координат для луча 1 ($x_1=0$ и y_1), падающего в плоскости, перпендикулярной плоскости окна, и для луча 2 (x_2 и y_2), падающего под произвольным углом.

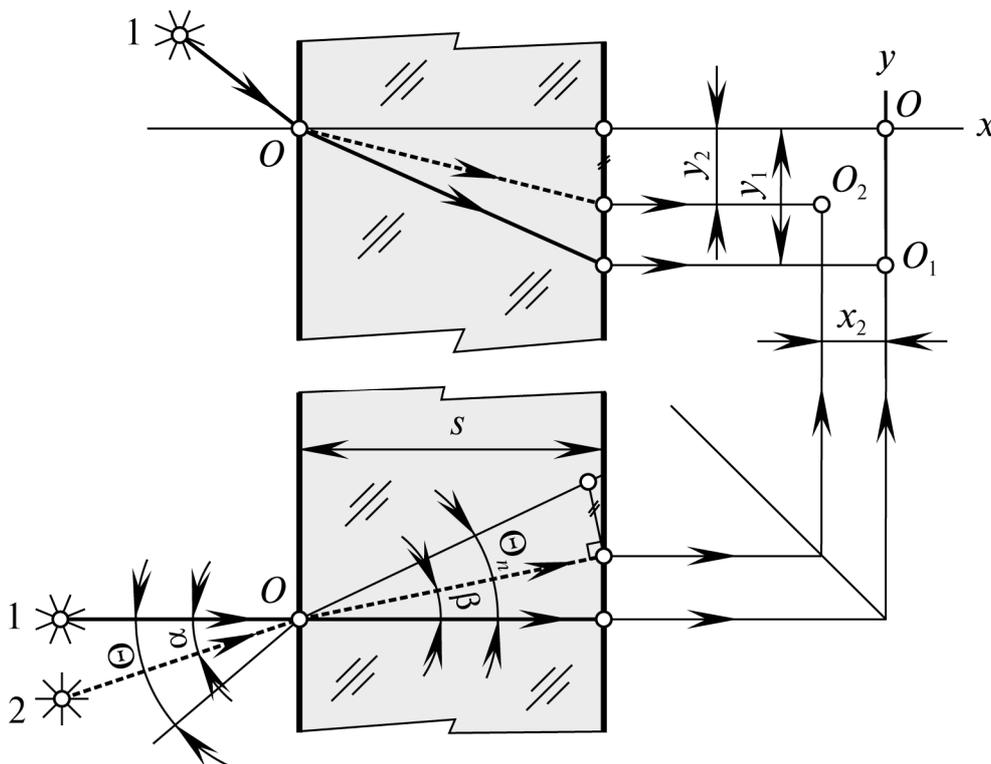


Рисунок 1 – Схема определения координат следов точки падения луча на выходной поверхности фильтра

При анализе рисунка 1 получены формулы для расчета координат следа:

$$x = s \operatorname{tg} \beta; \quad (5)$$

$$y = -\left(\frac{s \operatorname{tg}(\Theta_n - |\beta|)}{\cos \beta}\right), \quad (6)$$

где β – угол преломления, соответствующий азимутальному углу падения α , находится из пропорции:

$$\beta = \frac{\Theta_n \alpha}{\Theta}. \quad (7)$$

6. Строятся траектории следа точки падения лучей для дней равноденствия и солнцестояния. На рисунке 2 в качестве примера приведены

траектории следа точки на выходной поверхности окна по результатам расчетов, сделанных для г. Оренбурга с географическими координатами $52,28^\circ$ с. ш. и $55,17^\circ$ в. д. без учета перехода на летнее время (GMT+05:00) для пяти окон с разными азимутами. Толщина стекла – 4 мм, показатель преломления – 1,5. Расчеты проведены для дней весеннего равноденствия (21.03.2013), летнего (21.06.2013) и зимнего (21.12.2013) солнцестояния.

7. Следы точки с одинаковым временем соединяются изохронами.

При ориентации окна на юг (азимут окна 180°) траектория следа точки симметрична относительно вертикали и напоминает по форме циссоиду Диокла. При других азимутах окна с восточной ориентацией траектории смещаются вправо и поворачиваются по часовой стрелке (для окон с западной ориентацией траектории будут симметричны относительно вертикали).

8. Для определения оптимального угла наклона решеток фильтра устанавливаются дата с максимальными требованиями к солнцезащитным мерам и время суток. На рисунке 2 указаны оптимальные углы наклона для 15 июля (для середины наиболее жаркого периода) для момента нахождения солнца в зените. Эти линии проведены по нормальям к изохронам в точках, найденных путем интерполяции между весенне-осенними и летними траекториями для 15 июля.

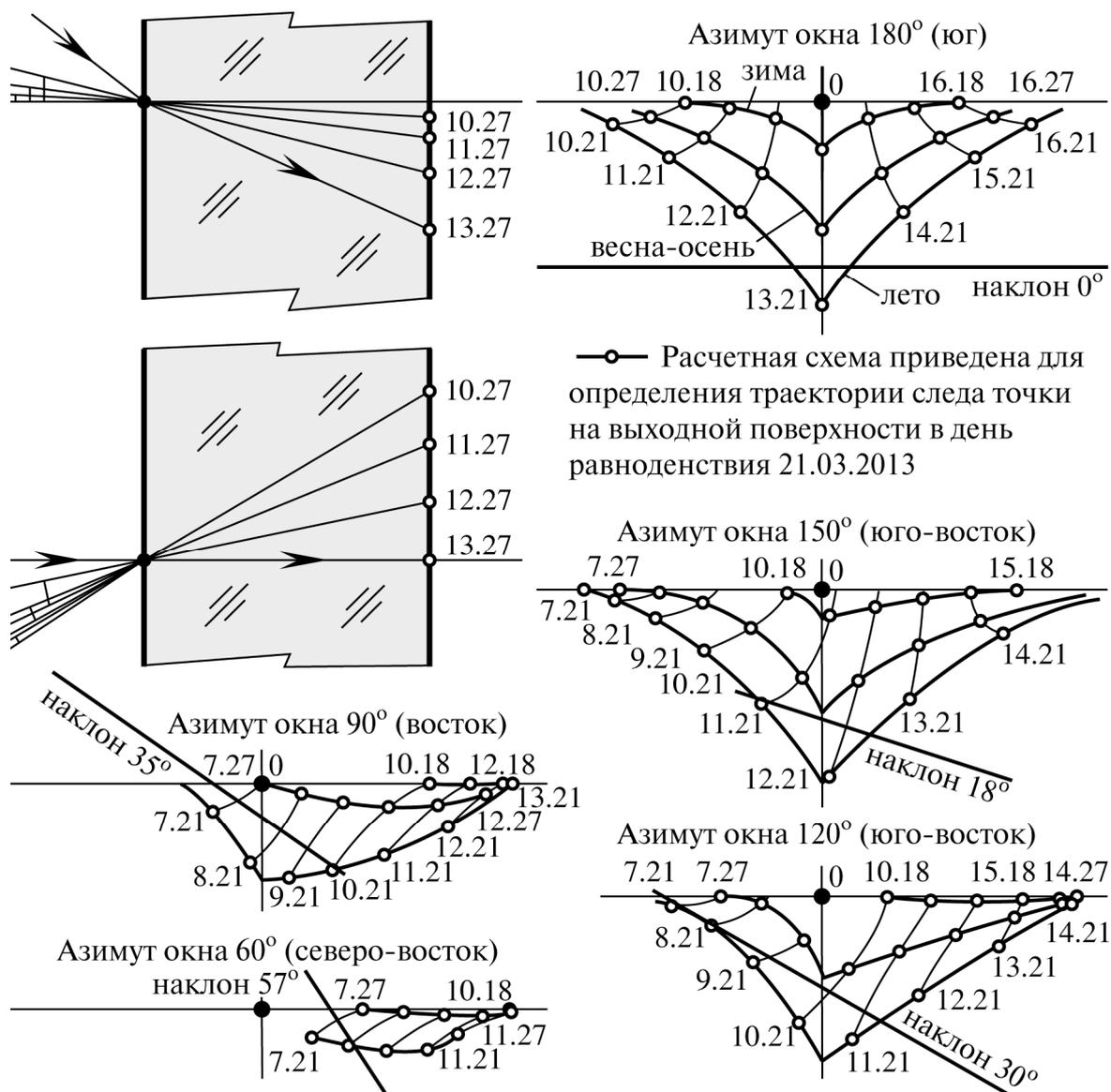


Рисунок 2 – Схема и результаты расчета траектории следа точки на выходной поверхности окна

Алгоритм определения оптимального угла наклона решеток приведен для восточных окон с азимутами ориентации от 0° до 180° для населенного пункта, находящегося в северной широте и восточной долготы. При расчете западных окон с азимутами ориентации от 180° до 360° и населенных пунктов южного и западного полушарий учитываются соответствующие особенности определения азимута окна, высоты стояния и азимута солнца. Географическая широта изменяется в пределах $-90^\circ \leq \phi \leq +90^\circ$ (на экваторе 0° , на северном полюсе $+90^\circ$, на южном -90°). Долгота изменяется в пределах $-180^\circ \leq \lambda \leq +180^\circ$ (в Гринвиче 0° , на противоположном конце меридиана для International Date Line долгота равна $\pm 180^\circ$, знак «плюс» применяется для восточной долготы, «минус» – для западной). Долготу необходимо знать для определения часового пояса для населенного пункта относительно времени по Гринвичу (GMT). 24 часовых

пояса изменяются в пределах $GMT-12:00 \leq GMT \leq GMT+12:00$ ($GMT-12:00$ и $GMT+12:00$ совпадают и показывают время для International Date Line).

При определении оптимального угла наклона решеток для наклонных окон учитывается, что двухгранный угол θ напротив искомого плоского угла падения Θ не равен 90° . В этом случае вместо формулы (2) применяется общее выражение первой теоремы косинусов для трехгранного угла:

$$\cos \Theta = \cos h \cos A + \sin h \sin A \cos \theta. \quad (8)$$

Величина двухгранного угла θ зависит от угла наклона окна к горизонтальной плоскости. Окна с криволинейными (гнуемыми) стеклами рассчитываются также с применением формулы (8) – через двухгранный угол θ между горизонтальной плоскостью и плоскостью, касательной к криволинейной поверхности окна в точке падения луча.

Разработанный алгоритм позволяет определить оптимальные углы наклона решеток фильтра для окон разной формы и с разной ориентацией по сторонам света при заданных географических координатах местности и расчетном времени года и суток, что обеспечит оптимальные условия естественного освещения и инсоляции помещения за счет предварительной адаптации угловых характеристик светопропускания окна к известной траектории движения солнца относительно него.

Подробные результаты проведенного теоретического и экспериментального исследования оптических фильтров и оценка перспективы их применения в оконных конструкциях опубликованы в монографии [12]. Полученные результаты используются при обучении студентов архитектурно-строительного факультета ОГУ. Архитектуру будущего невозможно представить не только без интеллектуальных окон, но и световых приборов нового типа, солнечных батарей, геоосветительных и ветроэнергетических установок.

Подготовка современных архитекторов и инженеров-строителей в свете рационального природопользования и повышения энергоэффективности зданий предполагает изучение научно-технических достижений последних лет и соответствующее увеличение количества аудиторных занятий по дисциплинам «Архитектурная физика» и «Строительная физика». Однако за 14 лет подготовки студентов специальности «Архитектура» в архитектурно-строительном факультете ОГУ общее количество аудиторных занятий по архитектурной физике постепенно сократилось от 144 часов в течение четырех семестров до 36 часов в течение одного семестра (по программе бакалавриата), т. е. в четыре раза. Строительная физика вообще не включена в программу подготовки бакалавров и магистров строительства. По 14-летнему опыту преподавания этих дисциплин можно считать оптимальным количеством аудиторных занятий 72 часа в течение двух семестров для подготовки архитекторов и 36 часов в течение одного семестра – для строителей.

Таким образом, успешная интеграция науки, образования и производства в области архитектуры и строительства невозможна без качественной

подготовки кадров с учетом передовых технологий, появившихся и развивающихся в последние годы.

Список литературы

1. Carmody, J., Selkowitz, S., Arasteh, D., Heschong, L. *Residential Windows: A Guide to New Technologies and Energy Performance* / J. Carmody, S. Selkowitz, D. Arasteh, L. Heschong. – W. W. Norton & Company, 2007.

2. Закируллин, Р. С. Селективное регулирование направленного светопропускания стекла и остекленных конструкций в зависимости от угла падения световых лучей / Р. С. Закируллин // *Вестн. Оренбург. гос. ун-та.* – 2011. – № 6. – С. 172–180.

3. Закируллин, Р. С. Способ углового селективного регулирования направленного светопропускания / Р. С. Закируллин // *Научно-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики.* – 2013. – № 3 (85). – С. 17–22.

4. Пат. 2509324 Российская Федерация. Способ регулирования направленного светопропускания / Закируллин Р. С. – заявка № 2012130148/28; заявл. 17.07.12; опубл. 10.03.14, бюл. № 7. – 3 с.

5. Закируллин, Р. С. Угловое селективное регулирование светопропускания оптического фильтра / Р. С. Закируллин // *Вестн. Оренбург. гос. ун-та.* – 2012. – № 9. – С. 101–106.

6. Zakirullin, R. S. An optical filter with angular selectivity of the transmittance / R. S. Zakirullin // *Journal of Optical Technology.* – 2013. – Vol. 80, No. 8. – P. 480–485.

7. Закируллин, Р. С. Оптический фильтр с угловой селективностью светопропускания / Р. С. Закируллин // *Оптический журнал.* – 2013. – Том 80, вып. 8. – С. 16–24.

8. Закируллин, Р. С. Селективное регулирование направленного светопропускания по углам падения лучей / Р. С. Закируллин // *ЖТФ.* – 2012. – Том 82, вып. 10. – С. 134–136.

9. Zakirullin, R. S. Selective Beam Incidence Angle Control over Directional Light Transmission / R. S. Zakirullin // *Technical Physics.* – 2012. – Vol. 57, No. 10. – P. 1456–1458.

10. Закируллин, Р. С. Оптический фильтр с угловой селективностью светопропускания / Р. С. Закируллин // *Вестн. Оренбург. гос. ун-та.* – 2013. – № 9. – С. 196–207.

11. Закируллин, Р. С. Интеллектуальное окно как оптический фильтр с угловым селективным светопропусканием / Р. С. Закируллин // *Научный вестник Воронежского гос. арх.-стр. ун-та. Архитектура и строительство.* – 2014. – вып. 1 (33). – С. 11–19.

Закируллин, Р. С. *Оптические фильтры с угловым селективным светопропусканием* / Р. С. Закируллин. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 244 с. – ISBN 978-3-659-62246-5.