

## СПОСОБ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ УГЛОВОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлен метод оптимизации углового селективного регулирования светопропускания окна с помощью оптического фильтра с двумя наклонными поверхностными решетками, состоящими из поглощающих, отражающих или рассеивающих параллельных полос. Показана возможность угловой селективной фильтрации прямого солнечного излучения с учетом географических координат здания, траектории Солнца, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечного излучения и азимута ориентации окна по сторонам света за счет оптимального угла наклона решеток фильтра на оконном стекле, что обеспечит выполнение 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». Приведены примеры расчета угла наклона решеток для различных дат, показателей преломления оконного стекла, расстояний между решетками фильтра для окон с одинарным и двойным остеклением, азимутов ориентации окна по сторонам света.

**Ключевые слова:** солнечная радиация, оптический решеточный фильтр, угловая селективная характеристика, направленное светопропускание, оптимальный угол наклона, гигиенические нормы.

Угловая селективная фильтрация солнечного излучения актуальна не только для улучшения характеристик солнечных элементов [1]–[3], но и также для достижения оптимального естественного освещения и инсоляции в помещениях, обеспечения достаточной солнцезащиты при непрерывном движении солнца относительно окна. В последние десятилетия в архитектуре и строительстве все шире применяются различные типы смарт-стекол.

Применяются теплосберегающие *e*-стекла с низкоэмиссионными спектрально-селективными тонкопленочными покрытиями [4]–[6], пропускающие видимый спектр и отражающие инфракрасное излучение. Разработаны методы расчета коэффициентов отражения и пропускания многослойных поверхностных покрытий [7]–[9].

Имеют перспективы для применения фотохромные стекла [10]–[12], светопропускание которых обратимо изменяется в зависимости от интенсивности падающего ультрафиолетового или коротковолнового видимого света. В последние годы разработаны термохромные смарт-окна, прозрачные для видимого света при относительно низких температурах и контролирующие количество проходящей через окно солнечной радиации при увеличении температуры окружающей среды [13]. Известны термотропные системы с зависящим от темпе-

ратуры изменением свойств рассеяния света [14]. Электрохромное смарт-стекло [15] при пропускании слабого электрического тока через активный слой плавно изменяет свою прозрачность и/или цвет.

Известны также и другие хромогенные материалы с обратимым изменением светопропускающих свойств в зависимости от изменения различных факторов окружающей среды – влажности, состава воздуха, давления и т. д. Некоторые пленки прозрачны для видимого света и отражают тепловое излучение [16]. В последние годы активно исследуются перспективные наноструктурированные метаматериалы [17], [18].

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.). Разработаны методы расчета распределения светопропускания инновационных оконных систем с жалюзи и другими устройствами [19]. Основным достоинством дополнительных устройств перераспределения световых потоков является возможность блокирования прямого солнечного излучения. Количество прямой солнечной радиации [20],

попадающей в помещение, изменяется в зависимости от времени суток и сезона. База данных по наблюдениям за солнечной радиацией для различных районов Земли приведена в справочниках [21], [22]. Разработаны также методы расчета солнечной радиации [23], [24].

Цель данной работы состоит в улучшении угловой селективной фильтрации прямого солнечного излучения путем применения в оконной системе решетчатого оптического фильтра с оптимизированными параметрами. Такой фильтр с двумя поверхностными решетками, состоящими из чередующихся параллельных пропускающих и непропускающих полос [25]–[28], обеспечивает регулирование светопропускания без использования дополнительных устройств перераспределения световых потоков, следовательно, выполнение 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». В статье обновляется и расширяется метод расчета оптимального угла наклона решеток фильтра [29]. Демонстрируются результаты оптимизации параметров фильтра для различных дат, показателей преломления оконного стекла, расстояний между решетками фильтра для окон с одинарным и двойным остеклением, азимутов ориентации окна по сторонам света. Способ регулирования направленного светопропускания, на котором основана работа фильтра, запатентован [30], [31].

### 1 Метод оптимизации

Угловая характеристика светопропускания фильтра рассчитывается в соответствии с методикой, приведенной в [28], когда источник света движется в плоскости, перпендикулярной к фильтру, и угол падения изменяется только в этой плоскости. Солнце перемещается относительно окна по сложной криволинейной траектории. Геометрические параметры фильтра (угол наклона решеток фильтра на оконном стекле, ширины полос и характеристический угол фильтра) могут быть определены для достижения минимального или максимального коэффициента светопропускания окна с учетом его

ориентации по сторонам света, широты населенного пункта, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечного излучения. В отличие от горизонтальных или вертикальных жалюзи, решетки оптического фильтра могут быть расположены на оконном стекле под любым углом – наиболее оптимальным для окна с заданным азимутом ориентации.

Для определения оптимального угла наклона необходимо выбрать расчетную дату с учетом местного климата. В качестве такой даты можно взять середину самого жаркого периода года или день с максимальным солнечным излучением. Эти две даты могут отличаться более чем на месяц. Далее, для выбранной даты определяются время зенитного положения солнца и время с максимальной солнечной радиацией. Максимальное солнечное излучение падает на верхние слои атмосферы в полдень. Однако, прозрачность атмосферы существенно влияет на суточный ход излучения, особенно в летние месяцы. Атмосфера после полудня менее прозрачна из-за ее повышенной запыленности и влажности и появления конвективной облачности. Таким образом, максимальная интенсивность прямого солнечного излучения в летнее время наблюдается в утренние часы. Оптимальный угол наклона решетки фильтра на оконном стекле определяется в соответствии со следующим алгоритмом (начальная версия [29] обновлена и расширена для окон с двойным остеклением).

1) Высота стояния  $h$  и азимут  $A$  солнца вычисляются по одной из многочисленных компьютерных программ для выбранной даты через каждый час по отношению к времени, когда  $A = A_0$ , где  $A_0$  – азимут ориентации окна. В этот момент времени солнечные лучи падают в плоскости, перпендикулярной к плоскости окна и направленное светопропускание можно вычислить точно по формулам [28].

2) Азимут солнца для заданного окна, измеренный от перпендикуляра к окну, рассчитывается через каждый час по формуле:  $\alpha = A - A_0$ .

3) Угол падения луча на вертикальное окно рассчитывается по частному случаю первой теоремы косинусов для трехгранного угла, когда двугранный угол напротив искомого плоского угла равен  $90^\circ$ :  $\cos \Theta = \cos h \cos \alpha$ . Полная версия этой теоремы используется для расчета

угла падения на наклонные или криволинейные окна.

4) Координаты  $x$  и  $y$  (рис. 2а) следа точки 0 падения на входную поверхность фильтра на его выходной поверхности определяются через каждый час для окон с одинарным остеклением по формулам:

$$x = s \operatorname{tg} \beta; \quad (1)$$

$$y = -\{s \operatorname{tg} (\Theta_n - |\beta|) / \cos \beta, \quad (2)$$

где  $\Theta_n$  – угол преломления,  $\beta$  – угол преломления, соответствующий азимутальному углу падения  $\alpha$ , вычисленный по пропорции:  $\beta = \Theta_n \alpha / \Theta$ . Для окна с двойным остеклением (рис. 2б.):

$$x = s \operatorname{tg} \alpha; \quad (3)$$

$$y = -\{s \operatorname{tg} (\Theta - |\alpha|) / \cos \alpha\}. \quad (4)$$

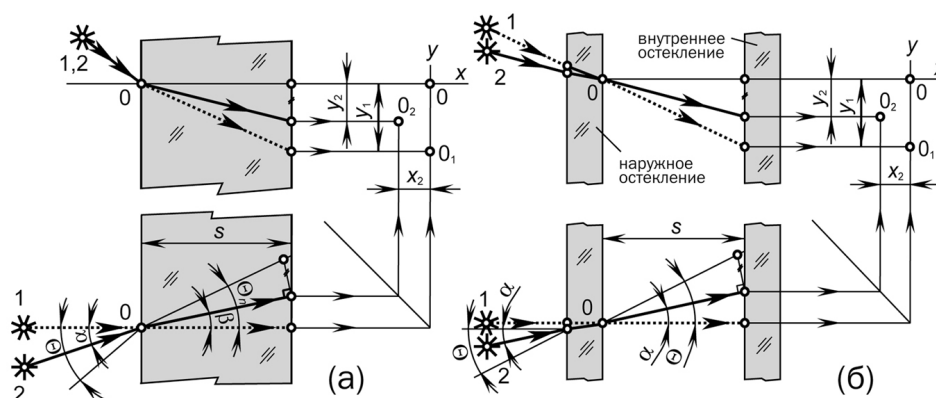
На рисунках 1а и 1б трассировка лучей показана для луча 1, падающего в плоскости перпендикулярной к окну, и луча 2, падающего под произвольным углом. Углы  $\Theta$  и  $\Theta_n$ , показанные на горизонтальных разрезах, повернуты для совмещения с горизонтальной плоскостью.

5) Траектории следа точки падения на выходной поверхности строятся через каждый час по вычисленным координатам  $x$  и  $y$ . Эти траектории показывают смещение следов (тень) непр пропускающих полос входных решеток на выходной поверхности. Промежутки между этими тенью и не-пропускающими полосами выходных решеток определяют полосу пропускания прямого излучения [28]. Когда азимуты

солнца и окна равны ( $A = A_0$ ), след точки падения на выходной поверхности максимально смещен вниз:  $y = y_{\min}$ ,  $x = 0$  (точки  $0_1$  на рис. 1а и 1б). Траектория следа точки падения будет приблизительно симметрична относительно линии, проходящей через  $0_1$ . Точная симметрия будет только для окна с азимутом  $180^\circ$ , когда траектория солнца относительно окна является симметричной. Для такого окна полосы решеток фильтра должны быть горизонтальными наподобие ламелей горизонтальных жалюзи, наиболее оптимальных для углового регулирования светопропускания окон с азимутом в южном секторе.

6) Для определенного времени дня, например, для зенитного положения солнца или для времени с максимальной солнечной радиацией, проводится линия симметрии траектории следа. Угол между перпендикуляром к этой линии симметрии, проходящим через соответствующую точку траектории следа, и горизонталью является оптимальным углом наклона решеток фильтра на оконном стекле.

Ниже представлены результаты расчетов оптимальных параметров фильтров по описанному выше алгоритму для разных дат, показателей преломления, расстояний между решетками и азимутов окон для города Оренбурга ( $51^\circ 47' 00'' \text{N}$ ,  $55^\circ 06' 00'' \text{E}$ , UTC +05:00). За исключением особо оговоренных случаев, все расчеты проведены для окон с одинарным ( $s = 4$  мм и



0 – точка падения на входную решетку,  $0_1$  и  $0_2$  – ее следы для солнечных лучей 1 и 2 на выходной решетке,  $x$  и  $y$  – координаты следов,  $s$  – расстояние между входной и выходной решетками,  $\Theta$  – угол падения,  $\Theta_n$  – угол преломления,  $\alpha$  – азимутальный угол падения,  $\beta$  – угол преломления, соответствующий азимутальному углу падения

Рисунок 1 – Координаты следов солнечных лучей при одинарном (а) и двойном (б) остеклении окон на вертикальном и горизонтальном разрезах и на фронтальном виде

$n = 1,5$ ) и двойным ( $s = 16$  мм,  $s_1 = s_2 = 4$  мм и  $n_1 = n_2 = 1,5$ ) остеклением с азимутами ориентации  $120^\circ$  по траекториям следов точки падения солнечных лучей на выходной поверхности оконного фильтра для 15.07.2015 (середина наиболее жаркого периода в Оренбурге). Оптимальные углы наклона решеток фильтра определены для 11 ч. 30 мин. (время с максимальной солнечной радиацией в Оренбурге).

## 2 Дата

На рисунке 2 представлены результаты расчета оптимальных углов наклона решеток фильтра для окон с одинарным и двойным остеклением для 15.06.2015 (дня с максимальной солнечной радиацией в г. Оренбурге), 15.07.2015 (для середины самого жаркого периода в г. Оренбурге) и 15.08.2015.

Оптимальные углы наклона решеток для дня с максимальной солнечной радиацией и середины самого жаркого периода отличаются на 4,24% (рис. 2а) и 0,66% (рис. 2б), соответственно. Отклонения между оптимальными углами наклона для 15.06.2015 и 15.08.2015 составляют 23,65%. Оптимальные углы наклона для одинарного остекления ( $11,3^\circ$ ,  $11,8^\circ$  и  $14,8^\circ$  на рис. 2а) меньше, чем для двойного остекления ( $15,0^\circ$ ,  $15,1^\circ$  и  $18,3^\circ$  на рис. 2б) из-за более медленной зависимости смещения луча от угла падения под влиянием преломления лучей [28].

## 3 Показатель преломления

Оптимальные углы наклона решеток фильтра, определенные для окна с одинарным остеклением с толщиной стекла  $s = 4$  мм и показателями преломления 1,3; 1,4 и 1,5, представлены

на рисунке 3. Оптимальный угол увеличивается с уменьшением показателя преломления за счет увеличения смещения луча [28].

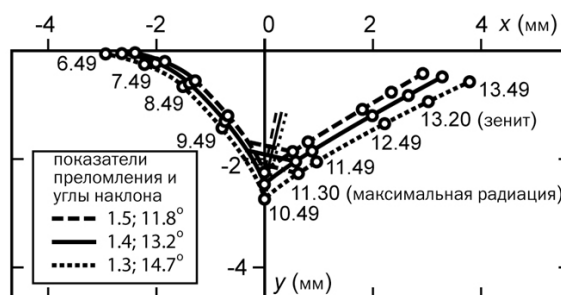


Рисунок 3 – Оптимальные углы наклона решеток фильтра при разных показателях преломления для окна с одинарным остеклением

## 4 Расстояние между решетками фильтра

Оптимальные углы наклона решеток фильтра, определенные для показателя преломления оконного стекла  $n = 1,5$  и его толщин 4, 6 и 8 мм при одинарном остеклении, представлены на рисунке 4а. На рисунке 4б оптимальные углы определены для различных расстояний между оконными стеклами (12, 16 и 20 мм) для окна с двойным остеклением.

Траектории следов точки падения на выходной поверхности для окна с одинарным остеклением эквидистантны за счет пропорциональной зависимости координат  $x$  и  $y$  от толщины стекла в соответствии с формулами (1) и (2). Следовательно, оптимальные углы наклона равны. Та же особенность наблюдается и для окна с двойным остеклением в соответствии с формулами (3) и (4).



Рисунок 2 – Оптимальные углы наклона решеток фильтра по датам для одинарных (а) и двойных (б) остекленных окон



## 5 Азимут окна

На рисунке 5 показаны оптимальные углы наклона решеток фильтра для окон с одинарным остеклением с различными азимутами ориентации по расчетам для 15.06.2015 (день с максимальной солнечной радиацией) и 15.07.2015 (середина самого жаркого периода). Разница между оптимальными углами наклона, определенными для дня с максимальной солнечной радиацией и середины самого жаркого периода, составляет 1,18%, 4,24% и 21,95% для азимутов окна 90°, 120° и 150° (рис. 6а–в), соответственно.

Из-за особенностей траектории солнца решетки фильтра должны быть горизонтальными для восточных и западных окон зданий, расположенных на экваторе, для южных окон зданий, расположенных в северном полушарии (рис. 6г), и для северных окон зданий, расположенных в южном полушарии. Результаты расчета показывают, что для окон с азимутами, симметричными по отношению к меридиану (рис. 6а и 6е, 6б и 6д), траектории следов симметричны относительно вертикальной оси  $y$ . Следовательно, оптимальные углы наклона для этих случаев одинаковы. Однако ширина

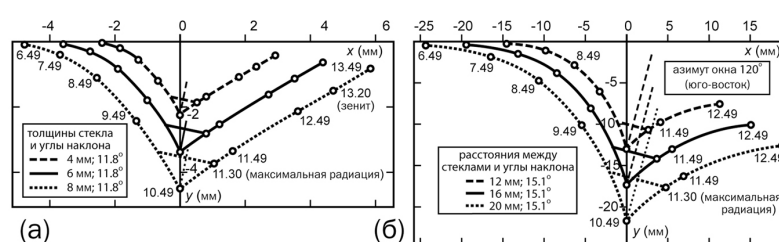


Рисунок 4 – Оптимальные углы наклона решеток фильтра при разных расстояниях между входными и выходными решетками для окон с одинарным (а) и двойным (б) остеклением

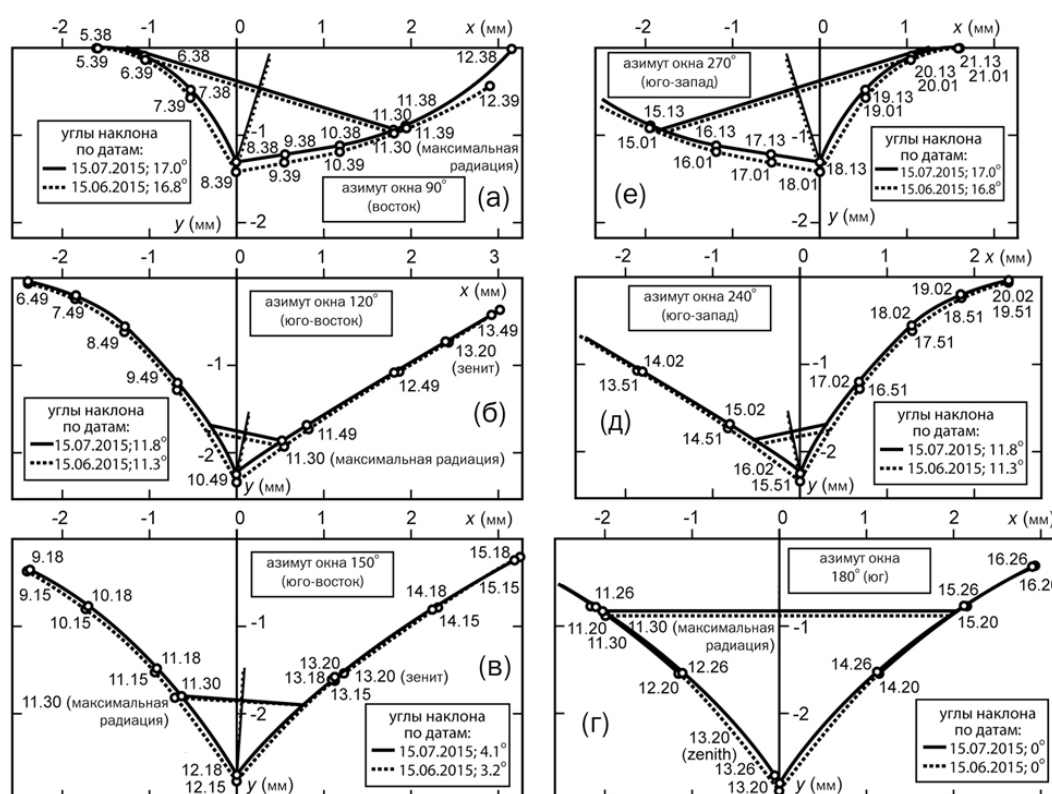


Рисунок 5 – Оптимальные углы наклона решеток фильтра при различных азимутах ориентации окна по сторонам света

полос и характеристические углы фильтров могут быть различными, поскольку максимальная интенсивность прямой солнечной радиации уменьшается после полудня. Зависимости оптимального угла от азимута окна для дня с максимальной солнечной радиацией и середины самого жаркого периода представлены на рисунке 6. Максимальная разница между ними составляет 22%.

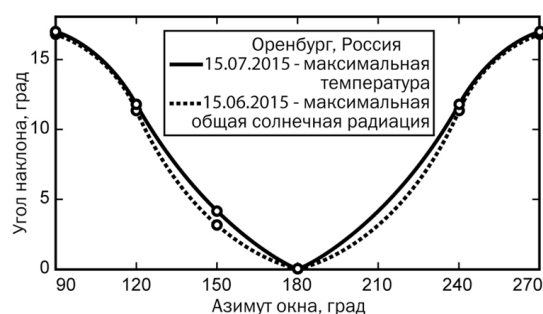


Рисунок 6 – Зависимость оптимального угла наклона решеток фильтра от азимута ориентации окна

### Заключение

В статье приведен обновленный и расширенный метод расчета оптимального угла наклона решеток оптического фильтра с тонкопленочными решеточными слоями на двух поверхностях смарт-окна с одинарным и двой-

ным остеклением. Продемонстрированы результаты оптимизации параметров фильтра для различных дат, показателей преломления оконного стекла, расстояний между решетками фильтра для окон с одинарным и двойным остеклением, азимутов ориентации окна по сторонам света. Показаны различия в расчете оптимального угла наклона решеток фильтра для окон с одинарным и двойным остеклением.

Решеточный оптический фильтр с оптимизированными параметрами обеспечивает комфортное естественное освещение, блокируя прямые солнечные лучи в заранее рассчитанное время дня и сезона, и пропуская отраженный от поверхности Земли свет (альбедо) и рассеянный свет неба, а также обеспечивает выполнение 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».

Определенные оптимальные углы наклона могут быть полезны для создания жалюзи с наклонными ламелями, жалюзи типа зебра с наклонными полосами, а также для расположения концентраторов и солнечных элементов в смарт-окнах с генерированием электроэнергии и нагревом воды [32].

14.06.2017

### Список литературы:

1. Gruneisen, M.T., Sickmiller, B.A., Flanagan, M.B., Black, J.P., Stoltenberg, K.E., Duchane, A.W. Adaptive spatial filtering of daytime sky noise in a satellite quantum key distribution downlink receiver. – Optical Engineering. – 55 (2). – 026104. – 2016.
2. Höhn, O., Kraus, T., Bauhuis, G., Schwarz, U.T., Bläsi, B. Maximal power output by solar cells with angular confinement. – Opt. Express. – 22 (S3). – A721. – 2014.
3. Peters, M., Goldschmidt, J.C., Loeper, P., Bläsi, B., Willeke, G. Lighttrapping with angular selective filters. – Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – Valencia, Spain. – 1-5 September 2008.
4. Macleod, H.A. Thin-Film Optical Filters. – 3rd ed. – Institute of Physics. – Philadelphia, Pa. – 2001.
5. Berning, P.H. Principles of design of architectural coatings. – Appl. Opt. – 22. – P. 4127–4141. – 1983.
6. Horowitz, F., Pereira, M.B., de Azambuja, G.B. Glass window coatings for sunlight heat reflection and co-utilization. – Appl. Opt. – 50. – C250–C252. – 2011.
7. Mazilu, M., Miller, A., Donchev, V.T. Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures. – Appl. Opt. – 40. – P. 6670–6676. – 2001.
8. Лапшин, Б., Петраков, В. Синтез оптических многослойных фильтров. – Компоненты и технологии. – 10. – С. 150–153. – 2006.
9. G. Bader, G., Ashrit, P. V., Truong, V.-V. Transmission and Reflection Ellipsometry of Thin Films and Multilayer Systems. – Appl. Opt. – 37. – P. 1146–1151. – 1998.
10. Megla, G.K. Optical Properties and Applications of Photochromic Glass. – Appl. Opt. – 5. – P. 945–960. – 1966.
11. Garfinkel, H.M. Photochromic Glass by Silver Ion Exchange. – Appl. Opt. – 7. – P. 789–794. – 1968.
12. Crow, I.D., Borrelli, N.F., Seward III, T.P., Chodak, J. Lightguiding in Photochromic Glasses. – Appl. Opt. – 14. – P. 580–585. – 1975.
13. Gao, Y., Luo, H., Zhang, Z., Kang, L., Chen, Z., Du, J., Kanehira, M., Cao, C. Nanoceramic VO<sub>2</sub> thermochromic smart glass: A review on progress in solution processing. – Nano Energy. – 1 (2). – P. 221–246. – 2012.
14. Seeboth, A., Ruhmann, R., Mühling, O. Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control. – Materials. – 3. – P. 5143–5168. – 2010.

15. Andersson, A.M., Granqvist, C.G., Stevens, J.R. Electrochromic  $\text{Li}_x\text{WO}_3$ /polymer laminate/ $\text{Li}_y\text{V}_2\text{O}_5$  device: toward an all-solid-state smart window. – *Appl. Opt.* – 28. – P. 3295–3302. – 1989.
16. Hamberg, I., Granqvist, C.G. Color properties of transparent and heat-reflecting  $\text{MgF}_2$ -coated indium-tin-oxide films. – *Appl. Opt.* – 22. – P. 609–614. – 1983.
17. Симовский, К.Р. О материальных параметрах метаматериалов (Обзор). – *Оптика и спектроскопия*. – 107, №5. – С. 766–793. – 2009.
18. Simovski C.R. On electromagnetic characterization and homogenization of nanostructured metamaterials. – *J. Opt.* – 13. – 013001. – 2011.
19. Andersen, M. Light distribution through advanced fenestration systems. – *Building Research & Information*. – 30, No. 4. – P. 264–281. – 2002.
20. Blanc, P., Espinar, B., Geuder, N., Gueymard, C., Meyer, R., Pitz-Paal, R., Reinhardt, B., Renne, D., Sengupta, M., Wald, L., Wilbert, S. Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue. – *Solar Energy*. – 110. – P. 561–577. – 2014.
21. Page, J., Albuissou, M., Wald, L. The European Solar Radiation Atlas: A valuable digital tool. – *Solar Energy*. – 71 (1). – P. 81–83. – 2001.
22. Lee, T., Oppenheim, D., Williamson, T.J. Australian Solar Radiation Data Handbook. Energy Research and Development Corporation, Canberra. – 1995.
23. Marion, W., George, R. Calculation of solar radiation using a methodology with worldwide potential. – *Solar Energy*. – 71 (4). – P. 275–283. – 2001.
24. Gueymard, C. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. – *Solar Energy*. – 76 (4). – P. 423–453. – 2004.
25. Zakirullin, R.S. Creating optical filters with angular-selective light transmission. – *Appl. Opt.* – 54, No. 21. – P. 6416–6419. – 2015.
26. Закируллин, Р.С. Оптические фильтры с поверхностными решетками для углового селективного регулирования направленного светопропускания: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.05: защищена 16.11.16; утв. 28.04.17. – Москва, 2016. – 333 с.
27. Zakirullin R.S. An optical filter with angular selectivity of the light transmission. – *Proc. SPIE*. – Vol. 9579. – 95790Q. – 9 p. – 2015.
28. Закируллин, Р.С. Метод расчета решеточного оптического фильтра для смарт-окна. – *Вестник Оренбургского гос. ун-та*. – 7. – С. 172–180. – 2017.
29. Zakirullin, R.S., Letuta, S.N. A smart window for angular selective filtering solar radiation. – *Solar Energy*. – 120. – P. 585–592. – 2015.
30. 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.
31. 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.
32. Sabry, M., Eames, P.C., Singh, H., Yupeng Wu. Smart windows: Thermal modelling and evaluation. – *Solar Energy*. – 103. – P. 200–209. – 2014.

#### Сведения об авторе:

**Закируллин Рустам Сабирович**, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики  
Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, доцент  
460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, ауд. 3015, тел.: +7 (3532) 37 24 26 e-mail: rustam.zakirullin@gmail.com