

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ АРХИТЕКТОРОВ И СТРОИТЕЛЕЙ

**Закируллин Р.С., д-р техн. наук, доцент
Оренбургский государственный университет**

Основными проблемами внедрения последних достижений современной науки в образовательный процесс при подготовке бакалавров и магистров архитектурных и строительных направлений являются отсутствие лабораторно-экспериментальной базы и слабый интерес студентов к чтению физико-технических журналов в соответствующих отраслях научных знаний. В работе представлены обзор современных смарт-окон и новый метод угловой селективной фильтрации прямого солнечного излучения путем применения в оконной системе решетчатого оптического фильтра с оптимизированными параметрами.

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 контролирующее количество проходящей через окно солнечной радиации при увеличении температуры окружающей среды [13]. Известны термотропные системы с зависящим от температуры 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 солнеч-

ных 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].

Предлагаемый оптический 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. В статье обновляется метод расчета оптимального угла наклона решеток [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].

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. В отличие от горизонтальных или вертикальных жалюзи, решетки 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. 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 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° : $\cos \Theta = \cos h \cos \alpha$.

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:

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

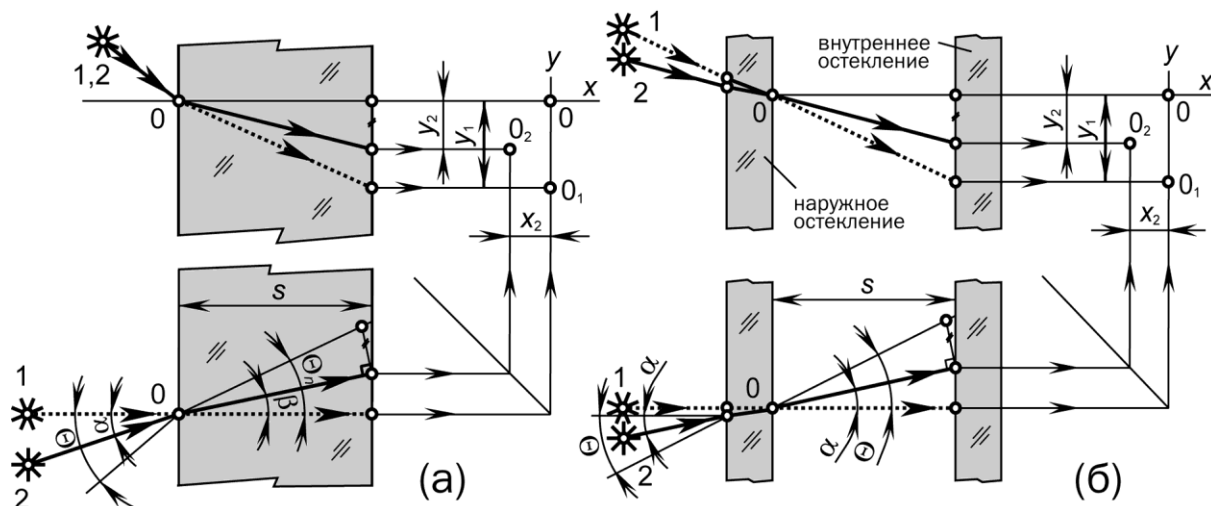
$$y = -\{s \operatorname{tg} (\Theta_n - |\beta|) / \cos \beta, \quad (2)$$

где Θ_n – угол преломления, β – угол преломления, соответствующий азимутальному углу падения α , 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 рис. 1а и 1б трассировка лучей показана для луча 1, падающего в плоскости перпендикулярной к окну, и луча 2, падающего под произвольным углом. Углы Θ и Θ_n , показанные на горизонтальных разрезах, повернуты для совмещения с горизонтальной плоскостью.



0 – точка падения на входную решетку, 0₁ и 0₂ – ее следы для солнечных лучей 1 и 2 на выходной решетке, x и y – координаты следов, s – расстояние между входной и выходной решетками, Θ – угол падения, Θ_n – угол преломле-

ния, α – азимутальный угол падения, β – 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

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

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 ($51^{\circ}47'00''N$, $55^{\circ}06'00''E$, UTC +05:00). За исключением особо оговоренных случаев, все расчеты проведены для окон с одинарным ($s = 4$ мм и $n = 1,5$) и двойным ($s = 16$ мм, $s_1 = s_2 = 4$ мм и $n_1 = n_2 = 1,5$) остеклением с азимутами ориентации 120° 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).

На рис. 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.



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

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 [28].

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

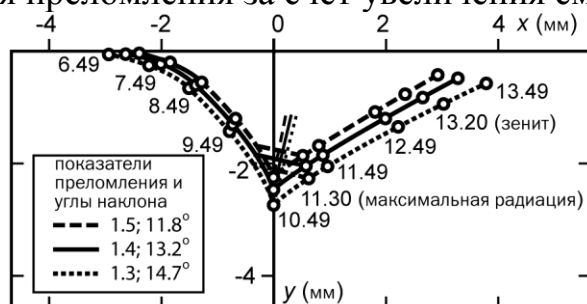


Рисунок 3. Оптимальные углы наклона решеток фильтра при разных показателях преломления для окна с одинарным остеклением

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 рис. 4а. На рис. 4б оптимальные углы определены для различных расстояний между оконными стеклами (12, 16 и 20 мм) для окна с двойным остеклением.

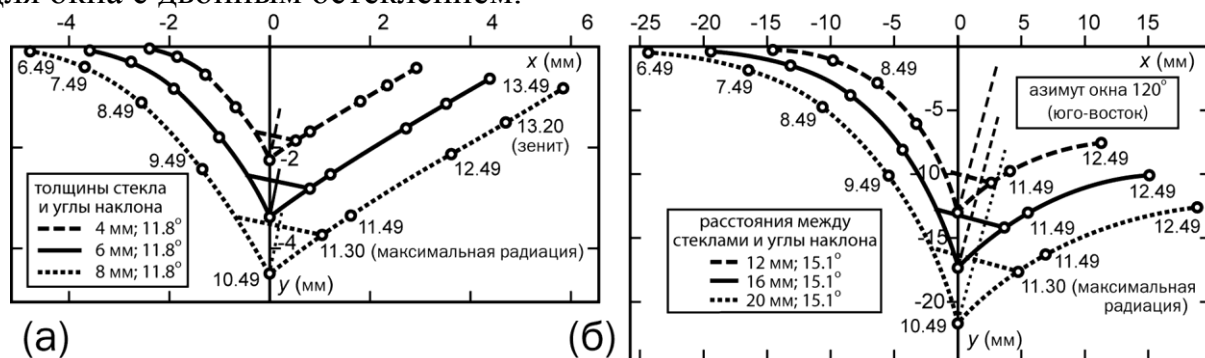


Рисунок 4. Оптимальные углы наклона решеток фильтра при разных расстояниях между входными и выходными решетками для окон с одинарным (а) и двойным (б) остеклением

Траектории следов 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. Аналогично для двойного остекления по формулам (3) и (4).

На рис. 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.

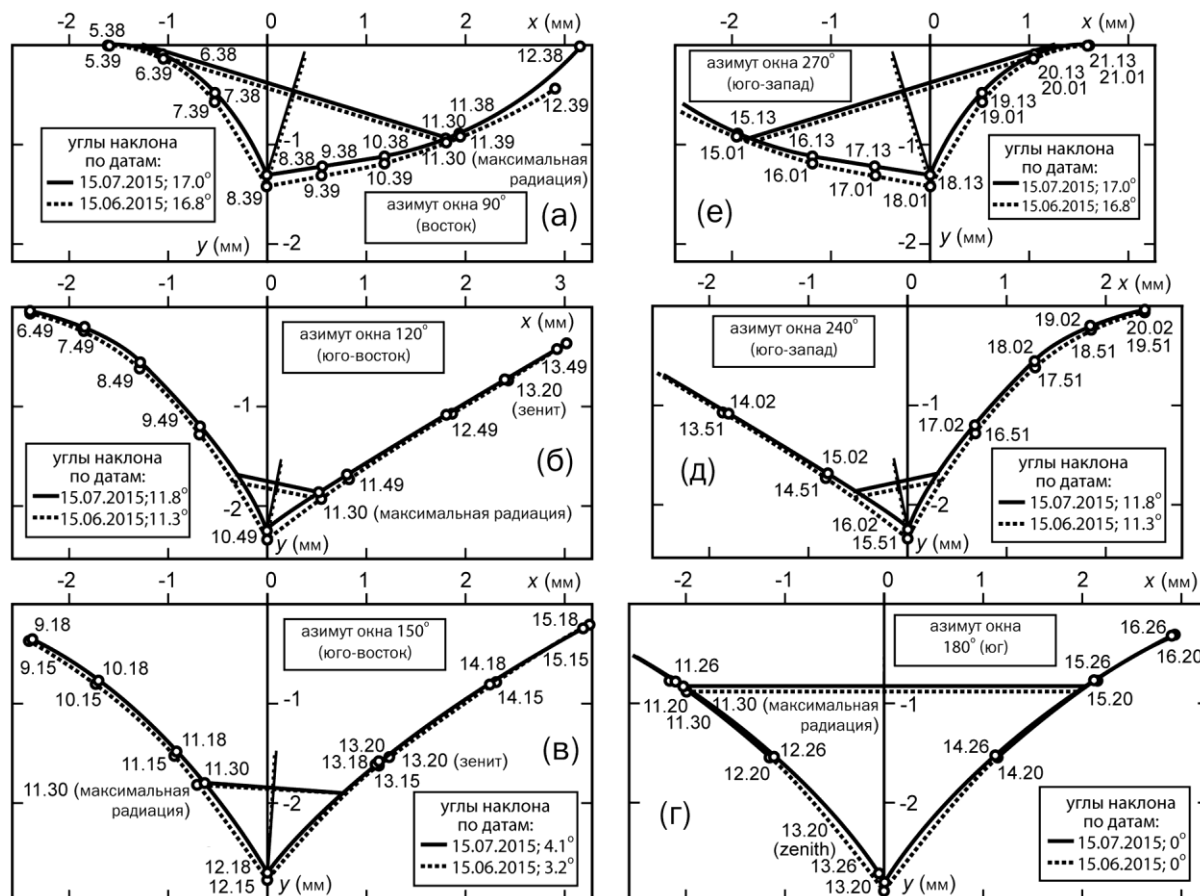


Рисунок 5. Оптимальные углы наклона решеток фильтра при различных азимутах ориентации окна по сторонам света

Зависимости оптимального угла от азимута окна для дня с максимальной солнечной радиацией и середины самого жаркого периода представлены на рис. 6. Максимальная разница между ними составляет 22%.

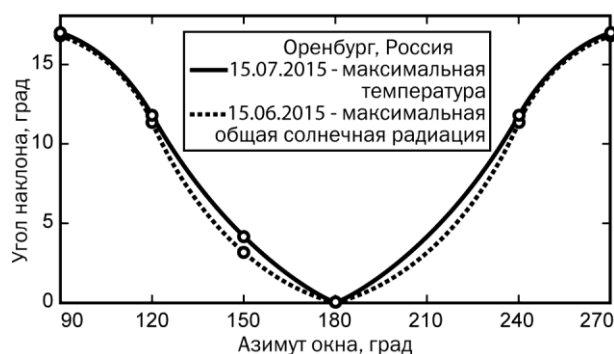


Рисунок 6. Зависимость оптимального угла наклона решеток фильтра от азимута ориентации окна

Метод расчета оптимального угла наклона решеток оптического фильтра с тонкопленочными решеточными слоями на двух поверхностях смарт-окна с одинарным и двойным остеклением может быть интересен будущим архитекторам и строителям, чтобы иметь представление о тенденциях развития современных оконных систем. Рассчитанные 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 [3].

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 VO₂ 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 Li_xWO₃/polymer laminate/Li_yV₂O₅ 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 MgF₂-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. – 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. Оптические фильтры для смарт-окон : монография / Р. С. Закируллин. – Оренбург : Университет, 2017. – 173 с. – ISBN 978-5-7410-1836-1.
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. Sabry, M., Eames, P.C., Singh, H., Yupeng Wu. Smart windows: Thermal modelling and evaluation. – *Solar Energy*. – 103. – P. 200–209. – 2014.