

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СМАРТ-ОКОН С УЧЕТОМ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ЗДАНИЯ**

Представлены результаты расчета оптимального угла наклона решеток оптического фильтра для смарт-окон с угловым селективным светопропусканием при двойном остеклении, при постоянном азимуте ориентации окон по сторонам света, для разных географических широт при одинаковой долготе здания. Для сравнения, расчеты проведены для середины самого жаркого периода года и дня с максимальной солнечной радиацией. Проведены также расчеты для городов, находящихся в разных полушариях и имеющих не только разную широту, но и долготу. Угловая селективность светопропускания смарт-окна достигается за счет применения в оконной конструкции 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. Смарт-окна с оптическими фильтрами предназначены для обеспечения гигиенических требований к естественному и искусственному освещению и инсоляции, приведенных в санитарно-эпидемиологических правилах и нормах СанПиН 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях».

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

Оптические фильтры все шире применяются для угловой селективной фильтрации солнечного излучения. Рассмотрены различные возможности реализации тонкопленочных фильтров с угловой селективностью пропускания для повышения пределов эффективности и выходной мощности на единицу площади солнечных батарей [1]. Адаптивный пространственный оптический фильтр предложен для обеспечения увеличенной генерации солнечного элемента, определены его количественные показатели для различных степеней турбулентности и интенсивности рассеянного света неба и для разных углов падения солнечных лучей [2]. Фильтр, содержащий угловую селективную фотонную структуру, используется для увеличения длины пути прохождения излучения через солнечный элемент [3].

В последние десятилетия в архитектуре и строительстве все шире применяются различные типы смарт-стекол, которые также являются оптическими фильтрами и используются в окнах для достижения оптимального естественного освещения, инсоляции и солнцезащиты. Применяются стекла с антирефлексивными свойствами [4], [5], теплосберегающие e-стекла с низкоэмиссионными спектрально-селективными тонкопленочными покрытия-

ми [6], [7]. Расчет коэффициентов отражения и пропускания многослойных поверхностных покрытий проводится различными методами и основан на формулах Френеля [8]–[10].

Светопропускание фотохромных стекол [11]–[14] обратимо изменяется в зависимости от интенсивности падающего ультрафиолетового или коротковолнового видимого света. 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 [15]. У термотропных систем [16] изменение свойств рассеяния света зависит от изменения температуры окружающей среды. Плавное изменение прозрачности и/или цвета электрохромных смарт-стекол [17], [18] достигается при пропускании слабого электрического тока через их активный слой.

Существуют тонкие пленки, прозрачные для видимого света и отражающие тепловое излучение [19]. В последние годы активно исследуются перспективные наноструктурированные метаматериалы с перспективами использования в оптических фильтрах [20], [21]. Проводятся исследования с целью разработки стекол с антиобледенением [22], [23].

Несмотря на широкие возможности управления светопропусканием и фильтрации солнечного излучения с помощью смарт-стекол, они не позволяют добиться селективного регулирования направленного светопропускания по диапазонам углов падения солнечных лучей с динамической адаптацией к положению солнца. Для этого используются жалюзи и т. п. устройства перераспределения световых потоков [24], [25]. Характеристики распределения светопропускания инновационных оконных систем с жалюзи и другими устройствами можно рассчитывать современными методами [26]–[28]. Количество прямой солнечной радиации [29], попадающей в помещение, изменяется в зависимости от времени суток и сезона, и при необходимости, дополнительные устройства перераспределения световых потоков блокируют прямой солнечный свет. Составлены базы данных по метеорологическим наблюдениям за солнечной радиацией для различных районов Земли [30], [31], разработаны также расчетные методы [32], [33].

Целью статьи является расчет оптимального угла наклона решеток оптического фильтра для смарт-окон с угловым селективным светопропусканием при разных географических координатах здания. Основой таких смарт-окон является оптический фильтр с двумя поверхностными решетками, состоящими из чередующихся параллельных пропускающих и непропускающих полос [34]–[36], обеспечивающий регулирование светопропускания без использования дополнительных устройств перераспределения световых потоков. Смарт-окна с оптическими фильтрами предназначены для обеспечения 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». Расчет оптимального угла наклона решеток фильтра проводится по методу, приведенному в [37].

### Метод расчета

Метод расчета оптимального угла наклона решеток оптического фильтра [37] приспособлен к сложной криволинейной траектории

движения Солнца относительно окна. В отличие от жалюзи, решетки оптического фильтра могут быть расположены на оконном стекле под любым углом – наиболее оптимальным для окна с заданным азимутом ориентации и географическими координатами с учетом сезонного и суточного распределения интенсивности солнечного излучения. С учетом местного климата, в качестве расчетной даты выбирается середина самого жаркого периода года или день с максимальным солнечным излучением. Для выбранной даты определяются время зенитного положения солнца и время с максимальной солнечной радиацией. Вкратце, алгоритм определения оптимального угла наклона решеток фильтра на оконном стекле состоит в следующем [37]:

1) по одной из многочисленных компьютерных программ для выбранной даты через каждый час вычисляются высота стояния и азимут солнца по отношению к времени, когда азимуты солнца и ориентации окна одинаковы;

2) рассчитывается азимут солнца для заданного окна, измеренный от перпендикуляра к окну;

3) по частному случаю первой теоремы косинусов для трехгранного угла рассчитывается угол падения луча на вертикальное окно;

4) определяются через каждый час координаты следа точки падения на входную поверхность фильтра на его выходной поверхности (формулы для окон с одинарным и двойным остеклением разные [37]);

5) по вычисленным координатам через каждый час строятся траектории следа точки падения на выходной поверхности. Эти траектории показывают смещение следов (теней) непропускающих полос входных решеток фильтра на выходной поверхности;

6) с помощью построенных траекторий для выбранного времени дня определяется оптимальный угол наклона решеток фильтра.

### Географическая широта

На рисунке 1 представлены результаты расчетов по описанному выше алгоритму оптимальных углов наклона решеток фильтра для окна с двойным остеклением (расстояние между остеклениями  $s = 16$  мм, толщина стекол  $s_1 = s_2 = 4$  мм и показатель преломления стекла  $n_1 = n_2 =$

1,5) с азимутом ориентации  $120^\circ$  по траекториям следов точки падения солнечных лучей на выходной поверхности оконного фильтра для 15.06.2016 (день с максимальной солнечной радиацией в г. Оренбурге) и 15.07.2016 (середина наиболее жаркого периода в г. Оренбурге) при разных широтах и при долготе г. Оренбурга ( $51^\circ47'00''N$ ,  $55^\circ06'00''E$ , UTC +05:00). Оптимальные углы определены для 11 ч. 30 мин. (время с максимальной солнечной радиацией в г. Оренбурге).

Из-за сильной зависимости высоты стояния солнца от его азимута при низких широтах углы падения солнечных лучей большие:  $52^\circ-84^\circ$  для широты  $0^\circ$ ,  $50^\circ-88^\circ$  для широты  $15^\circ$  и  $74^\circ-88^\circ$  для широты  $25^\circ$  (по временам дня, указанным на рисунке 1). В этих случаях проходящее в помещение прямое солнечное излучение попадает в область около окна, поэтому нет необходимости в угловом регулировании светопропускания окна. По результатам расчетов построена зависимость оптимальных углов наклона решеток

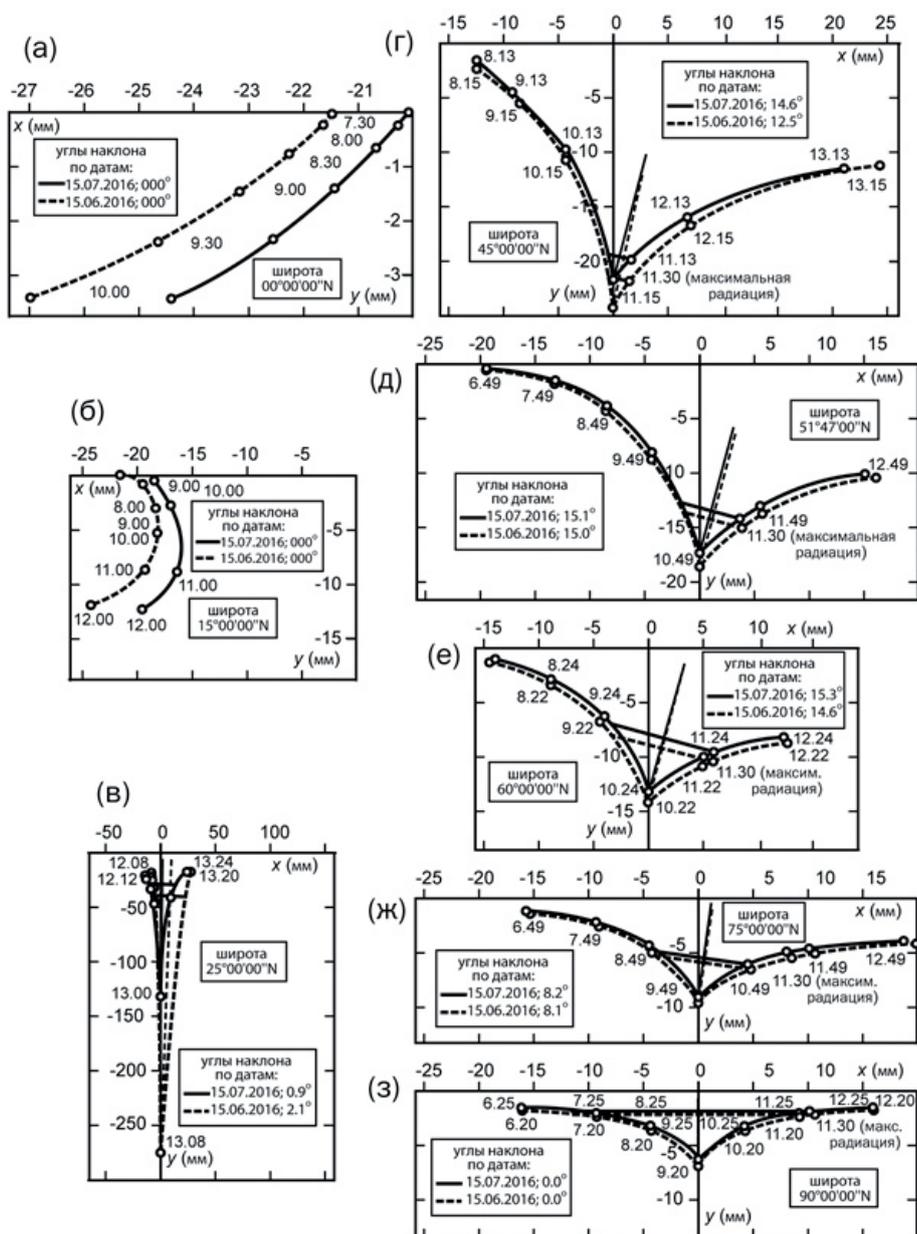


Рисунок 1 – Оптимальные углы наклона решеток фильтра при разных географических широтах

фильтра от широты, представленная на рисунке 2. По этой зависимости рекомендуется выбирать углы наклона решеток для окон с двойным остеклением и азимутом  $120^\circ$  при умеренных и высоких северных широтах при долготе г. Оренбурга. Оптимальные углы должны определяться индивидуально для каждого города и азимута ориентации окна с учетом климатических особенностей по аналогичной методике.

### Географическая долгота

На рисунке 3 представлены результаты расчета оптимальных углов наклона решеток фильтра для окон с одинарным остеклением при азимуте их ориентации в северном полушарии  $120^\circ$  ( $300^\circ$  в южном полушарии), толщине оконного стекла  $s = 4$  мм и показателе преломления стекла  $n = 1,5$ , для городов Нью-Йорк ( $40^\circ 42' 46'' N$ ,  $74^\circ 00' 21'' W$ , UTC  $-04:00$ ), Сидней ( $33^\circ 51' 54'' S$ ,  $151^\circ 12' 34'' E$ , UTC  $+11:00$ ), и Рио-де-Жанейро ( $22^\circ 54' 30'' S$ ,  $43^\circ 11' 47'' W$ , UTC  $-02:00$ ). Расчеты проведены для городов Нью-Йорк, Сидней и Рио-де-Жанейро по траекториям следов точки падения солнечных лучей на выходной поверхности оконного фильтра для следующих дат, соответственно: 1 июля, 15 декабря и 15 января (в дни с максимальной солнечной радиацией) и 15 июля, 1 февраля и 15 февраля (в середине самого жаркого периода). Линии оптимальных углов наклона проведены для 12 ч. 30 мин. (время максимальной интенсивности солнечной радиации в Нью-Йорке), 13 ч. 09 мин. и 13 ч. 02 мин. (время зенитного положения Солнца для Сиднея и Рио-де-Жанейро, соответственно).

Разница между оптимальными углами наклона, определенными для максимальной сол-

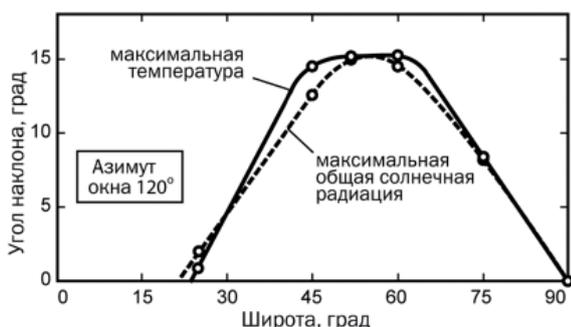


Рисунок 2 – Зависимости оптимального угла наклона решеток фильтра от широты для дня с максимальной солнечной радиацией и середины наиболее жаркого периода

нечной радиации и середины самого жаркого периода, составляет 4,25%, 28,24% и 41,25% для городов Нью-Йорк, Сидней и Рио-де-Жанейро, соответственно. Большие различия для Сиднея и Рио-де-Жанейро обусловлены большими промежутками между датами с максимальной солнечной радиацией и середины жаркого периода, а также сильной зависимостью высоты стояния солнца от его азимута при низких широтах.

### Заключение

В статье приведена методика расчета оптимального угла наклона решеток оптического фильтра с тонкопленочными решеточными слоями на двух поверхностях смарт-окна с одинарным и двойным остеклением для обеспече-

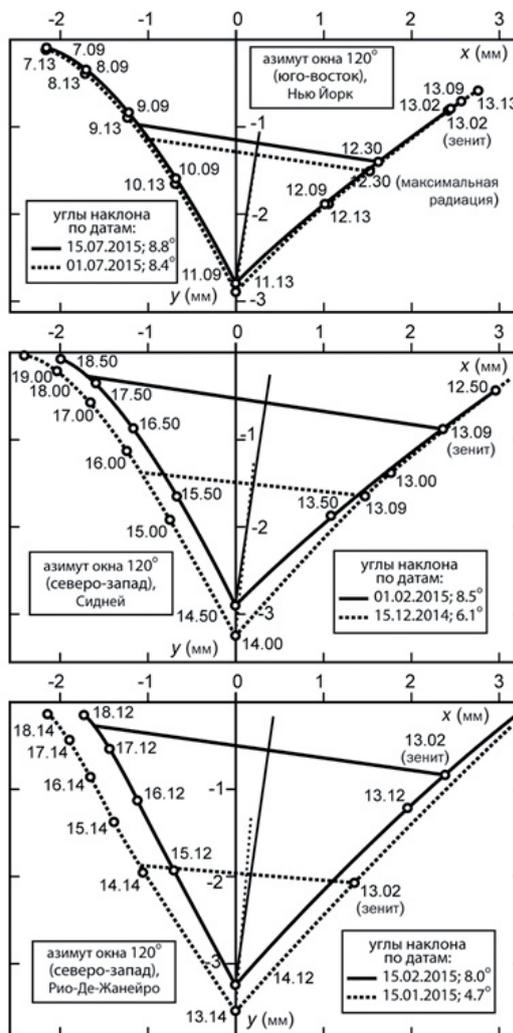


Рисунок 3 – Оптимальные углы наклона решеток фильтра для окон с одинарным остеклением для городов Нью-Йорк (США), Сидней (Австралия) и Рио-де-Жанейро (Бразилия)

ния угловой селективной фильтрации прямого солнечного излучения с учетом географических координат здания, траектории Солнца, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечного излучения. Продемонстрированы результаты оптимизации параметров фильтра для смарт-окон с угловым селективным светопропусканием при двойном остеклении, при постоянном азимуте ориентации окон по сторонам света, для разных географических широт при одинаковой долготе здания. Проведены также расчеты для городов, находящихся в разных полушариях и имеющих не только разную широту, но и долготу.

Все расчеты проведены для середины самого жаркого периода года и дня с максимальной солнечной радиацией. Решеточный оптический фильтр с оптимизированными па-

раметрами 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 надежную солнцезащиту. Смарт-окна с оптическими фильтрами предназначены для обеспечения 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 по описанной методике оптимальные углы наклона могут быть полезны для создания жалюзи с наклонными ламелями и жалюзи типа зебра с наклонными полосами.

14.09.2017

**Список литературы:**

1. 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.
2. 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.
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. Shanbhogue, H.G., Nagendra, C.L., Annapurna, M.N., Kumar, S.A., Thutupalli, G.K.M. Multilayer antireflection coatings for the visible and near-infrared regions. – *Appl. Opt.* – 36. – P. 6339–6351. – 1997.
5. Kennedy, S. R., Brett, M. J. Porous Broadband Antireflection Coating by Glancing Angle Deposition. – *Appl. Opt.* – 42, No. 22. – P. 4573–4579. – 2003.
6. Berning, P.H. Principles of design of architectural coatings. – *Appl. Opt.* – 22. – P. 4127–4141. – 1983.
7. 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.
8. 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.
9. Лапшин, Б., Петраков, В. Синтез оптических многослойных фильтров. – *Компоненты и технологии*. – 10. – С. 150–153. – 2006.
10. 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.
11. Look, D.C., Johnson, W.L. Transmittance of photochromic glass at environmental extremes. – *Appl. Opt.* – 18. – P. 595–597. – 1979.
12. Ferrari, J. A., Perciante, C. D. Two-state model of light induced activation and thermal bleaching of photochromic glasses: theory and experiments. – *Appl. Opt.* – 47. – P. 3669–3673. – 2008.
13. Nikonorov, N.V., Sidorov, A.I., Tsekhomski, V.A., Vinogradova, O.P. Low-threshold nonlinear-optical response of photochromic glasses with copper chloride nanocrystals. – *J. Opt. Technol.* – 75. – P. 809–812. – 2008.
14. Crow, I.D., Borrelli, N.F., Seward III, T.P., Chodak, J. Lightguiding in Photochromic Glasses. – *Appl. Opt.* – 14. – P. 580–585. – 1975.
15. 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.
16. Seeboth, A., Ruhmann, R., Mühlhling, O. Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control. – *Materials*. – 3. – P. 5143–5168. – 2010.
17. Andersson, A.M., Granqvist, C.G., Stevens, J.R. Electrochromic Li<sub>x</sub>WO<sub>3</sub>/polymer laminate/Li<sub>y</sub>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> device: toward an all-solid-state smart window. – *Appl. Opt.* – 28. – P. 3295–3302. – 1989.
18. Niklasson, G.A., Granqvist, C.G. Electrochromics for smart windows: thin films of tungsten oxide and nickel oxide, and devices based on these. *J. Mater. Chem.* – 17. – P. 127–156. – 2007.
19. Hamberg, I., Granqvist, C.G. Color properties of transparent and heat-reflecting MgF<sub>2</sub>-coated indium-tin-oxide films. – *Appl. Opt.* – 22. – P. 609–614. – 1983.
20. Симовский, К.Р. О материальных параметрах метаматериалов (Обзор). – *Оптика и спектроскопия*. – 107, № 5. – С. 766–793. – 2009.
21. Simovski C.R. On electromagnetic characterization and homogenization of nanostructured metamaterials. – *J. Opt.* – 13. – 013001. – 2011.

22. Hamberg, I., Svensson, J.S.E.M., Eriksson, T.S., Granqvist, C.G., Arrenius, P., Norin, F. Radiative cooling and frost formation on surfaces with different thermal emittance: theoretical analysis and practical experience. – *Appl. Opt.* – 26, No. 11. – P. 2131–2136. – 1987.
23. Ribbing, C.G. Beryllium oxide: a frost-preventing insulator. – *Opt. Lett.* – 15. – P. 882–884. – 1990.
24. Куренкова, Е. Гардины, шторы, жалюзи. – М.: Дом, 2008. – 210 с.
25. Куропаткина, М.В. Ставни, навесы, жалюзи. – М.: Вече, 2006. – 192 с.
26. McNeil, A., Jonsson, J.C., Appelfeld, D., Ward, G., Lee, E.S. A validation of a ray-tracing tool used to generate bi-directional scattering distribution functions for complex fenestration systems. – *Solar Energy.* – 98. – P. 404–414. – 2013.
27. Andersen, M. Light distribution through advanced fenestration systems. – *Building Research & Information.* – 30, No. 4. – P. 264–281. – 2002.
28. Fernandes, L.L., Lee, E.S., McNeil, A., Jonsson, J.C., Nouidui, T., Pang, X., Hoffmann, S. Angular selective window systems: Assessment of technical potential for energy savings. – *Energy and Buildings.* – 90. – P. 188–206. – 2015.
29. 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.
30. Page, J., Albuissou, M., Wald, L. The European Solar Radiation Atlas: A valuable digital tool. – *Solar Energy.* – 71 (1). – P. 81–83. – 2001.
31. Lee, T., Oppenheim, D., Williamson, T.J. Australian Solar Radiation Data Handbook. Energy Research and Development Corporation, Canberra. – 1995.
32. Marion, W., George, R. Calculation of solar radiation using a methodology with worldwide potential. – *Solar Energy.* – 71 (4). – P. 275–283. – 2001.
33. 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.
34. Zakirullin, R.S. Creating optical filters with angular-selective light transmission. – *Appl. Opt.* – 54, No. 21. – P. 6416–6419. – 2015.
35. Zakirullin, R.S., Letuta, S.N. A smart window for angular selective filtering solar radiation. – *Solar Energy.* – 120. – P. 585–592. – 2015.
36. 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.
37. Закируллин, Р.С. Способ оптимизированной угловой селективной фильтрации солнечного излучения. – *Вестник Оренбургского гос. ун-та.* – 8. – С. 182–189. – 2017.

#### **Сведения об авторах:**

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

**Оденбах Ирина Александровна**, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения,  
вентиляции и гидромеханики Оренбургского государственного университета,  
кандидат педагогических наук  
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 3015, тел.: +7 (3532) 37 24 26, e-mail: 79128486201@yandex.com