

УДК 628.95.001.24

Р.С. ЗАКИРУЛЛИН, И.А. ОДЕНБАХ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СМАРТ-ОКНА С РЕШЕТОЧНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ФИЛЬТРОМ

Статья посвящена численному моделированию геометрических параметров оптического фильтра с двумя поверхностными тонкопленочными решетками, сформированными поглощающими, отражающими или рассеивающими параллельными полосами из хромогенных или других материалов, чередующимися с направленно пропускающими полосами (необработанная поверхность из чистого стекла). Такой фильтр с решетками, расположенными на обеих поверхностях одинарного остекления или на внутренних поверхностях камеры двойного или тройного остекления, обеспечивает угловое селективное светопропускание смарт-окна без использования жалюзи и подобных устройств. С учетом ориентации окна, географических координат здания, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечного излучения в районе строительства определены оптимальные углы наклона полос решеток на поверхностях окна, ширины полос обеих решеток и их относительное расположение. Эти параметры минимизируют направленное светопропускание смарт-окна в заданную дату и время суток.

Ключевые слова: численное моделирование, смарт-окно, решеточный оптический фильтр, солнечная радиация, направленное светопропускание.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-736-4-103-110

В последние десятилетия для обеспечения комфортного дневного освещения, инсоляции и теплового режима в помещении широко используются смарт-окна. Наряду с появившимися ранее теплосберегающими низкоэмиссионными *e*-стеклами [1], расширяется применение хромогенных материалов, используемых в тонкопленочных покрытиях, изменяющих светопропускание смарт-окон в зависимости от температуры окружающей среды (термохромные [2] и термотропные [3] материалы), интенсивности коротковолнового видимого и ультрафиолетового диапазона солнечного излучения (фотохромные [4]) и приложенного внешнего напряжения (электрохромные [5]). Эти современные смарт-окна являются важным компонентом для повышения энергоэффективности зданий [6, 7].

Вся площадь обычных смарт-окон покрыта активным слоем хромогенного материала и в результате, когда окно переключается в непрозрачный режим при определенных внешних условиях, оно перестает передавать не только прямое солнечное излучение, но также рассеянное и отраженное излучение. Однако для создания комфортных условий в помещении желательно защитить его только от проникновения прямых солнечных лучей, пропуская рассеянный свет неба и свет, отраженный от поверхности земли и окружающих зданий. В настоящее время такое регулирование светопропускания окна в зависимости от угла падения солнечных лучей невозможно без жалюзи,

систем статического углового селективного затенения [8], автоматически управляемых активных оконных жалюзи [9] и т.п.

Известные тонкопленочные решеточные покрытия имеют периоды решеток порядка от сотен нанометров в волоконных брэгговских решетках [10] до субмиллиметров в длиннопериодных волоконных решетках [11]. Явления, возникающие в решетках с такими периодами, описываются законами физической оптики. Что касается углового регулирования светопропускания окон, рассматриваемых в данной статье, то размеры используемых элементов затенения (ширина ламелей жалюзи, ширина полос жалюзи-зебр и т.д.) составляют порядка миллиметров и десятков миллиметров и происходящие явления можно рассматривать исключительно в пределах геометрической оптики, т.е. явлениями дифракции, дисперсии и т.п. можно пренебречь.

Целью исследования является численное моделирование геометрических параметров смарт-окна с решеточным оптическим фильтром [12–16], имеющим угловое селективное светопропускание и динамически адаптирующимся к траектории движения Солнца относительно окна без использования устройств перераспределения дневного света. Устройство такого фильтра для окон с одинарным и двойным остеклением подробно описано [13, 15]. Фильтр состоит из двух тонкопленочных решеток на поверхностях одного или разных оконных стекол, образованных параллельными непропускающими (отражающими, поглощающими или рассеивающими) полосами, между которыми расположены направленно пропускающие полосы. Теоретические методы определения геометрических параметров решеток фильтра рассмотрены в [12, 14, 16]. Этими параметрами являются ширины пропускающих и непропускающих полос обеих решеток, угол наклона решеток фильтра и характеристический угол фильтра.

Ширины пропускающих полос c_1 и c_3 и непропускающих полос c_2 и c_4 входной и выходной решеток влияют на коэффициент светопропускания окна. Периоды двух решеток равны: $c_1 + c_2 = c_3 + c_4$. Характеристический угол фильтра показывает смещение решеток относительно друг друга. Оптимальный угол наклона решеток фильтра, определяемый специальным методом [14], адаптирует характеристику светопропускания окна к траектории движения Солнца относительно него. Параметры фильтра рассчитываются для оптимизации угловой селективной фильтрации прямого солнечного излучения путем минимизации направленного светопропускания окна в заранее установленную дату и время суток с учетом ориентации окна по сторонам света, широты здания, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечного излучения [14, 16].

Оптимальный угол наклона решеток фильтра γ для окна с заданным азимутом определяется в соответствии с алгоритмом [14], включающим в себя:

- 1) определение траектории движения Солнца относительно окна на основе расчета высот стояния и азимутов Солнца на дату, выбранную с учетом местного климата (например, в середину самого жаркого периода года или в день максимальной солнечной радиации);

- 2) линейную аппроксимацию траектории Солнца в выбранном интервале времени или построение касательной к траектории Солнца в выбранное время (например, во время максимальной солнечной радиации);

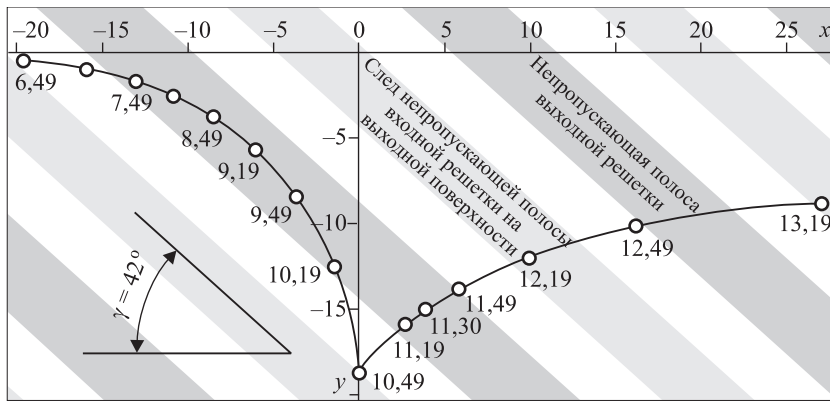


Рис. 1. Координаты следов точки падения солнечного луча на входную поверхность фильтра на его выходной поверхности

3) определение оптимального угла наклона как угла между аппроксимирующей линией или касательной и горизонтальной линией.

Угол наклона γ решеток фильтра, определяемый этим алгоритмом, адаптируется к траектории движения Солнца относительно окна и подходит для окон с любым остеклением (одинарным, двойным или тройным), а также для изготовления устройств с наклонными элементами затенения, например, жалюзи-зебр с наклонными полосами.

Координаты x и y следов точки падения солнечного луча на входную поверхность фильтра на его выходной поверхности приведены на рис. 1. Расположение пропускающих полос выходных решеток и следов непропускающих полос входных решеток на поверхности выходных решеток показаны на время 11 ч 30 мин. Координаты для одинарного остекления определяются [16] по формулам:

$$x = s \operatorname{tg} [\alpha \arcsin(\sin \Theta / n) / \Theta]; \quad (1)$$

$$y = -\{s \operatorname{tg} [\arcsin(\sin \Theta / n) - |\alpha \arcsin(\sin \Theta / n) / \Theta|] / \cos [\alpha \arcsin(\sin \Theta / n) / \Theta]\},$$

где s – толщина стекла;

α – азимут Солнца, измеренный от перпендикуляра к окну (разность между азимутами окна и Солнца в данный момент времени);

n – показатель преломления стекла;

Θ – угол падения солнечного луча на окно.

Для окна с двойным остеклением (а также для окна с тройным остеклением, когда обе решетки фильтра расположены в одной из двух оконных камер) координаты определяются [14] по формулам:

$$x = s \operatorname{tg} \alpha; \quad (2)$$

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

Определение проекций следов точки падения на поверхность входной решетки на плоскость, перпендикулярную полосам решеток фильтра, показано на рис. 2 под характеристическим и произвольным углом падения. Анализируя рис. 2, проекции θ углов падения на плоскость, перпендикулярную полосам, рассчитываются [16]

$$\theta = \operatorname{arctg} (\{\sqrt{x^2 + y^2} \cos [\gamma - \operatorname{arctg}(x/y)]\} / s). \quad (3)$$

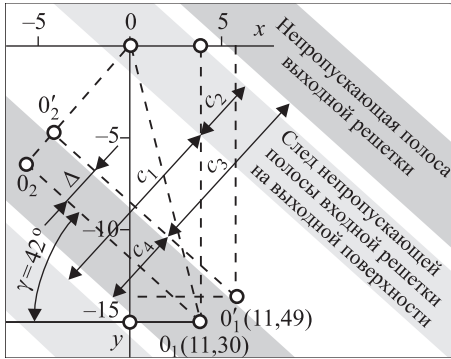


Рис. 2. Определение проекций следов точки падения на плоскость, перпендикулярную полосам решеток фильтра

0 – точка падения на поверхность входных решеток; 0₁ и 0'₁ – следы точки 0 на поверхности выходных решеток под характеристическим углом и произвольным углом падения; 0₂ и 0'₂ – проекции точек 0₁ и 0'₁ на плоскость, перпендикулярную полосам; Δ – сдвиг между решетками фильтра под характеристическим и произвольным углом падения

При расчете характеристического угла фильтра берутся значения координат x_{\min} и y_{\min} для времени с требуемым минимальным светопропусканием.

На рис. 2 расположение полос показано для 11 ч 49 мин. Сдвиг Δ между решетками фильтра под характеристическим углом и произвольным углом падения (расстояние между точками 0₂ и 0'₂ на рис. 2) рассчитывается [16] по формуле

$$\Delta = \sqrt{x_{\min}^2 + y_{\min}^2} \cos[\gamma - \arctg(x_{\min} / y_{\min})] - \sqrt{x^2 + y^2} \cos[\gamma - \arctg(x / y)]. \quad (4)$$

Ширины полос решеток фильтра c_1 , c_2 , c_3 и c_4 определяются из системы четырех уравнений, первым из которых является равенство периодов двух решеток. По методу, приведенному в [14, 16], ширины полос решеток фильтра рассчитываются по формулам (первые два уравнения для окон с одинарным и двойным/тройным остеклением соответственно):

$$\begin{aligned} c_3 &= 2s \sin \Theta_c / \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta_c} - 2s \sin \Theta_{av} / \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta_{av}}; \\ c_3 &= 2stg \Theta_c - 2stg \Theta_{av}; \\ c_4 &= c_3 (1 - \tau_{\max}) / \tau_{\max}; \\ c_2 &= c_3 - \tau_{\min} (c_3 + c_4); \\ c_1 &= c_3 + c_4 - c_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где Θ_{av} – средний угол падения, при котором теоретический коэффициент светопропускания фильтра должен иметь среднее значение ($\tau_{av} = 0,5(\tau_{\min} + \tau_{\max})$); τ_{\min} и τ_{\max} – минимальный и максимальный теоретические значения коэффициента светопропускания.

В табл. 1 приведены результаты расчета углов наклона решеток и характеристических углов фильтра для семи различных азимутов окон через каждые 15° в соответствии с методами, описанными выше. Расчеты выполнены для смарт-окна с двойным остеклением при расстоянии между решетками $s = 16$ мм в день (15.06.2018) и время (11 ч 30 мин) максимальной солнечной радиации в г. Оренбурге. При увеличении азимута окна от 9 до 180° угол наклона решеток фильтра уменьшается от 44 до 0°. При этом характеристический угол фильтра сначала возрастает, затем убывает, имея максимальное значение при азимуте окна 135°.

Ширины полос определены для предварительно заданных минимальных и максимальных требуемых реальных коэффициентов светопропускания τ_{\min} и τ_{\max} при различных средних углах падения. Расчеты выполнены для

Таблица 1. Углы наклона решеток и характеристические углы фильтра для разных азимутов окон

Азимут окна, град.	Интервал времени, ч. мин	Угол наклона, град.	Характеристический угол, град.
90	6.39–11.39	44	–14,12
105	7.20–12.20	43	7,96
120	7.49–12.19	42	28,71
135	8.36–13.06	36	47,17
150	9.15–13.15	34	41,39
165	9.18–13.48	25	40,22
180	11.20–15.20	0	27,71

окна с двойным остеклением с азимутом 120° при расстоянии между решетками $s = 16$ мм в день (15.06.2018) и время (11 ч 30 мин) максимальной солнечной радиации в Оренбурге. Минимальные и максимальные теоретические коэффициенты пропускания τ_{\min} и τ_{\max} рассчитываются по формуле

$$\tau = \tau_r / \left[\left(1 - 0,5 \left\{ \frac{\sin^2 [\Theta - \arcsin(\sin \Theta / n)]}{\sin^2 [\Theta + \arcsin(\sin \Theta / n)]} + \frac{\operatorname{tg}^2 [\Theta - \arcsin(\sin \Theta / n)]}{\operatorname{tg}^2 [\Theta + \arcsin(\sin \Theta / n)]} \right\} \right)^2 \times \exp \left(-\alpha_a s \sqrt{\frac{1 + \sin^2 \Theta}{n^2 - \sin^2 \Theta}} \right) \right], \quad (6)$$

где α_a – натуральный коэффициент поглощения стекла ($\alpha_a = 0,01 \text{ мм}^{-1}$). Ширины полос, рассчитанные по формулам (5), приведены в табл. 2.

Ширины полос и, следовательно, периоды решеток увеличиваются с уменьшением среднего угла падения. При одном и том же среднем угле паде-

Таблица 2. Ширины полос и периоды решеток при разных средних углах падения, мм

Средний угол, град.	Ширины полос				Период решеток
	c_1	c_2	c_3	c_4	
Коэффициенты светопропускания $\tau_{\min} = 0,45$ ($\tau_{r \min} = 0,26$) и $\tau_{\max} = 0,7$ ($\tau_{r \max} = 0,45$)					
23	4,2233	1,4078	3,9418	1,6893	5,6311
19,807	6,4286	2,1429	6	2,5714	8,5714
13,233	10,7143	3,5714	10	4,2857	14,2857
0	18,7768	6,2589	17,525	7,5107	25,0357
Коэффициенты светопропускания $\tau_{\min} = 0,15$ ($\tau_{r \min} = 0,09$) и $\tau_{\max} = 0,4$ ($\tau_{r \max} = 0,26$)					
23	7,3908	2,4636	3,9418	5,9127	9,8544
19,807	11,25	3,75	6	9	15
13,233	18,75	6,25	10	15	25
0	32,8594	10,9531	17,525	26,2875	43,8125

ния ширины полос и периоды решеток увеличиваются с уменьшением коэффициента светопропускания.

Выводы. На основе проведенных ранее исследований в статье кратко описаны устройство решеточного оптического фильтра для смарт-окон с угловым селективным светопропусканием и методы расчета его геометрических параметров. Фильтр состоит из двух поверхностных тонкопленочных решеток, сформированных непр пропускающими параллельными полосами из хромогенных или других материалов, чередующимися с направленно пропускающими полосами. Впервые проведено численное моделирование таких параметров фильтра, как угол наклона полос решеток на поверхностях окна, ширины полос обеих решеток и характеристический угол фильтра, показывающий относительное расположение двух решеток.

Оптимальные геометрические параметры фильтра определены с учетом азимута ориентации окна, географических координат здания, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечного излучения с целью минимизировать направленное светопропускание смарт-окна в заданную дату и время суток. Результаты численного моделирования показывают, что при увеличении азимута окна от 90 до 180° угол наклона решеток фильтра уменьшается от 44 до 0° , а характеристический угол фильтра сначала возрастает, затем убывает, имея максимальное значение при азимуте окна 135° . Ширины полос и периоды решеток увеличиваются с уменьшением среднего угла падения. При одном и том же среднем угле падения ширины полос и периоды решеток увеличиваются с уменьшением коэффициента светопропускания. Решеточные оптические фильтры с оптимизированными геометрическими параметрами обеспечивают угловое селективное светопропускание смарт-окна без использования жалюзи и подобных устройств и повышают комфортность дневного освещения, инсоляционного и температурного режима в помещении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Berning P.H. Principles of design of architectural coatings // *Appl. Opt.* 1983. No. 22. P. 4127–4141.
2. Jia C., Wu Z., Wu X., Wang J., Gou J., Huang Z., Zhou H., Yao W., Jiang Y. Al-doped VO_2 films as smart window coatings: Reduced phase transition temperature and improved thermochromic performance // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018. No. 176. P. 174–180.
3. Gladen A.C., Davidson J.H., Mantell S.C. The effect of a thermotropic material on the optical efficiency and stagnation temperature of a polymer flat plate solar collector // *ASME J. Sol. Energy Eng.* 2014. No. 137 (2). 021003.
4. Hocevar M., Krasovec U.O. A photochromic single glass pane // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018. No. 186. P. 111–114.
5. Chang-Jian C.-W., Cho E.-C., Yen S.-C., Ho B.-C., Lee K.-C., Huang J.-H., Hsiao Y.-S. Facile preparation of $\text{WO}_3/\text{PEDOT:PSS}$ composite for inkjet printed electrochromic window and its performance for heat shielding // *Dyes and Pigments.* 2018. No. 148. P. 465–473.
6. Casini M. Smart buildings: Advanced materials and nanotechnology to improve energy-efficiency and environmental performance. Woodhead Publishing, 2016.
7. Desideri U., Asdrubali F. Handbook of Energy Efficiency in Buildings. First ed. Butterworth-Heinemann, 2018.

8. 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*. 2015. No. 90. P. 188–206.
9. Luecke G.R., Slaughter J. Design, development, and testing of an automated window shade controller // *ASME J. Sol. Energy Eng.* 1995. No. 117 (4). P. 326–332.
10. Mohanchandra K.P., Karnani S., Emmons M.C., Richards W.L., Carman G.P. Thin film NiTi coatings on optical fiber Bragg sensors // *Appl. Phys. Lett.* 2008. No. 93. 031914.
11. Villar I.D., Matias I.R., Arregui F.J. Deposition of coatings on long-period fiber gratings: tunnel effect analogy // *Opt. Quant. Electron.* 2006. No. 38. P. 655–665.
12. Закируллин Р.С. Селективное регулирование направленного светопропускания по углам падения лучей // *ЖТФ*. 2012. Т. 82 (10). С. 134–136.
13. Закируллин Р.С. Оптический фильтр с угловой селективностью светопропускания // *Оптический журнал*. 2013. Т. 80 (8). С. 16–24.
14. Zakirullin R.S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2018. Vol. 35. P. 1592–1598.
15. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Оптимизированная угловая селективная фильтрация прямого солнечного излучения // *Известия вузов. Строительство*. 2018. № 10. С. 91–97.
16. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Смарт-окно с решеточным оптическим фильтром для динамического контроля дневного освещения // *Известия вузов. Строительство*. 2019. № 12. С. 96–107.

Закируллин Рустам Сабирович, д-р техн. наук, доц.;

E-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

Оренбургский государственный университет

Оденбах Ирина Александровна, канд. пед. наук; E-mail: 79128486201@yandex.com

Оренбургский государственный университет

Получено 16.03.2020

Zakirullin Rustam Sabirovich, DSc, Ass. Professor;

E-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

Orenburg State University, Russia

Odenbakh Irina Aleksandrovna, PhD; E-mail: 79128486201@yandex.com

Orenburg State University, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF SMART WINDOW WITH GRATING OPTICAL FILTER

Article is devoted to numerical simulation of the geometric parameters of an optical filter with two surface thin-film gratings formed by absorptive, reflective or scattering parallel strips of chromogenic or other materials, alternating with directionally transmissive strips (untreated surface of pure glass). Such a filter with gratings located on both surfaces of a single glazing or on the inner surfaces of a double or triple glazing chamber provides angular-selective light transmission of a smart window without using blinds and similar devices. Taking into account the orientation of the window, the geographical coordinates of the building, the seasonal and daily distribution of the intensity of solar radiation in the construction area, the optimal slope angles of the strips of the gratings on the window surfaces, the widths of the strips of both gratings and their relative location are determined. These parameters minimize the directional light transmission of the smart window at a given date and time of day.

Keywords: numerical simulation, smart window, grating optical filter, solar radiation, directional light transmission.

REFERENCES

1. Berning P.H. Principles of design of architectural coatings. *Appl. Opt.* 1983. No. 22. Pp. 4127–4141.
2. Jia C., Wu Z., Wu X., Wang J., Gou J., Huang Z., Zhou H., Yao W., Jiang Y. Al-doped VO₂ films as smart window coatings: Reduced phase transition temperature and improved thermochromic performance. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018. No. 176. Pp. 174–180.
3. Gladen A.C., Davidson J.H., Mantell S.C. The effect of a thermotropic material on the optical efficiency and stagnation temperature of a polymer flat plate solar collector. *ASME J. Sol. Energy Eng.* 2014. No. 137 (2). 021003.
4. Hocevar M., Krasovec U.O. A photochromic single glass pane. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018. No. 186. Pp. 111–114.
5. Chang-Jian C.-W., Cho E.-C., Yen S.-C., Ho B.-C., Lee K.-C., Huang J.-H., Hsiao Y.-S. Facile preparation of WO₃/PEDOT:PSS composite for inkjet printed electrochromic window and its performance for heat shielding. *Dyes and Pigments.* 2018. No. 148. Pp. 465–473.
6. Casini M. Smart buildings: Advanced materials and nanotechnology to improve energy-efficiency and environmental performance. Woodhead Publishing, 2016.
7. Desideri U., Asdrubali F. Handbook of Energy Efficiency in Buildings. First ed. Butterworth-Heinemann, 2018.
8. Fernandes L.L., Lee E.S., McNeil A., Jonsson J.C., Nouiduit, Pang X., Hoffmann S. Angular selective window systems: Assessment of technical potential for energy savings. *Energy and Buildings.* 2015. No. 90. Pp. 188–206.
9. Luecke G.R., Slaughter J. Design, development, and testing of an automated window shade controller. *ASME J. Sol. Energy Eng.* 1995. No. 117 (4). Pp. 326–332.
10. Mohanchandra K.P., Karnani S., Emmons M.C., Richards W.L., Carman G.P. Thin film NiTi coatings on optical fiber Bragg sensors. *Appl. Phys. Lett.* 2008. No. 93. 031914.
11. Villar I.D., Matias I.R., Arregui F.J. Deposition of coatings on long-period fiber gratings: tunnel effect analogy. *Opt. Quant. Electron.* 2006. No. 38. Pp. 655–665.
12. Zakirullin R.S. Selektivnoe regulirovanie napravlennoy svetopropuskaniya po uglam padeniya luchey [Selective Beam Incidence Angle Control over Directional Light Transmission]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]*. 2012. Vol. 57 (10). Pp. 1456–1458. (in Russian)
13. Zakirullin R.S. Opticheskiy fil'tr s uglovoy selektivnost'yu svetopropuskaniya [An optical filter with angular selectivity of the transmittance]. *Opticheskiy zhurnal [Journal of Optical Technology]*. 2013. Vol. 80 (8). Pp. 480–485. (in Russian)
14. Zakirullin R.S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation. *J. Opt. Soc. Am. A.* 2018. Vol. 35. Pp. 1592–1598.
15. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Optimizirovannaya uglovaya selektivnaya fil'tratsiya pryamogo solnechnogo izlucheniya [Optimized angular selective filtering direct solar radiation]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]*. 2018. No. 10. Pp. 91–97. (in Russian)
16. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Smart-okno s reshetochnym opticheskim fil'trom dlya dinamicheskogo kontrolya dnevnogo osveshcheniya [Smart window with grating optical filter for dynamic control of daylighting]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]*. 2019. No. 12. Pp. 96–107. (in Russian)