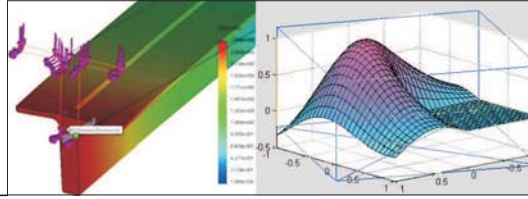


## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 628.926

Р.С. ЗАКИРУЛЛИН, И.А. ОДЕНБАХ

### ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ СМАРТ-ОКОН С УГЛОВОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Современные смарт-окна позволяют достичь комфортных условий естественного освещения, инсоляции и солнцезащиты в помещениях, обеспечивая выполнение требований СанПиН 2.1.2.2645–10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях». Представлено смарт-окно с функцией оптимизированной угловой селективной фильтрации солнечного излучения путем минимизации светопропускания окна в заданную дату и время суток с учетом азимута ориентации окна, географической широты, сезонного и суточного распределения интенсивности солнечной радиации. Угловую селективность светопропускания смарт-окна обеспечивает оптический фильтр с двумя тонкопленочными поверхностями решетками с чередующимися пропускающими и пропускающими параллельными полосами, за счет которых происходит адаптированное к сложной траектории движения солнца регулирование светопропускания окна без применения жалюзи и прочих устройств. Приведен метод расчета теоретической и действительной характеристики светопропускания смарт-окна при разных геометрических параметрах решеток оптического фильтра.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** солнечная радиация, смарт-окно, оптический фильтр, тонкопленочная поверхностная решетка, угловая селективная фильтрация.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-724-4-106-113

Инновации в современной архитектуре и строительстве тесно связаны с понятием «умный дом». Неотъемлемым элементом такого дома является смарт-окно [1–3], которое при изменении температуры окружающей среды, интенсивности солнечной радиации в том или ином спектральном диапазоне или при приложении слабого постоянного тока изменяет коэффициент светопропускания во всем оптическом диапазоне или в определенных спектральных диапазонах. В смарт-окнах применяются низкоэмиссионные [4], термхромные [5], термотропные [6], фотохромные [7] и электрохромные [8] смарт-стекла.

Современные смарт-окна с саморегулированием светопропускающих характеристик в зависимости от изменения внешних условий тем не менее не могут регулировать светопропускание в зависимости от угла падения солнечных лучей, т.е. от положения солнца по отношению к окну в данный момент

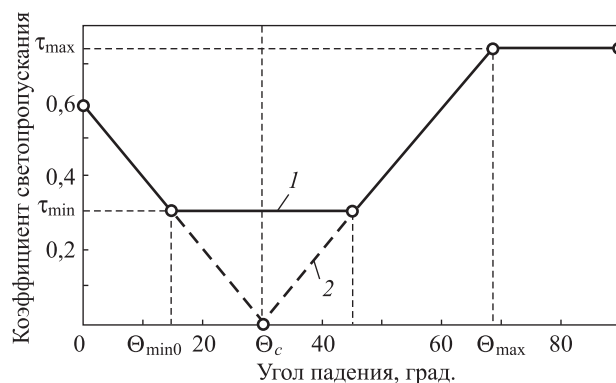
© Закируллин Р.С., Оденбах И.А., 2019

времени. Для этих целей используются жалюзи и другие устройства с ручным или автоматическим управлением [9, 10].

Для углового селективного регулирования направленного светопропускания окна без применения жалюзи и т. п. предложен решеточный оптический фильтр [11, 12]. Две тонкопленочные поверхностные решетки фильтра, состоящие из направленно пропускающих параллельных полос, чередующихся с отражающими, поглощающими или рассеивающими полосами, обеспечивают регулирование светопропускания окна, адаптированное к сложной траектории движения солнца относительно него.

Метод расчета оптимального угла наклона решеток фильтра с учетом азимута ориентации окна и географической широты здания приведен в [13]. Метод расчета оптимальных значений ширин полос обеих решеток и их сдвига друг относительно друга для минимизации светопропускания окна для заданной даты и времени суток с учетом сезонного и суточного распределения интенсивности солнечной радиации продемонстрирован в [14]. Данная статья посвящена разработке метода расчета теоретической и реальной (требуемой) угловой характеристики светопропускания фильтра для обеспечения минимального коэффициента светопропускания в течение заданного момента времени или временного интервала в зависимости от распределения значений ширин полос обеих решеток фильтра.

Теоретическая угловая характеристика светопропускания фильтра рассчитывается по графоаналитическому методу [11, 12], когда источник света перемещается в плоскости, перпендикулярной полосам решетки фильтра и угол падения  $\Theta$  изменяется в той же плоскости. Характеристика состоит из чередующихся участков с убывающим, минимальным, возрастающим и максимальным светопропусканием (линия 1 на рисунке), если минимум светопропускания фильтра осуществляется в некотором интервале времени (угловом диапазоне). Линия 2 показывает случай, когда минимум светопропускания достигается в определенный момент времени, т.е. при определенном угле падения (в этом случае светопропускание фильтра равно нулю). Угловая характеристика фильтра симметрична относительно характеристического угла фильтра  $\Theta_c$ , показывающего сдвиг входных и выходных решеток друг относительно друга.



Угловые характеристики фильтра с минимальным коэффициентом светопропускания

1 – в интервале углов падения; 2 – при одном угле падения

Если необходимо, чтобы коэффициент светопропускания окна был минимальным в течение некоторого интервала времени светового дня, то задается время  $t_{\min 0}$ , когда должен начаться этот интервал. Для этого времени по формулам, приведенным в [14] для одинарного и двойного остекления окна, рассчитываются координаты  $x$  и  $y$  следов точки падения солнечного луча на входную поверхность фильтра, оставляемых на его выходной поверхности. Для тройного остекления расчетные формулы такие же, как для двойного, так как для решеток фильтра в этом случае используются внутренние поверхности одной из камер.

Далее, для заданного времени  $t_{\min 0}$  определяется проекция  $\Theta_{\min 0}$  (см. рисунок) угла падения на плоскость, перпендикулярную к полосам решеток фильтра. Эта проекция учитывает угол наклона  $\gamma$  решеток фильтра, рассчитываемый по методу, приведенному в [13]. Проекции углов падения на указанную плоскость определяются по формуле

$$\Theta = \arctg(\{\sqrt{x^2 + y^2} \cos[\gamma - \arctg(x/y)]\} / s), \quad (1)$$

где  $s$  – расстояние между решетками фильтра, мм.

Максимальное реальное (требуемое) значение коэффициента светопропускания окна  $\tau_{r\max}$  задается в пределах:  $0,30 \leq \tau_{r\max} \leq 0,88$  (для одинарного остекления),  $0,30 \leq \tau_{r\max} \leq 0,80$  (для двойного остекления) и  $0,30 \leq \tau_{r\max} \leq 0,72$  (для тройного остекления). Верхние предельные значения приведены для нормального падения солнечных лучей. Задается также время  $t_{\max}$ , когда коэффициент светопропускания должен быть максимальным. Для этого времени рассчитываются координаты  $x$  и  $y$  и по формуле (1) определяется проекция  $\Theta_{\max}$  (см. рисунок) угла падения на плоскость, перпендикулярную к полосам решеток фильтра.

Теоретический коэффициент светопропускания с учетом отражения по уравнениям Френеля и поглощения по закону Бугера–Ламберта для одинарного остекления рассчитывается как

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

где  $\tau_r$  – реальный коэффициент светопропускания;

$\alpha_a$  – натуральный показатель поглощения оконного стекла,  $\text{мм}^{-1}$ ;

$n$  – показатель преломления стекла;

$s$  – толщина стекла, мм.

Для двойного остекления

$$\tau = \tau_r / \left[ \left( 1 - 0,5 \left\{ \frac{\sin^2[\Theta - \arcsin(\sin \Theta / n)]}{\sin^2[\Theta + \arcsin(\sin \Theta / n)]} + \frac{\operatorname{tg}^2[\Theta - \arcsin(\sin \Theta / n)]}{\operatorname{tg}^2[\Theta + \arcsin(\sin \Theta / n)]} \right\} \right)^4 \times \exp \left( -\alpha_a (s_1 + s_2) \sqrt{\frac{1 + \sin^2 \Theta}{n^2 - \sin^2 \Theta}} \right) \right], \quad (3)$$

где  $s_1$  и  $s_2$  – толщины слоев остекления, мм.

Для тройного остекления

$$\tau = \tau_r / \left[ \left( 1 - 0,5 \left\{ \frac{\sin^2[\Theta - \arcsin(\sin\Theta/n)]}{\sin^2[\Theta + \arcsin(\sin\Theta/n)]} + \frac{\operatorname{tg}^2[\Theta - \arcsin(\sin\Theta/n)]}{\operatorname{tg}^2[\Theta + \arcsin(\sin\Theta/n)]} \right\} \right)^6 \times \exp \left( -\alpha_a (s_3 + s_4 + s_5) \sqrt{\frac{1 + \sin^2\Theta}{n^2 - \sin^2\Theta}} \right) \right], \quad (4)$$

где  $s_3$ ,  $s_4$  и  $s_5$  – толщины слоев остекления, мм.

Минимальный и максимальный теоретические коэффициенты светопропускания  $\tau_{\min}$  и  $\tau_{\max}$  определяются по формулам (2)–(4) при подстановке соответствующих значений  $\Theta_{\min 0}$  и  $\Theta_{\max}$ ,  $\tau_{r\min}$  и  $\tau_{r\max}$ . При построении линий 1 и 2 на рисунке учитывается, что характеристика светопропускания симметрична относительно характеристического угла фильтра.

Для аналитического расчета коэффициента светопропускания при разных углах падения необходимо определить сдвиг  $\Delta$  между следами входной решетки на плоскости выходной решетки при характеристическом угле фильтра и произвольном угле падения

$$\Delta = \sqrt{x_{\min}^2 + y_{\min}^2} \cos \left( \gamma - \operatorname{arctg} \frac{x_{\min}}{|y_{\min}|} \right) - \sqrt{x^2 + y^2} \cos \left( \gamma - \operatorname{arctg} \frac{x}{|y|} \right). \quad (5)$$

В зависимости от распределения значений ширин полос обеих решеток при известном значении этого сдвига можно выделить разные диапазоны углов падения. В таблице показаны расчетные формулы и разновидности временных (соответствующих углам падения солнечных лучей в течение светового дня) характеристик коэффициента светопропускания в различных диапазонах для разных ширин пропускающих полос  $c_1$  и  $c_2$  входной и выходной решеток и непр пропускающих полос  $c_2$  и  $c_4$  входной и выходной решеток.

**Границы диапазонов, расчетные формулы и характеристики светопропускания в зависимости от соотношений ширин полос**

Соотношение ширин полос	Границы диапазона	Расчетная формула	Характеристика светопропускания
1	2	3	4
$c_2 < c_4; c_2 < c_3$	$-0,5c_1 - 0,5c_2 \leq \Delta < -0,5c_2 - 0,5c_3$ $-0,5c_2 - 0,5c_3 \leq \Delta \leq -0,5c_1 + 0,5c_4$ $-0,5c_1 + 0,5c_4 < \Delta < 0,5c_1 - 0,5c_4$ $0,5c_1 - 0,5c_4 \leq \Delta \leq 0,5c_2 + 0,5c_3$ $0,5c_2 + 0,5c_3 < \Delta \leq 0,5c_1 + 0,5c_2$	$\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3 - c_2}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$	

Продолжение таблицы

1	2	3	4
$c_2 < c_4; c_2 = c_3$	$-0,5c_1 - 0,5c_2 \leq \Delta < -0,5c_2 - 0,5c_3$ $-0,5c_2 - 0,5c_3 \leq \Delta \leq 0$ $0 < \Delta \leq 0,5c_2 + 0,5c_3$ $0,5c_2 + 0,5c_3 < \Delta \leq 0,5c_1 + 0,5c_2$	$\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$	
$c_2 < c_4; c_2 > c_3$	$-0,5c_1 - 0,5c_2 \leq \Delta < -0,5c_2 - 0,5c_3$ $-0,5c_2 - 0,5c_3 \leq \Delta \leq 0,5c_1 - 0,5c_4$ $0,5c_1 - 0,5c_4 < \Delta < -0,5c_1 + 0,5c_4$ $-0,5c_1 + 0,5c_4 \leq \Delta \leq 0,5c_2 + 0,5c_3$ $0,5c_2 + 0,5c_3 < \Delta \leq 0,5c_1 + 0,5c_2$	$\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = 0$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3}{c_1 + c_2}$	
$c_2 = c_4; c_2 = c_3$	$-0,5c_1 - 0,5c_2 \leq \Delta \leq 0$ $0 < \Delta \leq 0,5c_1 + 0,5c_2$	$\tau = \frac{ \Delta }{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta }{c_1 + c_2}$	
$c_2 > c_4; c_2 < c_3$	$-0,5c_1 - 0,5c_2 \leq \Delta < -0,5c_1 - 0,5c_4$ $-0,5c_1 - 0,5c_4 \leq \Delta \leq -0,5c_1 + 0,5c_4$ $-0,5c_1 + 0,5c_4 < \Delta < 0,5c_1 - 0,5c_4$ $0,5c_1 - 0,5c_4 \leq \Delta \leq 0,5c_1 + 0,5c_4$ $0,5c_1 + 0,5c_4 < \Delta \leq 0,5c_1 + 0,5c_2$	$\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_3 - c_2}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$	
$c_2 > c_4; c_2 = c_3$	$-0,5c_1 - 0,5c_2 \leq \Delta < -0,5c_1 - 0,5c_4$ $-0,5c_1 - 0,5c_4 \leq \Delta \leq 0$ $0 < \Delta < 0,5c_1 + 0,5c_4$ $0,5c_1 - 0,5c_4 \leq \Delta \leq 0,5c_1 + 0,5c_4$	$\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$	

Окончание таблицы

1	2	3	4
$c_2 > c_4; c_2 > c_3$	$-0,5c_1 - 0,5c_2 \leq \Delta < -0,5c_1 - 0,5c_4$ $-0,5c_1 - 0,5c_4 \leq \Delta \leq 0,5c_1 - 0,5c_4$ $0,5c_1 - 0,5c_4 < \Delta < -0,5c_1 + 0,5c_4$ $-0,5c_1 + 0,5c_4 \leq \Delta \leq 0,5c_1 + 0,5c_4$ $0,5c_1 + 0,5c_4 < \Delta \leq 0,5c_1 + 0,5c_2$	$\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = 0$ $\tau = \frac{ \Delta  - 0,5c_2 + 0,5c_3}{c_1 + c_2}$ $\tau = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$	

Теоретическая характеристика  $\tau = f(t)$  (зависимость коэффициента светопропускания от времени дня) строится по соответствующим расчетным участкам. Теоретическая характеристика корректируется с учетом отражения и поглощения и строится зависимость реального (требуемого) значения коэффициента светопропускания окна от времени дня  $\tau_r = f(t)$ . Для этого из приведенных выше формул (2)–(4) выражается  $\tau_r$ , вместо  $\Theta$  подставляются рассчитанные по формуле (1) проекции углов падения на плоскость, перпендикулярную к полосам решеток фильтра, соответствующие времени  $t$ .

Разработанный метод расчета теоретической и реальной (требуемой) угловой характеристики светопропускания фильтра позволяет минимизировать значение коэффициента светопропускания в заданный момент времени или в течение заданного временного интервала в зависимости от распределения значений ширин полос обеих решеток фильтра. Смарт-окна с решеточными фильтрами, обеспечивающими регулирование светопропускания окна, адаптированное к сложной траектории движения солнца относительно него без применения жалюзи и подобных устройств, имеют большие перспективы для применения в архитектуре и строительстве.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2017. No. 159. P. 26–51.
2. Casini M. Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance. Woodhead Publishing, 2016.
3. Granqvist C.G. Materials science for solar energy conversion systems. Vol. 1, first ed. Pergamon, 1991.
4. Baloukas B., Loquai S., Martinu L. VO<sub>2</sub>-based thermally active low emissivity coatings // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2018. No. 183. P. 25–33.
5. Wang N., Goh Q.S., Lee P.L., Magdassi S., Long Y. One-step hydrothermal synthesis of rare earth/W-codoped VO<sub>2</sub> nanoparticles: Reduced phase transition temperature and improved thermochromic properties // J. Alloys Compd. 2017. No. 711. P. 222–228.
6. 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. P. 021003.

7. Dürr H., Bouas-Laurent H. Photochromism: Molecules and Systems. First ed. Amsterdam, Elsevier Science, 2003.
8. Granqvist C.G. Handbook of Inorganic Electrochromic Materials. First ed. Elsevier Science, 1995.
9. Rumbarger J., Vitullo R.J. Architectural Graphic Standards for Residential Construction. John Wiley and Sons, 2003.
10. 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.
11. Zakirullin R.S. Creating optical filters with angular-selective light transmission // *Appl. Opt.* 2015. No. 54. P. 6416–6419.
12. Zakirullin R.S., Letuta S.N. A smart window for angular selective filtering solar radiation // *Solar Energy*. 2015. No. 120. P. 585–592.
13. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Оптимизированная угловая селективная фильтрация прямого солнечного излучения // *Изв. вузов. Строительство*. 2018. № 10. С. 91–97.
14. Закируллин Р.С., Оденбах И.А. Оптимизация геометрических параметров решетчатого оптического фильтра для смарт-окна // *Изв. вузов. Строительство*. 2019. № 1. С. 94–100.

**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 25.03.19

**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

## **LIGHT TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF SMART WINDOWS WITH ANGULAR SELECTIVE FILTERING OF SOLAR RADIATION**

Modern smart windows achieve comfortable conditions of daylighting, insolation and sun protection in the premises, ensuring that SanPiN 2.1.2.2645–10 “Sanitary-epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises” are met. A smart window with the function of optimized angular selective filtering of solar radiation by minimizing the transmittance of the window at a given date and time of day, taking into account the azimuth of the window orientation, geographical latitude, seasonal and daily distribution of the intensity of solar radiation, is presented. The angular selectivity of the smart window’s light transmission is provided by an optical filter with two thin-film surface gratings with alternating transmissive and non-transmissive parallel strips, due to which the light transmission of the window is adapted to the complex trajectory of the sun, without the use of blinds and the like. A method for calculating the theoretical and actual characteristics of the light transmittance of a smart window for various geometric parameters of the optical filter gratings is given.

**Key words:** solar radiation, smart window, optical filter, thin-film surface gratings, angular selective filtering.

REFERENCES

1. Rezaei S.D., Shannigrahi S., Ramakrishna S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2017. No. 159. Pp. 26–51.
2. Casini M. *Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance*. Woodhead Publishing, 2016.
3. Granqvist C.G. *Materials science for solar energy conversion systems*. Vol. 1, first ed. Pergamon, 1991.
4. Baloukas B., Loquai S., Martinu L. VO<sub>2</sub>-based thermally active low emissivity coatings. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2018. No. 183. Pp. 25–33.
5. Wang N., Goh Q.S., Lee P.L., Magdassi S., Long Y. One-step hydrothermal synthesis of rare earth/W-codoped VO<sub>2</sub> nanoparticles: Reduced phase transition temperature and improved thermochromic properties. *J. Alloys Compd.* 2017. No. 711. Pp. 222–228.
6. 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. P. 021003.
7. Dürr H., Bouas-Laurent H. *Photochromism: Molecules and Systems*. First ed. Amsterdam, Elsevier Science, 2003.
8. Granqvist C.G. *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*. First ed. Elsevier Science, 1995.
9. Rumbarger J., Vitullo R.J. *Architectural Graphic Standards for Residential Construction*. John Wiley and Sons, 2003.
10. Fernandes L.L., Lee E.S., McNeil A., Jonsson J.C., Noudui T., Pang X., Hoffmann S. Angular selective window systems: Assessment of technical potential for energy savings. *Energy and Buildings*. 2015. No. 90. Pp. 188–206.
11. Zakirullin R.S. Creating optical filters with angular-selective light transmission. *Appl. Opt.* 2015. No. 54. Pp. 6416–6419.
12. Zakirullin R.S., Letuta S.N. A smart window for angular selective filtering solar radiation. *Solar Energy*. 2015. No. 120. Pp. 585–592.
13. 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)
14. Zakirullin R.S., Odenbakh I.A. Optimizatsiya geometricheskikh parametrov reshetchnogo opticheskogo fil'tra dlya smart-okna [Optimization of geometrical parameters of the grating optical filter for a smart window]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2019. No. 1. Pp. 94–100. (in Russian)