

Оптимизация естественного освещения и инсоляции зданий с криволинейными фасадами

И.А.Оденбах, ОГУ, Оренбург

Р.С.Закируллин, ОГУ, Оренбург

В статье описаны конструкция и принцип работы смарт-окна с решёточным оптическим фильтром, имеющим угловую селективность светопропускания за счёт чередующихся пропускающих и хромогенных параллельных тонкоплёночных полос на поверхностях камеры окна с двойным остеклением. В отличие от обычных смарт-окон, вся площадь которых покрыта термочромными, термотропными, фотохромными, электрохромными, газохромными и т.п. слоями, решёточный фильтр в активном (окрашенном) состоянии хромогенного материала ослабляет или полностью блокирует прямое солнечное излучение, пропуская рассеянный свет неба и отражённый свет, то есть улучшает качество освещения. Полосы решётки фильтра можно располагать под любым углом наклона, адаптируя их к траектории движения солнца относительно окна с учётом его азимута, что выгодно отличает фильтр от горизонтальных или вертикальных жалюзи. Приведены методы расчёта угла наклона решёток, относительного их расположения на поверхностях окна и ширины пропускающих и хромогенных полос обеих решёток. Рассчитаны оптимальные углы наклона решёток фильтров для окон с разными азимутами здания с круглым фасадом и временные характеристики светопропускания этих окон. Результаты обосновывают целесообразность применения смарт-окон с решёточными фильтрами в зданиях с криволинейными фасадами для повышения комфортности естественного освещения и инсоляции, защиты от прямых лучей при пропускании рассеянного света неба и альбедо за счёт адаптации светопропускания окон к изменению положению солнца относительно них.

Ключевые слова: естественное освещение, инсоляция, оптимизация, криволинейный фасад, смарт-окно, хромогенные материалы, характеристика светопропускания.

Optimization of Natural Lighting and Insolation in Buildings with Curved Facades

I.A.Odenbah, OSU, Orenburg

R.S.Zakirullin, OSU, Orenburg

The design and principle of operation of smart window with a grating optical filter having an angular selectivity of light transmission due to alternating transmissive and chromogenic parallel thin-film strips on the surfaces of the chamber of a double-glazed window are described. Unlike conventional smart windows, the entire area of which is covered with thermochromic, thermotropic, photochromic, electrochromic, gasochromic, etc. thin films, a grating filter in the active (colored) state of a

chromogenic material weakens or completely blocks direct solar radiation by allowing diffused sky light and reflected light to pass through, that is, it improves the quality of illumination. The strips of the filter gratings can be positioned at any slope angle, adapting them to the trajectory of the sun relative to the window, taking into account its azimuth, which favorably distinguishes the filter from horizontal or vertical blinds. Methods for calculating the slope angle of the gratings, their relative position on the surfaces of the window and the widths of the transmissive and chromogenic strips of both gratings are presented. The optimal slope angles of the filter gratings for windows with different azimuths of a building with round facade and the temporal characteristics of the light transmission of these windows are calculated. The results substantiate the advisability of using smart windows with grating filters in buildings with curved facades to improve the comfort of daylighting and insolation, to protect against direct rays when passing diffuse sky light and albedo by adapting the light transmission of windows to a change in the position of the sun relative to them.

Keywords: daylighting, insolation, optimization, curved facade, smart window, chromogenic materials, light transmission characteristic.

В современной архитектуре существует устойчивая тенденция к применению зданий с криволинейными фасадами (так называемых радиусных зданий) и постепенному отказу от использования традиционных, в основном, прямоугольных форм фасадов. Криволинейные формы зданий имеют футуристический и более привлекательный вид (рис. 1), поскольку в природе человека окружают отнюдь не прямоугольные объекты.

Для обеспечения комфортного естественного освещения и инсоляции в зданиях с криволинейными фасадами необходимо учитывать, что азимуты окон в зависимости от радиуса кривизны фасада непрерывно изменяются. Это, в свою очередь, приводит к разным траекториям движения солнца относительно окон, в отличие от прямоугольных зданий, у которых все окна одного и того же фасада имеют одинаковый азимут ориентации и относительно всех этих окон наблюдается одна и та же траектория движения солнца. Оптимизация естественного освещения и инсоляции в районах с интенсивной солнечной радиацией является важной и актуальной задачей, решаемой с помощью комплекса солнцезащитных мер, призванных уменьшать возникновение бликов и излишне ярко освещённых поверхностей внутри помещения. При этом с архитектурно-

художественной точки зрения размеры окон криволинейного фасада здания желательно сохранять одинаковыми (рис. 1). Подход, используемый для прямоугольного здания – с применением окон с максимальной площадью для северного сектора, минимальной – для южного, и средней – для восточного и западного секторов – для таких зданий неприемлем.

При одинаковых размерах окон с разными азимутами задача регулирования их светопропускания в зависимости от траектории движения солнца решается с помощью жалюзи и других устройств перераспределения световых потоков. Более совершенными и многофункциональными системами являются смарт-окна различного типа, бурно развивающиеся с начала XXI века [1]. В настоящее время широко используются энергоэффективные окна с низкоэмиссионными покрытиями [2; 3], отражающими инфракрасное излучение. Перспективны смарт-окна на основе хромогенных материалов, меняющие отражающие, пропускающие, поглощающие и рассеивающие свойства под воздействием изменения параметров окружающей среды – температуры (термохромные [4] и термотропные [5] окна) и интенсивности ультрафиолетового и коротковолнового видимого диапазонов спектра солнечного излучения (фотохромные [6] окна). Оптические свойства электрохромных [7] окон меняются при пропускании слабого постоянного тока через тонкослойные покрытия. Светопропускающие свойства газохромных окон [8] меняются при попеременном воздействии кислорода и водорода, закачиваемых в оконную камеру.



а)



б)

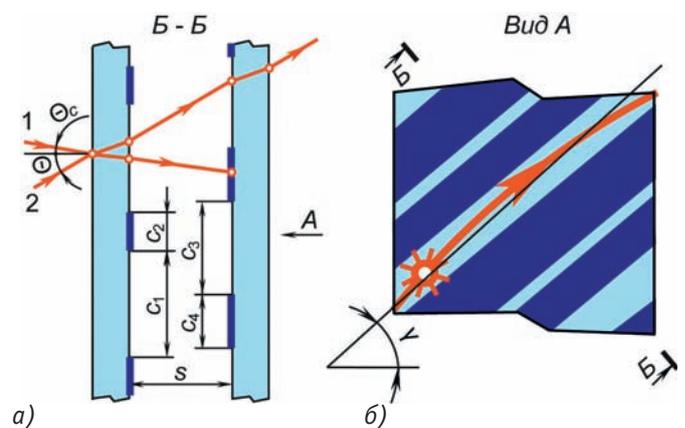
Рис. 1. Здания с криволинейными фасадами. Хельсинки, Финляндия. Фото Р.С. Закируллина. 2021 год: а) торговое здание; б) жилое здание

Хромогенные смарт-окна в активном (так называемом «окрашенном») состоянии ослабляют или полностью блокируют не только прямое солнечное излучение, но и рассеянный свет неба и отражённый свет (альbedo), так как хромогенный слой покрывает всю площадь окна. Поскольку дискомфорт в помещении вызывают прямые лучи, а проходящие через окно рассеянные и отражённые (в конечном счёте также рассеиваемые) лучи, напротив, улучшают качество освещения, то целесообразно было бы их пропускание. Кроме того, функционирование таких окон не приспособлено к изменению положения солнца на небе и изменению углов падения прямых солнечных лучей на окно. Этих недостатков лишено смарт-окно нового типа, основанное на применении решётчатого оптического фильтра с угловой селективностью светопропускания [9–11] и запатентованного авторами способа регулирования светопропускания¹. В статье кратко описаны конструкция и принцип работы смарт-окна и приведены методы расчёта параметров фильтра для него [9–11]. Целью статьи является расчёт оптимальных параметров фильтров для окон с разными азимутами и временных характеристик светопропускания таких окон для обоснования целесообразности применения смарт-окон с решётчатыми фильтрами в зданиях с криволинейными фасадами.

Фильтр для смарт-окна (рис. 2) состоит из двух тонкоплёночных поверхностных решёток, образованных параллельными хромогенными полосами ширинами c_2 и c_4 , между которыми расположены светопропускающие полосы ширинами c_1 и c_3 . В отличие от горизонтальных или вертикальных жалюзи, полосы фильтра можно адаптировать к траектории движения солнца

¹Пат. 2509324 Российская Федерация, МПК G 02 В 5/20, Е 06 В 9/24, G 02 В 1/10. Способ регулирования направленного светопропускания [Текст] / Закируллин Р.С.; заявитель и патентообладатель Закируллин Р.С. – № 2012130148/28; заявл. 11.05.10; опубл. 10.03.14, Бюл. № 7. – 3 с.

Пат. 2677069 Российская Федерация, МПК Е 06 В 9/24. Способ углового регулирования направленного светопропускания окна [Текст] / Закируллин Р.С.; заявитель и патентообладатель Закируллин Р.С. – № 2017144699; заявл. 07.12.17; опубл. 15.01.19, Бюл. № 2. – 2 с.



а)

б)

Рис. 2. Разрез (а) и вид (б) смарт-окна с двойным остеклением и решётчатым фильтром

относительно окна с учётом его азимута благодаря возможности выбора любого наклона полос на поверхности окна. На рисунке 2 полосы обеих решёток расположены под углом γ , определяемым аппроксимацией траектории солнца для заданной географической широты здания. При расстоянии s между решётками положение (сдвиг) решёток друг относительно друга определяется характеристическим углом Θ_c фильтра для луча, проходящего через центры полос обеих решёток. Показан также произвольный угол Θ падения солнечного луча на окно.

Оптимальный угол наклона решёток фильтра определяется по специальному алгоритму [9], включающему выбор расчётной даты с учётом местного климата (например, середина самого жаркого периода года или день максимальной солнечной радиации), определение времени максимальной солнечной радиации для выбранной даты, вычисление высоты и азимута солнца для выбранной даты через определённые промежутки времени, вычисление угла падения солнечных лучей на окно, вычисление координат следа траектории движения солнца на плоскости окна, построение следа траектории движения солнца и получение оптимального угла наклона решёток фильтра линейной аппроксимацией криволинейной траектории движения солнца.

Угловая селективность светопропускания фильтра обусловлена тем, что часть лучей, прошедших через пропускающую полосу входной решётки, попадает на хромогенную полосу выходной решётки как луч 1, а остальная часть проходит через пропускающую полосу выходной решётки как луч 2. Хромогенные полосы обеих решёток в активном (окрашенном) состоянии частично также пропускают свет (на рисунке 1 не показано). Когда хромогенные полосы фильтра активированы, окно пропускает прямой свет в заранее заданном количестве в заданных угловых диапазонах падения солнечных лучей или полностью блокирует прямой свет. Однако окно при этом пропускает рассеянный свет неба и свет, отражённый от поверхности земли (подобно лучу 2 на рис. 1) и от противоположных зданий. Это позволяет, в отличие от обычных смарт-окон, использовать рассеянный дневной свет для достижения комфортных условий освещения без бликов и чрезмерно ярких внутренних поверхностей. Когда хромогенные полосы неактивны (при низкой температуре или интенсивности солнечного излучения, при выключении электрического напряжения), светопропускание смарт-окна с фильтром немного ниже, чем светопропускание обычных смарт-окон из-за меньшей общей площади хромогенного покрытия.

Расчёт оптимальных параметров фильтров для окон с разными азимутами и их временных характеристик светопропускания проводится по методике, полученной после незначительных преобразований расчётных уравнений, приведённых в [9–11]. Реальный угол падения Θ солнечных лучей на вертикальное окно в произвольный момент времени рассчитывается по формуле:

$$\Theta = \arccos(\cosh \cdot \cos \alpha), \tag{1}$$

где h – высота стояния солнца, градус; α – разность между азимутами солнца и окна в данный момент времени, градус.

Проекция θ реального угла падения Θ солнечных лучей на плоскость, перпендикулярную полосам решёток, для окна с двойным остеклением рассчитывается как:

$$\theta = \arctan(\tan \Theta \cos \gamma). \tag{2}$$

По этой же формуле рассчитывается и характеристический угол фильтра, при этом берутся значения высоты стояния и разности азимутов для момента времени с требуемым минимальным светопропусканием окна. Ширины полос решёток рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} c_3 &= 2s \tan \Theta_c - 2s \tan \Theta_{av}; \\ c_4 &= c_3 (1 - \tau_{\max}) / \tau_{\max}; \\ c_2 &= c_3 - \tau_{\min} (c_3 + c_4); \\ c_1 &= c_3 + c_4 - c_2, \end{aligned} \tag{3}$$

где Θ_{av} – заданный средний угол падения ($\Theta_{av} < \Theta_c$), при котором коэффициент пропускания фильтра должен иметь среднее значение $\tau_{av} = 0,5(\tau_{\min} + \tau_{\max})$; τ_{\min} и τ_{\max} – заданные минимальный и максимальный теоретические коэффициенты пропускания (без учёта отражения и поглощения).

Теоретическая временная характеристика светопропускания окна, состоящая из участков с постоянным максимальным и минимальным, а также переменным пропусканием, рассчитывается соответственно по формулам (для случая, когда хромогенные полосы обеих решёток сделаны из одного материала):

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{c_1 \tau_{chr} + c_2 \tau_{chr}^2 + c_3 (1 - \tau_{chr})}{c_1 + c_2}; \\ \tau_{\min} &= \frac{c_1 + c_2 \tau_{chr} - c_4 (1 - \tau_{chr})}{c_1 + c_2}; \\ \tau &= \frac{(|\Delta| - 0,5c_2 + 0,5c_3)(1 - 2\tau_{chr} + \tau_{chr}^2) + c_1 \tau_{chr} + c_2 \tau_{chr}^2 + c_3 (\tau_{chr} - \tau_{chr}^2)}{c_1 + c_2}, \end{aligned} \tag{4}$$

где τ_{chr} – коэффициент направленного пропускания (при нормальном падении) хромогенных полос входной и выходной решёток в их окрашенном состоянии; Δ – сдвиг между следами входных решёток на поверхности выходных решёток при характеристическом угле и произвольном угле падения, определяемый для окна с двойным остеклением как:

$$\Delta = s(\tan \Theta_c - \tan \theta). \tag{5}$$

Скорректированная временная характеристика коэффициента пропускания τ_{cor} рассчитывается с учётом отражения по уравнениям Френеля, а также поглощения по закону Бугера-Ламберта:

$$\tau_{cor} = \tau \left\{ 1 - 0,5 \left[\frac{\sin^2(\Theta - \Theta_n) + \tan^2(\Theta - \Theta_n)}{\sin^2(\Theta + \Theta_n) + \tan^2(\Theta + \Theta_n)} \right] \right\}^4 \exp \left(-\alpha_n s \sqrt{\frac{1 + \sin^2 \Theta}{n^2 - \sin^2 \Theta}} \right), \tag{6}$$

где τ – теоретический коэффициент пропускания, рассчитанный по формулам (4); Θ_n – угол преломления, соответ-

ствующий углу падения Θ ; α_a – натуральный коэффициент поглощения стекла, мм^{-1} ; s_Σ – общая толщина стёкол, мм; n – показатель преломления стекла.

На рисунке 3 приведена схема для расчёта оптимальных параметров фильтров для смарт-окон с азимутами 135° , 180° и 225° в здании с круглым фасадом. Показаны разности между азимутами солнца и трёх окон. Окон с двойным остеклением имеют одинаковые размеры, однако фильтры для них должны иметь разные характеристики, чтобы обеспечивать минимальное светопропускание при падении солнечных лучей в плоскостях, перпендикулярных окнам. Расчёт выполнен для условий города Оренбурга, Россия (широта $51^\circ 46'$, долгота $55^\circ 06'$, GMT+05:00) на 15 июня (дня максимальной солнечной радиации в Оренбурге) 2020 года. Оптимальные углы наклона решёток фильтра для азимутов окон 135° и 180° были определены в [10] и составляют 36° и 0° , соответственно. Поскольку траектории движения солнца симметричны относительно полудня с азимутом 180° , оптимальный угол наклона 36° , определённый для азимута 135° , также может быть взят для дальнейших расчётов для азимута 225° (рис. 3). Однако угол наклона будет со знаком «минус», так как в отличие от окна с юго-восточной ориентацией (см. рис. 1) окно с азимутом 225° находится в юго-западном секторе.

Характеристические углы для минимизации светопропускания окон с азимутами 135° , 180° и 225° в моменты времени, когда эти азимуты совпадают с азимутом солнца, определены по формуле (2). Ширина полос определена по формулам (3) при заданных минимальных и максимальных теоретических значениях светопропускания $\tau_{\min} = 0$ и $\tau_{\max} = 0,5$. Для удобства сравнения результатов численное моделирование проведено таким образом, чтобы ширина полос решёток для всех трёх типов окон оказалась одинаковой. Для этого были заданы соответствующие значения среднего угла падения. При расчёте получены следующие данные:

- для азимута 135° $\Theta_c = 49,3872^\circ$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм при $\Theta_{av} = 40,4872^\circ$;
- для азимута 180° $\Theta_c = 61,55^\circ$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм при $\Theta_{av} = 56,88485^\circ$;

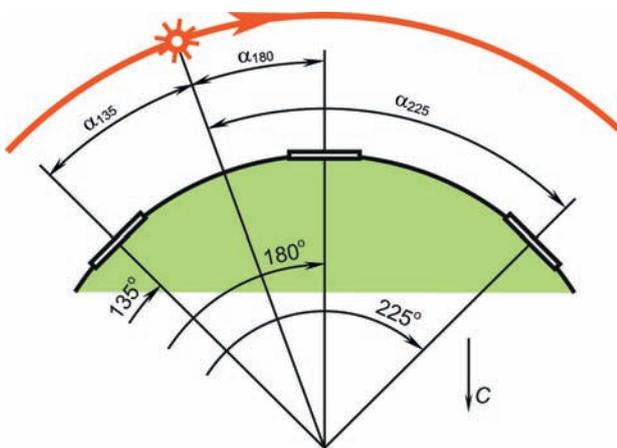


Рис. 3. Расчётная схема смарт-окон с разными азимутами для здания с круглым фасадом

– для азимута 225° $\Theta_c = 49,4084^\circ$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 10$ мм при $\Theta_{av} = 40,51605^\circ$.

Для расчёта теоретических временных характеристик смарт-окон определены высоты стояния и азимуты солнца (по онлайн-калькулятору на сайте <https://planetcalc.ru/320/>) через каждые полчаса светового дня 15 июня 2020 года с 6 ч. 30 мин. до 20 ч. 30 мин., а также для 11 ч. 36 мин., 13 ч. 20 мин. и 15 ч. 04 мин. (времена совпадения азимуты солнца и окон). По формулам (4) рассчитаны теоретические коэффициенты светопропускания для термохромного материала с лигандообменной системой, интегрированной в тонкую плёнку. Коэффициенты светопропускания и пропускания солнечной энергии данного материала в окрашенном состоянии одинаковы: $\tau_{chr} = 0,045$ [5]. Теоретические коэффициенты скорректированы по формуле (6) при $\alpha_a = 0,01$ мм^{-1} , $s_\Sigma = 8$ мм (толщина стёкол двойного остекления по 4 мм) и $n = 1,5$. По формуле (6) также рассчитаны коэффициенты пропускания обычного смарт-окна со сплошным покрытием всей площади слоем того же термохромного материала.

На рисунке 4 представлены теоретические (верхние линии) и скорректированные (средние линии) временные характеристики светопропускания смарт-окон с решёточными фильтрами и скорректированные (нижние линии) характеристики обычных смарт-окон при азимутах окон 135° (временной интервал с 6 ч. 30 мин. до 14 ч. 30 мин.), 180° (временной интервал с 10 ч. 00 мин. до 16 ч. 30 мин., выделен светло-оранжевым цветом) и 225° (временной интервал с 12 ч. 30 мин. до 20 ч. 30 мин.). Показаны моменты совпадения азимуты окон и солнца.

Теоретические и скорректированные характеристики светопропускания решёточных смарт-окон для всех трёх азимуты имеют минимумы при заданном времени совпадения азимуты этих окон с азимутом солнца. Таким образом, для любого азимута окна здания с криволинейным фасадом можно рассчитать оптимальный угол наклона решёток, характеристический угол фильтра, ширины полос решёток и подобрать хромогенный материал с необходимым коэффициентом светопропускания в его окрашенном состоянии, чтобы минимум пропускания окна достигался в заранее заданное время.

Решётки фильтра, являясь периодической структурой, обеспечивают минимум пропускания не только в задан-

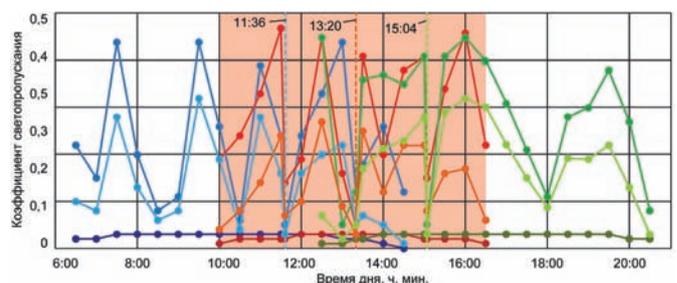


Рис. 4. Временные характеристики светопропускания смарт-окон с разными азимутами

ное время, но и в другие моменты времени (рис. 4). Во время минимумов пропускания, отличных от заданных, смарт-материалы с электрическим управлением (например, электрохромные) могут быть переключены в обесцвеченное состояние, а фотохромные, термохромные и т.п. материалы должны выбираться с учётом изменения соответствующих значений параметров окружающей среды для своевременного переключения фильтра из обесцвеченного состояния в окрашенное и обратно.

Скорректированный коэффициент светопропускания обычного смарт-окна, полностью покрытого хромогенным слоем, изменяется в течение светового дня незначительно (см. рис. 4). Сравнение скорректированных характеристик решётчатых и обычных смарт-окон показывает преимущество первых, заключающееся в возможности углового селективного регулирования светопропускания окна, адаптированного к непрерывному движению солнца. Кроме того, они создают более комфортную световую среду в помещении за счёт пропускания рассеянного света при блокировании прямого света.

Помимо функциональных качеств, из-за отсутствия жалюзи и других устройств улучшатся эргономические, экологические и эстетические свойства оконной конструкции. Общая стоимость производства, установки и эксплуатации смарт-окон с фильтрами будет сопоставима с обычными смарт-окнами. Окна с фильтрами позволят проектировать здания с одинаковыми размерами и формой всех окон криволинейного фасада без ущерба для внешнего вида здания, одновременно обеспечивая различные характеристики светопропускания, оптимальные для разных азимутов окон.

Литература

1. Табунщиков, Ю.А. Окно как интеллектуальный элемент конструкции здания / Ю.А. Табунщиков // Энергосбережение. – 2008. – № 2. – С. 16–21.
2. Yan, X. The Properties of an Aluminum/UV-Curable, Infrared, Low-Emissivity Coating Modified by Nano-Silica Slurry / X. Yan, Y. Chang, X. Qian // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10. – 382.
3. Chang, S.-C. Post-annealed Aluminum-Doped Zinc Oxide/Tin-Doped Indium Oxide Bilayer Films for Low Emissivity Glass / S.-C. Chang, H.-T. Chan // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2020. – Vol. 15. – P. 3694–3703.
4. Kumar, M. Structural phase control and thermochromic modulation of VO₂ thin films by post thermal annealing / M. Kumar, S. Rani, J.P. Singh, K.H. Chae, Y. Kim, J. Park, H.H. Lee // *Appl. Surf. Sci.* – 2020. – Vol. 529. – 147093.
5. Seeboth, A. Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control / A. Seeboth, R. Ruhmann, O. Mühling // *Materials*. – 2010. – Vol. 3. – P. 5143–5168.
6. Liu, H. A dual-emitting inorganic-organic hybrid material with emission intensity enhanced via electron-transfer photochromism / H. Liu, Z.-X. Xie, J. Lu, Y.-F. Han,

Y.-Q. Wei, G.-C. Guo // *Dyes and Pigments*. – 2020. – Vol. 181. – 108441.

7. Nguyen, T.D. Electrochromic smart glass coating on functional nano-frameworks for effective building energy conservation / T.D. Nguyen, L.P. Yeo, A.J. Ong, W. Zhiwei, D. Mandler, S. Magdassi, A.I.Y. Tok // *Mater. Today Energy*. – 2020. – Vol. 18. – 100496.

8. Qi, W. Flexible gasochromic films with favorable high temperature resistance and energy efficiency / W. Qi, G. Gao, G. Wu, H. Wang // *Sol. Energy Mater. and Sol. Cells*. – 2019. – Vol. 195. – P. 63–70.

9. Zakirullin, R.S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation / R.S. Zakirullin // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2018. – Vol. 35. – P. 1592–1598.

10. Zakirullin, R.S. A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation / R.S. Zakirullin // *ASME J. Sol. Energy Eng.* – 2020. – Vol. 142. – 011001.

11. Zakirullin, R.S. Chromogenic materials in smart windows for angular-selective filtering of solar radiation / R.S. Zakirullin // *Mater. Today Energy*. – 2020. – Vol. 17. – 100476.

References

1. Tabunshchikov Yu.A. Okno kak intellektual'nyy element konstruktsii zdaniya [Window as an intellectual element of the building structure]. In: *Energoberezhniye*, 2008, Iss. 2, pp. 16–21. (In Russ.)
2. Yan X., Chang Y., Qian X. The Properties of an Aluminum/UV-Curable, Infrared, Low-Emissivity Coating Modified by Nano-Silica Slurry. In: *Coatings*, 2020, Vol. 10, 382. (In Engl.)
3. Chang S.-C., Chan H.-T. Post-annealed Aluminum-Doped Zinc Oxide/Tin-Doped Indium Oxide Bilayer Films for Low Emissivity Glass. In: *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2020, Vol. 15, pp. 3694–3703. (In Engl.)
4. Kumar M., Rani S., Singh J.P., Chae K.H., Kim Y., Park J., Lee H.H. Structural phase control and thermochromic modulation of VO₂ thin films by post thermal annealing. In: *Appl. Surf. Sci.*, 2020, Vol. 529, 147093. (In Engl.)
5. Seeboth A., Ruhmann R., Mühling O. Thermotropic and Thermochromic Polymer Based Materials for Adaptive Solar Control. In: *Materials*, 2010, Vol. 3, pp. 5143–5168. (In Engl.)
6. Liu H., Xie Z.-X., Lu J., Han Y.-F., Wei Y.-Q., Guo G.-C. A dual-emitting inorganic-organic hybrid material with emission intensity enhanced via electron-transfer photochromism. In: *Dyes and Pigments*, 2020, Vol. 181, 108441. (In Engl.)
7. Nguyen T.D., Yeo L.P., Ong A.J., Zhiwei W., Mandler D., Magdassi S., Tok A.I.Y. Electrochromic smart glass coating on functional nano-frameworks for effective building energy conservation. In: *Mater. Today Energy*, 2020, Vol. 18, 100496. (In Engl.)
8. Qi W., Gao G., Wu G., Wang H. Flexible gasochromic films with favorable high temperature resistance and energy efficiency. In: *Sol. Energy Mater. and Sol. Cells*, 2019, Vol. 195, pp. 63–70. (In Engl.)

9. Zakirullin R.S. Optimized angular selective filtering of direct solar radiation. In: *J. Opt. Soc. Am. A*, 2018, Vol. 35, pp. 1592–1598. (In Engl.)

10. Zakirullin R.S. A smart window for angular selective filtering of direct solar radiation. In: *ASME J. Sol. Energy Eng.*, 2020, Vol. 142, 011001. (In Engl.)

11. Zakirullin R.S. Chromogenic materials in smart windows for angular-selective filtering of solar radiation. In: *Mater. Today Energy*, 2020, Vol. 17, 100476. (In Engl.)

Закируллин Рустам Сабирович (Оренбург). Доктор технических наук, доцент. Заведующий кафедрой кафедры теплогазоснабжения вентиляции и гидромеханики Архитектурно-строительного факультета ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13. ОГУ). Эл. почта: rustam.zakirullin@gmail.com.

Оденбах Ирина Александровна (Оренбург). Кандидат педагогических наук. Доцент кафедры автомобильных дорог и строительных материалов, доцент кафедры теплогазоснабжения вентиляции и гидромеханики Архитектурно-строительного факультета ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13. ОГУ). Эл. почта: irina.odembakh23@gmail.com.

Zakirullin Rustam S. (Orenburg). Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. The Head of the Department of Heat and Gas Supply of Ventilation and Hydromechanics, Orenburg State University (13 Pobedy Avenue, Orenburg, 460018. OSU). E-mail: rustam.zakirullin@gmail.com.

Odenbach Irina A. (Orenburg). Candidate of Pedagogical Sciences. Associate Professor of the Department of Roads and Building Materials, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply of Ventilation and Hydromechanics of Orenburg State University (13 Pobedy Avenue, Orenburg, 460018. OSU). E-mail: irina.odembakh23@gmail.com.