

УГЛОВОЕ СЕЛЕКТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

В статье рассмотрена проблема углового селективного регулирования светопропускания оптического фильтра. Приведен графоаналитический расчет характеристик регулирования при разных параметрах решеток фильтра. Показана возможность адаптации регулирования к изменению угла падения световых лучей при движении источника света и остекленного объекта относительно друг друга.

Ключевые слова: оптический фильтр, решетка с чередующимися полосами, регулирование направленного светопропускания, угол падения световых лучей.

Необходимость селективного регулирования направленного светопропускания в зависимости от угла падения лучей возникает при движении источника света и/или остекленного объекта (окна, транспортного средства и т. п.) относительно друг друга. Угловое селективное пропускание также обеспечивает эффект невидимости через светопрозрачную конструкцию в определенных диапазонах углов наблюдения. Активно исследуемые в последние годы смарт-стекла [1–4] обеспечивают изменение светопропускания в зависимости от условий окружающей среды – от параметров освещения или температуры. При этом фильтруется интенсивность падающего излучения, а регулирование светопропускания в зависимости от углов падения лучей осуществляется только вследствие самопроизвольного перераспределения коэффициентов отражения, поглощения и пропускания. Это не всегда приводит к оптимальным характеристикам в тех или иных угловых диапазонах. Для регулирования непосредственно по углам падения лучей в остекленных конструкциях применяются дополнительные устройства перераспределения светового потока. Современные способы регулирования и существующие проблемы проанализированы в [5].

Разработан новый способ регулирования без использования дополнительных устройств [6, 7]. В остекленной конструкции применяется оптический фильтр, состоящий из листового стекла с макроскопическими решеточными слоями на обеих поверхностях. Тонкослойные макрорешетки образованы чередующимися полосами (направленно пропускающие полосы чередуются с поглощающими, отражающими или рассеивающими), имеющими, в отличие от диф-

ракционных решеток, субмиллиметровые ширины. Угловая селективность регулирования обеспечивается за счет взаимного расположения пропускающих полос на входной и выходной поверхностях – при изменении углов падения меняется доля излучения, проходящего через обе макрорешетки фильтра. Предварительный подбор параметров чередующихся полос в результате графоаналитического расчета дает возможность самоадаптированного углового селективного регулирования светопропускания. Такой способ имеет перспективы применения при остеклении архитектурных объектов и транспортных средств для контролирования проходящего солнечного излучения.

Расчет коэффициентов отражения и пропускания многослойных покрытий на прозрачных подложках основан на теории Максвелла. Дополнительно к известным матричным и рекуррентным методам расчета по формулам и коэффициентам Френеля в [8] предложена модульная концепция, рассматривающая отражение слева, прохождение через слой и отражение справа как единый модуль (LTR). Методом конечных разностей во временной области проведен численный анализ направленного пропускания через одиночную щель шириной порядка оптических длин волн в металлической пленке с периодическими диэлектрическими барьерами на входной и выходной поверхностях [9]. Свойства направленного светопропускания оконных систем с венецианскими жалюзи охарактеризованы в [10] расчетами трассировки лучей, основанными на функции распределения двунаправленного пропускания.

По сравнению с этими и другими известными методами расчета оптические характери-

стики предлагаемого фильтра рассчитываются исключительно в пределах геометрической оптики благодаря субмиллиметровым ширинам чередующихся полос. Влияние различных оптических и геометрических параметров чередующихся полос на результаты регулирования частично описано в [6, 7]. В статье приводится методика графоаналитического расчета оптических характеристик фильтра и исследуется влияние на них взаимного расположения пропускающих и не пропускающих чередующихся полос на двух решетках фильтра.

На рисунке 1 приведена схема для графоаналитического расчета направленного светопропускания плоскопараллельного оптического фильтра №1 в зависимости от угла падения коллимированных лучей на его входную поверхность. Углы падения Θ_0 и преломления Θ_n изменяются по плоскости разреза. Указаны преломленные лучи для углов падения от 0 до 90° через каждые 10° и для угла 45°. Эти лучи показывают границы направленного светопропускания через решетку входной поверхности фильтра. Тонкими линиями изображены разрезы направленно пропускающих полос, толстыми – поглощающих.

Характеристический угол падения $\Theta_0 = 30^\circ$ – падающий под этим углом центральный луч

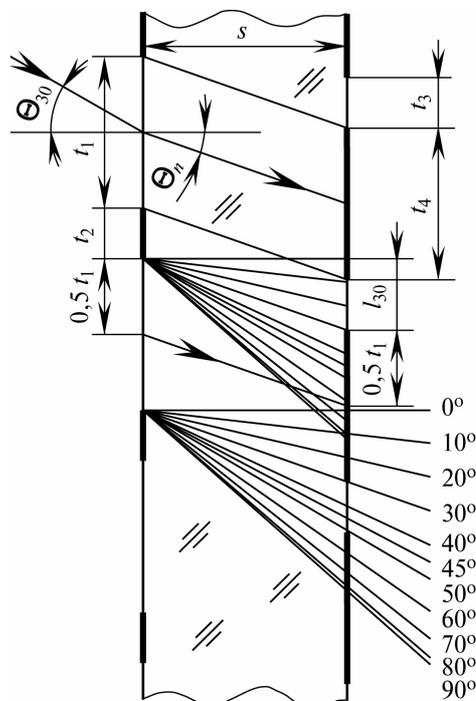


Рисунок 1. Расчетная схема для фильтра №1

пропускающей полосы на входной поверхности после преломления проходит через центр поглощающей полосы на выходной поверхности. Ширины пропускающих и поглощающих полос соответственно: $t_1 = 3$ мм и $t_2 = 1$ мм на входной поверхности, $t_3 = 1$ мм и $t_4 = 3$ мм на выходной поверхности. Соотношение шагов полос (суммарных ширин двух соседних чередующихся полос) на входной и выходной поверхностях одинаково: $t_1 + t_2 = t_3 + t_4 = 4$ мм. Показатель преломления стекла для расчета принят $n = 1,5$ и толщина стекла – $s = 4$ мм.

Из рисунка 1 видно, что через пропускающую полосу входной решетки фильтра при любом угле падения проходит одна и та же часть падающего излучения, равная в пределах одного шага полос отношению ширины пропускающей полосы к величине шага полос. После преломления эта часть лучей попадает на выходную решетку, причем доля проходящих через ее пропускающую полосу лучей уже зависит от угла падения, т. к. указанные на рисунке границы направленного светопропускания передвигаются относительно неподвижных пропускающих и поглощающих полос. Таким образом, интенсивность проходящего через весь фильтр излучения регулируется в угловой зависимости. Подбор параметров фильтра позволяет заранее адаптировать светопропускание к изменению угла падения при известной траектории движения источника света и оптического фильтра друг относительно друга. Графоаналитический расчет устанавливает взаимосвязь между оптическими и геометрическими параметрами фильтра и угловыми характеристиками регулирования.

Для плоскопараллельного фильтра направленного (не рассеянного) светопропускания P_p , % рассчитывается по формуле [6, 7]:

$$P_i = 100h_i / (t_1 + t_2), \quad (1)$$

где h_i , мм – ширина светопропускания при данном угле падения (общая ширина части пропускающих полос выходной поверхности в пределах одного шага полос, через которую лучи, прошедшие направленно через входную поверхность, проходят также направленно).

С увеличением углов падения от 0° примерно до 9° (рисунок 1) ширина светопропускания h_p , следовательно и светопропускание P_p остаются неизменными. При анализе рисунка 1 по-

лучена расчетная формула для этого диапазона углов падения:

$$h_i = t_3. \quad (2)$$

Угол падения примерно 9° , при котором самый верхний луч, прошедший направленно через входную поверхность, после преломления точно попадает на нижний край поглощающей полосы выходной поверхности, является экстремальным. При этом экстремальном угле выполняется равенство:

$$l_i = -t_3 + l_{30}, \quad (3)$$

где l_i и l_{30} , мм – смещения преломленных лучей на выходной поверхности относительно входной для произвольного расчетного угла и для характеристического угла 30° .

Смещение преломленного луча (расстояние, на которое при данном угле падения преломленный луч на выходной поверхности смещается относительно непреломленного луча при нормальном (нулевом) угле падения) рассчитывается по формуле [6, 7]:

$$l_i = \frac{s \sin \Theta_0}{n \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \Theta_0}{n^2}}}. \quad (4)$$

Путем подстановки в эту формулу вычисленного по формуле (3) значения смещения преломленного луча через функцию арксинус точно определяется величина экстремального угла падения. При дальнейшем увеличении угла падения после 9° до следующего экстремального угла 30° ширина светопропускания уменьшается по формуле:

$$h_i = l_{30} - l_i. \quad (5)$$

При 30° из-за равенства ширин полос $t_1 = t_4$ лучи, прошедшие направленно через входную поверхность, полностью поглощаются на выходной поверхности и направленного пропускания отсутствует. При увеличении угла падения примерно до 51° ширина светопропускания возрастает по формуле:

$$h_i = -l_{30} + l_i. \quad (6)$$

При экстремальном угле примерно 51° смещение преломленного луча равно:

$$l_i = t_3 + l_{30}. \quad (7)$$

Далее, в диапазоне углов падения примерно от 51° до 90° , как видно из рисунка 1, ширина светопропускания вновь постоянна и равна ширине пропускающей полосы на выходной решетке фильтра – по формуле (2).

Таким образом, выделено четыре диапазона с одинаковым характером изменения ширины светопропускания (диапазоны разделены экстремальными углами, для которых в скобках указаны соответствующие формулы для точного определения их значений):

1) от 0° примерно до 9° ($l_i = -t_3 + l_{30}$) ширина светопропускания постоянна: $h_i = t_3$;

2) примерно от 9° до 30° ширина светопропускания уменьшается: $h_i = l_{30} - l_i$;

3) от 30° примерно до 51° ($l_i = t_3 + l_{30}$) ширина светопропускания увеличивается: $h_i = -l_{30} + l_i$;

4) примерно от 51° до 90° ширина светопропускания постоянна: $h_i = t_3$.

Для этих диапазонов регулирования по формуле (1) рассчитаны значения светопропускания и на рисунке 2 построена линия 1 зависимости его от угла падения (линия регулирования для фильтра №1).

Линия регулирования 2 получена при аналогичном графоаналитическом расчете светопро-

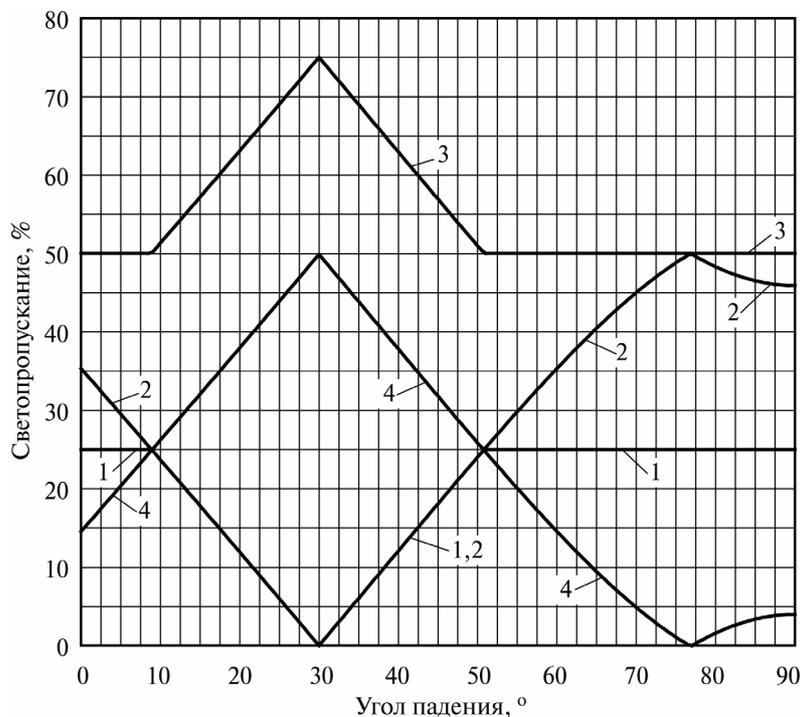


Рисунок 2. Угловые характеристики регулирования при соотношении $t_1:t_2:t_3:t_4$ чередующихся полос: 3:1:1:3 (линия 1); 2:2:2:2 (линии 2 и 4); 3:1:3:1 (линия 3)

пропускания фильтра №2 при одинаковых значениях ширин всех полос: $t_1=t_2=t_3=t_4=2$ мм. Все остальные оптические и геометрические параметры и условия такие же, как и для фильтра №1. Соответствующая расчетная схема приведена на рисунке 3. При расчете линии 2 выделено три диапазона с одинаковым характером изменения ширины светопропускания:

1) от 0° до 30° ширина светопропускания уменьшается: $h_i=l_{30}-l_i$;

2) от 30° примерно до 77° ($l_i=-0,5t_1+t_3+0,5t_4+l_{30}$) ширина светопропускания увеличивается: $h_i=0,5t_1-0,5t_4-l_{30}+l_i$;

3) примерно от 77° до 90° ширина светопропускания уменьшается: $h_i=0,5t_1+t_3+0,5t_4+l_{30}-l_i$.

Рассмотрим влияние взаимного расположения пропускающих и поглощающих полос на характеристики регулирования направленного светопропускания. На рисунке 2 приведены линии регулирования 3 и 4 для фильтров, отличающихся от фильтров №1 и №2 соответственно только тем, что произведены замены расположения чередующихся полос на выходной поверхности таким образом, чтобы при том же характеристическом угле $\Theta=30^\circ$ центральный луч полосы пропускания входной поверхности после преломления про-

ходил через центр пропускающей, а не поглощающей полосы на выходной поверхности.

При графоаналитическом расчете светопропускания фильтра №3 с ширинами полос $t_1=3$ мм, $t_2=1$ мм, $t_3=3$ мм и $t_4=1$ мм выделено четыре диапазона с одинаковым характером изменения ширины светопропускания (расчетные схемы для фильтров №3 и №4 не приводятся, т. к. они отличаются от рисунков 1 и 3 только расположением толстых и тонких линий на выходных поверхностях фильтров):

1) от 0° примерно до 9° ($l_i=-t_4+l_{30}$) ширина светопропускания постоянна: $h_i=t_1-t_4$;

2) примерно от 9° до 30° ширина светопропускания увеличивается: $h_i=t_1-l_{30}+l_i$ (при угле падения 30° из-за равенства $t_1=t_3$ лучи, прошедшие через входную поверхность, полностью проходят и через выходную поверхность, и процент пропускания максимален);

3) от 30° примерно до 51° ($l_i=t_4+l_{30}$) ширина светопропускания уменьшается: $h_i=t_1+l_{30}-l_i$;

4) примерно от 51° до 90° ширина светопропускания постоянна: $h_i=t_1-t_4$.

Аналогично при расчете светопропускания фильтра №4 с ширинами всех полос по 2 мм выделено три диапазона с одинаковым характером изменения ширины светопропускания:

1) от 0° до 30° ширина светопропускания увеличивается: $h_i=t_1-l_{30}+l_i$;

2) от 30° примерно до 77° ($l_i=t_4+l_{30}$) ширина светопропускания уменьшается: $h_i=t_1+l_{30}-l_i$;

3) примерно от 77° до 90° ширина светопропускания увеличивается: $h_i=-t_1-l_{30}+l_i$.

При сравнении угловых оптических характеристик четырех фильтров с разным относительным расположением пропускающих и поглощающих чередующихся полос на их решетках при неизменных остальных геометрических и оптических параметрах сделаны следующие выводы:

– линии регулирования при замене местами пропускающих и поглощающих полос на выходных поверхностях фильтров осесимметричны относительно горизонталей (линии 1 и 2 по отношению к линиям 3 и 4 соответственно), т. к. расчетные формулы в угловых диапазонах возрастания и убывания отличаются только обратной заменой знаков перед слагаемыми смещений при характеристическом угле 30° и расчетных углах падения, остальные слагаемые во всех формулах – алгебраические сум-

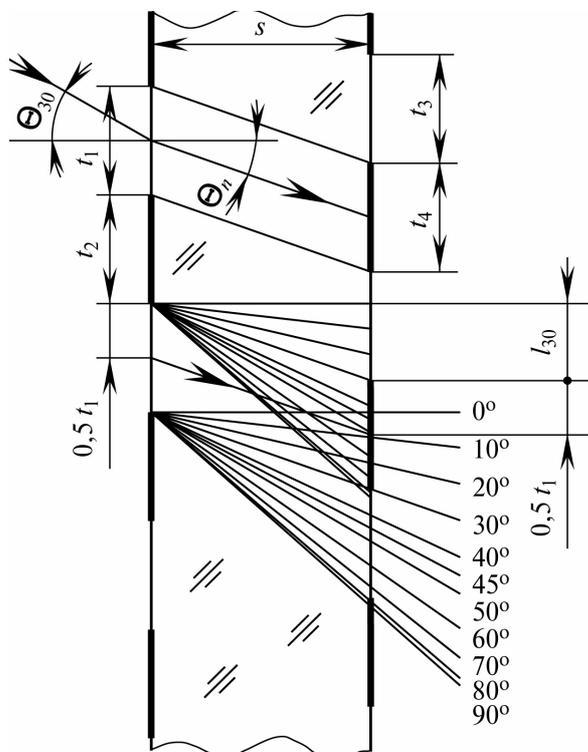


Рисунок 3. Расчетная схема для фильтра №2

мы ширины полос, постоянных для всех углов падения в каждом из четырех случаев;

– горизонтальные оси симметрии находятся как средние арифметические между значениями светопропускания двух симметричных линий регулирования, причем их расположение зависит от соотношений ширины заменяемых друг другом пропускающих и поглощающих полос на выходной поверхности, и горизонталь как ось симметрии при минимальном светопропускании наблюдается при равенстве ширины этих полос ($t_3 = t_4$ для линий 2 и 4), а при максимальном – при наибольшей возможной ширине полосы общего пропуска, ограничиваемой для выходной поверхности шириной пропускающей полосы на входной поверхности (линии 1 и 3 при заданном шаге полос имеют ось симметрии с максимально возможным процентом пропуска, ограниченным при нахождении среднего арифметического равенством $t_3 = t_1$ для линии 3);

– наклонные участки линий регулирования в диапазоне углов от 0° примерно до 60° практически эквидистантны и линейны при разных расчетных формулах, при разных ширинах чередующихся полос и в разных диапазонах углов падения, т. к. в соответствующих формулах при определенном угле падения прибавляется или отнимается одна и та же величина смещения преломленного луча при характеристическом угле, при больших углах эквидистантность нарушается – значения смещений рассчитываются по формуле (4) в синусоидальной зависимости, а синусы углов от 0° примерно до 60° , как известно, изменяются почти линейно, а при дальнейшем возрастании углов линейность нарушается;

– линии регулирования практически симметричны относительно характеристического угла 30° в диапазоне от 0° примерно до 60° , т. к. в расчетных формулах происходит замена знаков перед смещениями при характеристическом и расчетном углах, при больших углах симмет-

ричность нарушается по перечисленным выше причинам;

– максимум и минимум одинакового светопропускания возможны в двух диапазонах углов падения (линии 1 и 3);

– светопропускание возрастает при увеличении одинаковых по значениям ширины пропускающих полос на входной и выходной поверхностях (линии 3 и 4), причем при равенстве ширины этих полос максимумы пропускаются достигаются при каком-либо определенном угле (в данных случаях при характеристическом угле 30°), для достижения максимума пропуска в диапазоне углов падения ширина пропускающих полос на выходной поверхности должна быть большей, чем на входной (тогда, например, на линии 3 максимум в 75% уже будет для диапазона углов симметрично относительно угла 30° , причем этот диапазон будет тем шире, чем больше превышение ширины пропускающих полос на выходной поверхности), или меньшей (тогда значение максимума в диапазоне углов падения симметрично относительно угла 30° будет меньше 75%, причем тем меньше, чем меньше ширина пропускающей полосы на выходной поверхности относительно входной, при этом диапазон углов с этим максимумом пропуска, наоборот, расширится).

Полученные результаты, оценивающие влияние расположения чередующихся полос на решетках фильтров, необходимо учитывать для достижения оптимальных характеристик селективного углового регулирования направленного светопропускания. На практике в конкретных случаях изначально задаются требуемые угловые характеристики регулирования и для удовлетворения им подбираются соответствующие параметры фильтров, вследствие чего имеется возможность предварительной адаптации регулирования к изменению угла падения световых лучей при движении источника света и остекленного объекта друг относительно друга.

22.04.2012

Список литературы:

1. Peter H. Berning Principles of design of architectural coatings // Appl. Opt. – 1983. – №22. – P. 4127–4141.
2. Табунщиков, Ю.А. Окно как интеллектуальный элемент конструкции здания // Энергосбережение. – 2008. – №2. – С. 16–21.
3. Research Frontiers Inc [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.smartglass.com/> (дата обращения: 20.04.2012).
4. Flavio Horowitz, Marcelo B. Pereira, Giovanni B. de Azambuja Glass window coatings for sunlight heat reflection and utilization // Appl. Opt. – 2011. – №50. – P. 250–252.
5. Закируллин, Р.С. Селективное регулирование направленного светопропускания стекла и остекленных конструкций в зависимости от угла падения световых лучей // Вестник Оренбургского гос. ун-та. – 2011. – №6. – С. 172–180.

6. Zakirullin, R.S. Expedient of regulation of the directional gear transmission of light [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wipo.int/patentscope/search/en/search.jsf> (дата обращения: 20.04.2012).
7. Zakirullin, R.S. Expedient of regulation of the directional gear transmission of light [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uspto.gov/patft/> (дата обращения: 20.04.2012).
8. Mazilu Michael, Miller Alan, Donchev Vesselin T. Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures // Appl. Opt. – 2001. – №40. – P. 6670–6676.
9. Zu-Bin Li, Jian-Guo Tian, Wen-Yuan Zhou, Wei-Ping Zang, Chunping Zhang Periodic dielectric bars assisted enhanced transmission and directional light emission from a single subwavelength slit // Opt. Express. – 2006. – №14. – P. 8037–8042.
10. Andersen M., Rubin M., Powles R., Scartezini J.-L. Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations // Solar Energy. – 2005. – №78 (2). – P. 187–198.

Сведения об авторе:

Закируллин Рустам Сабирович, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 3015, тел. (3532) 372426, e-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

UDC 535.31; 681.7.06

Zakirullin R.S.

Orenburg state university, e-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

A CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF THE ANGULAR SELECTIVE REGULATION OF LIGHT TRANSMISSION OF AN OPTICAL FILTER

A method for angular selective regulation of directional light transmission of a grating optical filter is presented. The possibility of adapting to a change in the incidence angles of light beams when moving the light source and glazed objects relative to each other is shown. A graphic-analytical calculation of the characteristics of regulation at different parameters of the filter gratings is given.

Key words: optical filter, gratings with alternating strips, regulation of directional light transmission, incidence angle of light beams.

Bibliography:

1. Peter H. Berning Principles of design of architectural coatings // Appl. Opt. – 1983. – №22. – P. 4127–4141.
2. Tabunshikov, Yu.A. Window as an intellectual element of the building // Energoberezhenie. – 2008. – №2. – P. 16–21.
3. Research Frontiers Inc [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.smartglass.com/> (date accessed: 20.04.2012).
4. Flavio Horowitz, Marcelo B. Pereira, and Giovanni B. de Azambuja. Glass window coatings for sunlight heat reflection and co-utilization // Appl. Opt. – 2011. – №50. – P. 250–252.
5. Zakirullin, R.S. Selective regulation of light transmission glass and glazing constructions // Vestnik of OSU. – 2011. – №6. – P. 172–180.
6. Zakirullin, R.S. Expedient of regulation of the directional gear transmission of light [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.wipo.int/patentscope/search/en/search.jsf> (date accessed: 20.04.2012).
7. Zakirullin, R.S. Expedient of regulation of the directional gear transmission of light [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.uspto.gov/patft/> (date accessed: 20.04.2012).
8. Mazilu Michael, Miller Alan, Donchev Vesselin T. Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures // Appl. Opt. – 2001. – №40. – P. 6670–6676.
9. Zu-Bin Li, Jian-Guo Tian, Wen-Yuan Zhou, Wei-Ping Zang, Chunping Zhang Periodic dielectric bars assisted enhanced transmission and directional light emission from a single subwavelength slit // Opt. Express. – 2006. – №14. – P. 8037–8042.
10. Andersen M., Rubin M., Powles R., Scartezini J.-L. Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations // Solar Energy. – 2005. – №78 (2). – P. 187–198.