

УДК 691.6:535.232/237

К.И.Луданов, канд.техн.наук, **В.И.Дешко**, докт.техн.наук (Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев)

Методы совместного определения оптических свойств стекла

В статье развит известный метод определения коэффициента светопоглощения и разработан новый метод совместного определения двух оптических свойств стекла: коэффициентов светопоглощения и отражения света. В известном методе коэффициент светопоглощения определяется на основе измерений пропускной способности у двух образцов стекла разной толщины. В рамках развития известного метода в статье предложено наряду со светопоглощением дополнительно определять еще и коэффициент отражения. В предложенном методе совместного определения этих оптических параметров стекла оказалось достаточным проведение измерений пропускной способности стекла одной толщины.

У статті розвинуто відомий метод визначення коефіцієнта світлопоглинання та розроблено новий метод спільного визначення одразу двох оптичних властивостей скла: коефіцієнтів світлопоглинання та відбиття світла. У відомому методі коефіцієнт світлопоглинання визначається на основі вимірів пропускної здатності у двох зразків скла різної товщини. В рамках розвитку відомого методу в статті запропоновано разом зі світлопоглинанням додатково визначити ще й коефіцієнт відбиття. А в методі спільного визначення цих оптичних параметрів скла, запропонованому в даній статті, виявилось достатнім проведення вимірів пропускної здатності скла на зразках лише однієї товщини.

Введение. Для практики очень важно знание как оптических свойств оконного стекла, используемого в строительстве [10], так и оптического стекла, используемого в качестве прозрачной изоляции солнечных коллекторов [12]. Например, качество оптического стекла очень важно для эффективной работы солнечных коллекторов, поскольку светопропускание их прозрачной изоляции входит в их критерий энергетической эффективности во второй степени [5]. Анализ этого критерия показывает, что оптические потери в солнечном коллекторе в два раза более ценны, чем потери тепла от абсорбера через теплоизоляцию.

Качество оконного стекла определяется тем, что оно должно пропускать максимум солнечного света, причем именно за счет высокого светопропускания, а не за счет площади поверхности окон, поскольку окна представляют собой значительный источник теплопотерь в окружающую среду, которые составляют около трети общих теплопотерь от зданий и сооружений.

В настоящее время такие оптические свойства стекла как коэффициент поглощения и отражения определяются различными способами. Однако разные методы определения в силу своих особенностей могут давать разные значения оптических параметров при тестировании одного и того

же образца. Так, например, коэффициент отражения оконного стекла находится на основе его зависимости от показателя преломления n , который существенно зависит от длины волны падающего излучения и определяется при $\lambda = 0,547$ мкм (для оконного стекла $n = 1,52-1,53$). При этом коэффициент отражения ρ прямого солнечного или дневного света, а тем более света от лампы накаливания (в соответствии с методикой ДСТУ), будет значительно отличаться, поскольку эти источники света имеют разный спектральный состав излучения. Поэтому более корректный подход – это совместное определение обоих параметров в рамках единой математической модели светопропускания стекла и с одним источником света, (например, используя выражение такого легко определяемого экспериментально свойства, как светопропускание стекла в зависимости от толщины листа, его отражения и поглощения). Этот метод определения нескольких параметров одновременно (постоянных математической модели) представляет собой способ совместного измерения параметров [13]. В рамках такого метода измерений его результаты при прочих равных условиях имеют минимальную дисперсию (среднеквадратическую погрешность измерений).

Обзор. Светопронускающее стекло (оконное и витринное) выпускается в основном двух видов: листовое оконное и витринное. Листовое оконное стекло выпускают толщиной 2-8 мм, и в зависимости от качественных показателей оно бывает трех сортов: высшей категории, 1-го и 2-го сорта. Витринное стекло выпускается толщиной 5,5-10 мм. Причем, в отличие от оконного стекла, оно бывает полированное, термополированное и неполированное.

Качество оконного стекла в основном определяется его оптическими свойствами, некоторые из них регламентируются нормативными документами, такими как СНИП (ДБН) [11] и ГОСТ (ДСТУ) [8], (таблица 1).

Таблица 1. Нормативные данные по светопропусканию листового стекла

Вид стекла	Выпуск, ГОСТ	Толщина, мм	Светопронесение	
			одного	и 2-х стекол
Оконное стекло	111-78 -//-	2-2,5	0,87	-
		3-4	0,85	0,72
		5-6	0,84	0,71
Витринное стекло:	5380-77 13454-77 -//- 7138-78	6,5	0,84	0,71
			0,87	0,76
		5,5-6,5	0,85	0,72
			0,87	0,75
		8	0,85	0,72

Стандартами регламентируется значение пропускания света τ как оконным стеклом, так и оптическим стеклом для солнечных коллекторов. Светопронесение в основном определяется химическим составом стекла. Зеленый цвет среза стекла определяется наличием в нем ионов железа: двухвалентного (закисного) Fe^{2+} и трехвалентного (окисного) Fe^{3+} , которое увеличивает коэффициент поглощения в слое χ . Причем основное влияние на поглощение оказывает концентрация ионов железа C_{Fe} в закисной форме: коэффициент светопоглощения увеличивается с ростом концентрации Fe^{2+} :

$$\chi = \varepsilon \cdot C_{Fe},$$

где ε – удельный коэффициент светопоглощения. Для различных стекол [4] коэффициент поглощения света χ изменяется от $0,04 \text{ см}^{-1}$ (для высокопрозрачных стекол) до $0,32 \text{ см}^{-1}$ (для сла-

бопрозрачных стекол). Для оконного стекла $\chi = 0,16 \text{ см}^{-1}$. В соответствии с законом Бугера, светопоглощение стекла зависит от параметра χ следующим образом:

$$\alpha = \exp(-\chi \delta).$$

Повышение концентрации ионов свинца увеличивает показатель преломления стекла n , а соответственно, и его отражательную способность поверхности стекла ρ , так как она зависит от n :

$$\rho = [(n - 1) / (n + 1)]^2.$$

Для оконного и витринного стекла показатель преломления принимают равным 1,52-1,53. При этом коэффициент отражения от одной поверхности стекла 4,3-4,4%, а от двух поверхностей листа 8,5-8,8%. Кроме того, на отражательную способность стекла сильно влияет качество обработки поверхности (например, полирование и др.).

Оптическое стекло на срезе практически бесцветно. Оно выпускается следующих категорий: 000, 00, 0, а также 1, 2, 3 и 4. Светопоглощение оптического стекла α не более 0,2-3,0% по категориям соответственно.

На сегодняшний день приняты три характеристики оптического стекла: основная – это показатель преломления n_e для λ_{Hg} зеленой линии ртути (поскольку показатель преломления характеризуется дисперсией, т.е. зависит от длины волны: $n = f(\lambda)$). Например, для стекла крон n изменяется в диапазоне 1,47-1,67. Длина волны зеленой линии ртути $\lambda_e = 0,546 \text{ мкм}$. Кроме того, оптическое стекло характеризуется средней дисперсией Δn в диапазоне между синей и красной линией кадмия и коэффициентом дисперсии v_e .

В стандартном методе определения оптических свойств стекла [9] вообще не используется математическая модель прохождения света через стекло. Стандартная процедура не предусматривает измерение коэффициента отражения одной грани стекла ρ , а также коэффициента поглощения света в слое χ . Вместо этого для листа стекла определяется пропускательная τ и отражательная способность ρ по формулам:

$$\tau = \tau_3 \cdot (I_\tau / I_3); \quad \rho = \rho_3 \cdot (I_\rho / I_3),$$

где τ_3 и ρ_3 – известные величины пропускательной и отражательной способности эталона соответ-

венно; I_τ/I_0 – отношение плотностей света, прошедшего через образец и эталон соответственно; I_ρ/I_0 – отношение плотностей света, отраженного от образца стекла и эталона соответственно. Анализ стандартного метода определения оптических свойств стекла показал, что он имеет не количественный, а качественный характер и его теоретические основы неясны.

Экспериментально коэффициент поглощения обычно определяется путем измерения ослабления света при его прохождении через плоскопараллельную пластинку (лист стекла, прозрачного пластика или полимерной пленки). При этом необходимо учитывать роль отражения от обеих поверхностей пластинки. В случае пренебрежения многократными отражениями от двух поверхностей [7] для потока, прошедшего через пластинку толщиной δ , в качестве первого приближения получают следующее выражение для светопропускания:

$$\tau = (1 - \rho)^2 \cdot \alpha = (1 - \rho)^2 \cdot \exp(-\chi\delta). \quad (1)$$

Известен метод определения оптических свойств стекла на основе этой формулы – так называемый "способ двух образцов" разной толщины [1]. Данный способ включает два эксперимента по определению светопропускания двух образцов (τ_1 и τ_2) листа стекла (прозрачного пластика или полимерной пленки) толщиной δ_1 и δ_2 соответственно. Путем проведения двух экспериментов измеряют значения τ_1 и τ_2 образцов разной толщины и получают систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} \tau_1 = (1 - \rho)^2 \cdot \exp(-\chi\delta_1) \\ \tau_2 = (1 - \rho)^2 \cdot \exp(-\chi\delta_2). \end{cases} \quad (2)$$

В результате решения этой системы уравнений относительно неизвестной χ получают экспериментальное значение коэффициента поглощения стекла:

$$\chi = (\delta_2 - \delta_1)^{-1} \cdot \ln(\tau_1/\tau_2). \quad (3)$$

Аналогичным образом определялся спектральный коэффициент поглощения оконного стекла применительно к солнечным коллекторам в статье [2]. Авторами приведены результаты

исследования стекол двух заводов с довольно большим отличием по содержанию оксида железа. Спектральные характеристики стекол измерялись на приборах "Specord-75-IR". Для увеличения точности и снижения погрешности получаемых результатов измерения проводились на образцах стекла трех толщин (3, 5 и 8 мм). Обработывая спектральные кривые пропускания стекол трех толщин, было получено семейство прямых, каждая прямая которого соответствует определенной длине волны и строится по трем точкам (соответственно толщине стекла) с общим началом при $\delta = 0$.

Недостатком известного метода является то, что для его реализации необходимо иметь два образца разной толщины, а в реальных условиях часто имеются в наличии образцы только одной толщины, например, в случаях, когда выпускается или поставляется продукция из полупрозрачного материала лишь одной толщины (листы стекла или прозрачного пластика, а также полимерная пленка). Кроме того, в известном методе не предусмотрено определение коэффициента отражения света от поверхности ρ , который также необходим при расчетах светопропускания одного стекла τ или стеклопакета.

Более того, использование первого приближения для описания светопропускания листа стекла (1) приводит к неточной формуле и для светопропускания стеклопакетов. В этом случае коэффициент светопропускания стеклопакета определяют как простое произведение коэффициентов светопропускания стекол, составляющих пакет [8]:

$$\tau_{1N} = \tau_1 \times \tau_2 \times \dots \times \tau_N. \quad (4)$$

Результаты исследований.

1.1. Метод определения оптических свойств стекла на основе двух образцов разной толщины.

Анализ системы уравнений (2) для известного метода показал, что ее можно решить и относительно второго неизвестного, коэффициента отражения поверхности стекла ρ . Новое выражение для коэффициента отражения имеет следующий вид:

$$\rho = 1 - \exp[(\delta_2 \cdot \ln \tau_1 - \delta_1 \cdot \ln \tau_2) / 2(\delta_2 - \delta_1)]. \quad (5)$$

В работе [6] приведено более точное выражение светопропускания τ стекла с учетом многократных переотражений света между гранями пластинки, оно имеет следующий вид:

$$\tau = [(1 - \rho)/(1 + \rho)] \cdot \exp(-\chi\delta). \quad (6)$$

Система двух уравнений с двумя неизвестными для светопропускания двух образцов разной толщины будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \tau_1 = [(1 - \rho)(1 + \rho)] \cdot \exp(-\chi\delta_1) \\ \tau_2 = [(1 - \rho)(1 + \rho)] \cdot \exp(-\chi\delta_2). \end{cases} \quad (7)$$

Полученное в результате решения этой системы уравнений выражение для коэффициента поглощения стекла совпадает с результатом (3) для коэффициента поглощения, а для коэффициента отражения получаем новое выражение:

$$\rho = \left[\left(\tau_1 / \tau_2 \right)^m - \sqrt{\left(\tau_1 - \tau_2 \right)} \right] / \left[\left(\tau_1 / \tau_2 \right)^m + \sqrt{\left(\tau_1 - \tau_2 \right)} \right], \quad (8)$$

где τ_1 и τ_2 – это светопропускание стекла толщиной δ_1 и δ_2 соответственно, а показатель степени равен:

$$m = (\delta_1 + \delta_2) / 2(\delta_2 - \delta_1).$$

Сравнение двух формул (5) и (8) показывает, что первое приближение для ρ без учета многократных отражений дает слегка заниженный результат. Например, для оконного стекла разница расчетов по формулам (5) и (8) составляет всего 0,16%.

На основе коэффициента отражения ρ можно определить и среднеинтегральное значение показателя преломления стекла (диэлектрика) \bar{n} по формуле:

$$\bar{n} = (1 + \sqrt{\rho}) / (1 - \sqrt{\rho}). \quad (9)$$

1.2. Разработка нового метода совместного определения оптических свойств стекла.

Светопропускание τ_N пакета из N листов стекла одинаковой толщины δ относительно нормального потока света в общем случае [3, 4] определяется из формулы:

$$\tau_{1N} = \{(1 - \rho) / [1 + \rho(2N - 1)]\} \cdot \exp(-\chi N \delta). \quad (10)$$

Таким образом, измеряя пропускание одного листа ($\tau_1 = I_1/I_0$), двух листов ($\tau_{12} = I_2/I_0$) стекла и решая полученную систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} \tau_1 = [(1 - \rho)(1 + \rho)] \cdot \exp(-\chi\delta) \\ \tau_{12} = [(1 - \rho)(1 + 3\rho)] \cdot \exp(-2\chi\delta), \end{cases} \quad (11)$$

получают квадратное уравнение относительно ρ , в результате решения которого находят выражения значений коэффициента отражения ρ света от поверхности образца и коэффициента поглощения χ :

$$\begin{aligned} \rho^{-1} &= 2\sqrt{\left[\tau_{12} / (\tau_{12} - \tau_1^2) \right]} - 1; \\ \chi &= (\delta)^{-1} \cdot \ln \left[(\tau_1)^{-1} - \sqrt{\left\{ (\tau_1)^{-2} - (\tau_{12})^{-1} \right\}} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Пример 1. Учитывая то, что данные по пропусканию τ стекол, приведенных в таблице 1, получены в соответствии с ДСТУ, на основе этих данных пропускания одного стекла и пакета из двух стекол по вышеприведенным формулам можно провести расчет предельных значений оптических параметров этих стекол. Рассмотрим данные, приведенные в таблице 1 для оконного стекла толщиной 6 мм и витринного полированного стекла толщиной 6,5 мм, когда $\tau_1 = 84\%$, а $\tau_2 = 71\%$.

Подставляя эти значения в формулы (3) и (5), для оконного стекла получаем, что коэффициент отражения $\rho = 0,041$ (4,1%) и коэффициент поглощения $\chi = 0,154 \text{ см}^{-1}$, что очень близко к принятым для оконного стекла (4,3% и $0,16 \text{ см}^{-1}$). Для витринного стекла эта подстановка дает такое же значение для коэффициента отражения и чуть меньшее значение для коэффициента поглощения: $\chi = 0,142 \text{ см}^{-1}$.

Пример 2. В рамках методики испытаний солнечных коллекторов, изложенной в ГОСТ 28310-89, Приложение 2 (обязательное), было протестировано оптическое стекло "000", лист которого использовался в качестве прозрачной изоляции коллектора. Светопропускание стекла относительно прямого солнечного излучения определялось с использованием актинометра термоэлектрического МЗ (№192970 Д/551) производств-

ва завода "Метеоприбор", г.Тбилиси. Светопропускание одного листа стекла толщиной 3,5 мм составило 85,7%, а светопропускание пакета из двух параллельных слоев такого стекла составило 74,6%. По формулам (12) был проведен расчет коэффициента отражения ρ света от поверхности стекла и коэффициента его поглощения χ . В результате было установлено, что для стекла $\rho = 0,063$ (6,3%), а $\chi = 0,072 \text{ см}^{-1}$. Таким образом, оптическое стекло, имея низкий коэффициент поглощения, достаточно много отражает (6,3%) за счет высокого значения интегрального показателя преломления прямого солнечного излучения, который составляет (9):

$$\bar{n} = (1 + \sqrt{0,063}) / (1 - \sqrt{0,063}) = 1,67.$$

Выводы. 1. Вместо стандартного (качественного) метода определения параметров стекла на основе эталонов в статье предлагается использовать количественные методы совместного определения двух оптических параметров стекла (коэффициента поглощения и отражения света), поскольку предложенные процедуры их экспериментального определения осуществляются на основе строгих математических моделей светопропускания стекла, т.е. на основе так называемого метода совместных измерений [13], который, при прочих равных условиях, дает минимальную среднеквадратическую погрешность (дисперсию).

2. Возможность использования в ДСТУ для определения коэффициента поглощения стекла сразу трех типов источников света (лампы накаливания, прямого солнечного излучения и диффузного дневного света) некорректно, поскольку все они имеют различный спектр, следовательно, будут отличаться между собой и интегральные значения получаемых оптических свойств. Так, например, стекло для солнечных коллекторов должно испытываться только с использованием прямого солнечного света.

3. Коэффициент отражения стекла в методе совместного измерения параметров на основе использования двух образцов разной толщины должен определяться путем анализа данных по их

светопропусканию, а не вычисляться из неопределенного значения "показателя преломления для зеленой линии ртути" [7]. Для определения коэффициента отражения стекла в рамках "метода двух толщин" из двух полученных формул можно рекомендовать более простую формулу (5), поскольку разница в их точности составляет всего 0,16%.

4. Для осуществления разработанного в данной статье метода совместного определения оптических свойств стекла (коэффициентов отражения и светопропускания) оказалось достаточным использовать образцы стекла только одной толщины, что зачастую имеет место в реальных условиях. На новый способ определения параметров стекла в Укрпатент подана заявка на изобретение и оформляется патент Украины.

1. *Фриш С.Э.* Оптические методы измерений. Часть 1. – Л.: Изд. ЛГУ, 1976. – 126 с.
2. *Ястребов С.А., Фридкин Р.З., Гладушко О.А., Иванова Е.Г.* Определение спектрального коэффициента поглощения оконного стекла. / Гелиотехника, Изд. "ФАН" УзССР. Ташкент.: – 1986. – №1. – С. 65–67.
3. *Даффи Дж.А., Бекман У.А.* Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М.: Мир, 1977. – 354 с.
4. *Ферт А.Е., Айзен М.А., Антонюк Д.И. и др.* "РЕКОМЕНДАЦИИ по проектированию зданий с пассивными системами солнечного отопления". Госкомархитектуры при Госстрое СССР. – К.: КиевЗНИИЭП, 1989. – 100 с.
5. *Луданов К.И.* Эксергетическая эффективность солнечных коллекторов // Экотехнологии и Ресурсосбережение. – 2006. – №5. – С. 68–71.
6. *Гуревич М.М.* ФОТОМЕТРИЯ. Теория, методы и приборы. Изд. 2-е. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
7. *Дроздов В.А., Гликин С.М., Тарасов В.П. и др.* СТЕКЛО. Справочник. Под ред. Н.Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1973. – 487 с.
8. *Применение стекла* в строительстве: Справочник. – М.: Стройиздат, 1983. – 288 с.
9. *ДСТУ Б.В. 27-13-95 (ГОСТ 26 302-93) СТЕКЛО.* Методы испытаний. 1996.
10. *ГОСТ 111-78* Стекло оконное. Технические условия. Изд. стандартов. – М., 1979. – 16 с.
11. *СНиП II-4-79.* Нормы проектирования. Естественное и искусственное освещение. Госстрой СССР. – М., 1980. – 48 с.
12. *ГОСТ 28310-89.* КОЛЛЕКТОРЫ СОЛНЕЧНЫЕ. Общие технические условия. Изд. стандартов. – М., 1990. – 16 с.
13. *Налимов В.В., Голикова Г.И.* Логические основания эксперимента. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1981. – 128 с.