

Заметки об анализе цвета стекольной продукции.

К.т.н. О.А.Гладушко, к.т.н. А.Г.Чесноков, ОАО «Институт Стекла», Москва

В настоящее время стекольное производство и применение стекла переживает несомненный подъем. Чрезвычайно расширились как потребительские качества стекольной продукции, так и области ее применения. В особенности это касается строительства. В связи с тем, что далеко шагнувшая вперед технология позволила придать листовому стеклу очень много новых полезных свойств и чрезвычайно разнообразить его внешний вид, оно стало широко применяться в строительстве не только в качестве светопроводящих элементов в стенах зданий, но и в качестве основного строительного и (или) облицовочного, декоративного материала. Это касается и уникальных творений признанных лидеров современной мировой архитектуры таких, например, как Норман Фостер, любимым материалами которого являются стекло и сталь, и множества рядовых сооружений, в том числе офисных и жилых зданий, бассейнов, оранжерей и т.д.

Широкое использование стекла на фасадах зданий остро ставит вопрос о его цвете, в том числе, об одинаковости цвета используемых стеклянных листов (панелей). Архитекторам и заказчикам обычно очень не нравится, когда на фасаде видны участки, отличающиеся по цвету от остальной площади (рис.1). Поэтому задача количественного определения и измерения цвета стекла - одна из актуальнейших в настоящее время

Но прежде, чем подходить к решению этой задачи, следует остановиться на феномене восприятия человеком цвета стекла.

Восприятие цвета может быть очень субъективным и связано с индивидуальной восприимчивостью, поскольку чувствительность глаза весьма индивидуальна. Кроме того, на то, как выглядит цвет, влияют условия наблюдения. Например, при обзоре внешнего вида здания снаружи имеют значение такие факторы:

- освещенность (т.е. темное, покрытое облаками небо может способствовать появлению цветовой разницы, которая не наблюдается при прямом солнечном освещении)
- расстояние и угол обзора (цвет солнцезащитного стекла с высокоселективным отражающим покрытием меняется в зависимости от угла наблюдения, поэтому правильно оце-

нить визуально цвет можно только при наблюдении с одного расстояния и под одинаковым углом не более 45 градусов к нормали)

- тип и цвет используемых на фасаде рам и декоративных фрамуг
- расстояние между двумя соседними стеклянными панелями (от расстояния зависит угол обзора)
- глаз наблюдателя
- внутренние условия (например, отсутствие освещения в здании: темнота может способствовать усилению восприятия цветовой разницы)
- внешние условия (например, наличие других зданий, которые могут отражаться в стекле).

Таким образом, принимая во внимание вышесказанное, т.е. то, что визуальное восприятие цвета всегда содержит элемент субъективности, важно определять цвет количественно, исключая эту субъективность.

Иными словами, для объективной оценки цвет продукции (объекта) должен быть «измерен» с помощью приборов и количественно выражен. Измерение цвета сводится к определению численного значения цветовых координат в заданном цветовом пространстве либо путем измерения на спектрофотометрах характеристик отражения или пропускания объекта и последующего пересчета полученных данных в цветовые координаты с учетом функции стандартного наблюдателя и типа источника света, либо к непосредственному измерению цветовых координат на специальных приборах – колориметрах.

Равенство цветовых координат различных объектов (изделий) будет однозначно свидетельствовать об их цветовом равенстве и, таким образом, позволит производителю четко контролировать и ответственно гарантировать качество своей продукции, а также исключит или даст возможность объективно разрешить конфликтные ситуации (споры) между производителем и потребителем, возникающие при зрительном восприятии цвета готовых изделий непосредственно по месту их использования.

Известно, что цвет является трехмерной величиной и для воспроизведения любого цвета, встречающегося в природе, необходимо смешать в определенных пропорциях три любых линейно независимых (монокроматических) цвета, называемых основными. (При-

чем эти три цвета могут быть как реальными, так и мнимыми. Важно, что ни один из них не может быть получен путем сложения двух остальных цветов). Количества основных компонентов, необходимые для воспроизводства данного цвета, и называются координатами цвета [1-3].

Для точного определения цвета и численного его выражения Международной Комиссией по Освещению (МКО, в международном обозначении - CIE) приняты различные цветовые пространства (цветовые шкалы) и методы расчета в них цветовых координат.

Наиболее широко используемым в колориметрии было и сейчас еще остается принятое в 1931 г. пространство XYZ [4]. Оно представлено мнимыми цветами, близкими красному, зеленому и синему.

В этом колориметрическом пространстве каждый цвет представлен точкой с 3-мя координатами: X, Y и Z. Координаты цвета X, Y, Z рассчитываются по формулам [1-4], в которых учитываются спектральные характеристики (пропускание или отражение) образца, спектральная плотность излучения стандартного источника света, удельные координаты цвета для стандартного колориметрического наблюдателя МКО (функции сложения цветов) и ширина интервала длин волн. Указанные функции количественно определяют чувствительность конических рецепторов среднего наблюдателя к красному, зеленому и синему цвету. Они установлены экспериментально для угла обзора 2° (1931г.) и угла обзора 10° (1964г.) В качестве источника света в соответствии с ГОСТ 7721 [5.] применяются источники нескольких типов, воспроизводящие различные условия освещения:

- тип А ($T=2856\text{ K}$) – искусственного электрическими лампами накаливания;
- тип В ($T=4874\text{ K}$)– прямого солнечного;
- тип С ($T=6774\text{ K}$)– рассеянным дневным светом;
- тип Д65 (6504 K)– усредненным дневным светом. (Наиболее широко применяется тип Д65).

Расчетная колориметрическая система XYZ построена так, что только одна координата Y определяет количественную характеристику цвета – яркость (или светлоту). При этом координата цвета Y численно совпадает с коэффициентом пропускания или отражения света образца, цвет которого определяется.

Для качественной характеристики цвета применяются так называемые координаты цветности x , y , z , которые являются относительными характеристиками и равны, соответственно:

$$x = X / (X+Y+Z); \quad y = Y / (X+Y+Z); \quad z = Z / (X+Y+Z)$$

Поскольку $x + y + z = 1$, то для определения цветности объектов достаточно двумерного пространства. Объекты с одинаковыми x, y , но разными Y характеризуются одинаковой цветностью, но различной яркостью, и, наоборот, объекты с разными x, y , но одинаковыми Y будут одинаковы по яркости и разными по цветности. В качестве примера одинаковых по цветности, но с различной яркостью объектов могут служить стекла одного и того же состава, но разной толщины. Так обычное прозрачное листовое стекло толщиной 4 мм характеризуется параметрами цветности $x = 0,312$ и $y = 0,33$ и координатой цвета Y (светопропускание) = 90, а такое же стекло толщиной 2 мм при тех же координатах цветности имеет координату цвета $Y = 91$ (расчет для Д 65, 2⁰). Для 3 мм $Y = 90,5$.

Следует отметить, что поскольку характеристики пропускания и отражения стекла (как и любого другого материала) различны, то и цвет одного и того образца, воспринимаемый «на просвет» и в отраженном варианте будет разным, разными будут и значения координат цвета, рассчитанные по спектру пропускания и по спектру отражения этого образца.

В качестве примера можно привести параметры стекла с отражающим покрытием (зеленое классик) (см. табл.1)

Таблица 1. Колориметрические параметры (для Д 65, 2⁰)

	По отражению со стороны пленки	По отражению со стороны стекла	По пропусканию
X	30,16	17,63	32,39
Y	32,38	20,47	34,66
Z	62,53	20,16	33,40
x	0,24	0,30	0,32
y	0,26	0,35	0,34

Естественно, что сравнивать и контролировать объекты по цвету можно только по цветовым характеристикам, рассчитанным либо только по пропусканию, либо только по отражению с соответствующей стороны (и расчеты также должны быть произведены для одинаковых источников света и одинаковых углов обзора). Это касается и цветовых параметров, полученных непосредственно с помощью колориметров, конструкция которых также предусматривает регистрацию либо прошедшего через образец излучения, либо излучения, отраженного от образца.

Поскольку из самих значений XYZ трудно понять цвет объекта, МКО (CIE) были разработаны другие цветовые более однородные (линейные) шкалы, чтобы приблизиться к тому, как мы сами воспринимаем цвет, упростить понимание и улучшить передачу цветовых различий.

В настоящее время одним из наиболее популярных цветовых пространств для измерения цвета объекта и широко применяемых в различных областях является цветовое пространство $L^*a^*b^*$ (обозначаемое также как CIELAB), принятое CIE в 1976 году [6]. Оно обеспечивает процедуру единообразной оценки цветовых различий в соответствии с визуальными различиями и, более того, позволяет количественно определить цвет.

Эта колориметрическая система представляет собой трехмерное цветовое пространство, каждый цвет в котором представлен точкой с 3-мя координатами: L^* , a^* и b^* , где L^* указывает светлоту, a^* и b^* - хроматические координаты. Положительные значения a^* указывают на преобладание красного, а отрицательные – на преобладание зеленой составляющей, тогда как положительные значения b^* указывают на преобладание желтой, а отрицательные – синей составляющей. Центр является ахроматичным (т.е. нейтральным).

Координаты цвета в системе $L^*a^*b^*$ рассчитывают исходя из значений координат системы XYZ [1-3,6,7]. Вот как выглядят в этой системе цветовые параметры стекла с покрытием, для которого выше приводились данные в системе XYZ. (табл.2). Здесь соответствующие величины приведены и для разных источников света.

Таблица 2. Координаты цвета в системе $L^* a^* b^*$ стекла с отражающим покрытием:а) источник Д65, 2^0

	По отражению со стороны пленки	По отражению со стороны стекла	По пропусканию
L^*	63,66	52,36	65,48
a^*	-2,3	-9,52	-1,97
b^*	3,75	3,88	5,61

б) источник С, 2^0

	По отражению со стороны пленки	По отражению со стороны стекла	По пропусканию
L^*	63,65	52,32	65,48
a^*	-2,34	-9,46	-2,15
b^*	3,69	3,86	5,59

в) источник А, 2^0

	По отражению со стороны пленки	По отражению со стороны стекла	По пропусканию
L^*	63,65	51,61	65,69
a^*	-1,32	-8,98	-1,35
b^*	3,33	1,71	5,45

Из таблиц видно, что если по светлоте (L^*) различия не столь велики, то по другим параметрам (a^* и b^*) они весьма значительны. Поскольку цвет объектов в этой системе представлен более наглядно, приведем цветовые координаты в ней стекла с покрытием, параметры которого в системе XYZ были даны выше, в графическом варианте в двумерном пространстве $a^* b^*$, т.к. различия по светлоте не столь существенны. На рис. 2 указаны координаты, соответствующие пропусканию и отражению с обеих сторон и для разных источников (А, С, Д65).

Приведенные примеры убедительно показывают, как важно, чтобы цветовые параметры исходных материалов задавались с учетом того, как эти материалы будут наблю-

даться при их использовании на практике: на просвет, на отражение, при каком освещении преимущественно.

Цветовая разница объектов (или ее отсутствие) как в системе XYZ, так и в системе $L^* a^* b^*$, количественно определяется по разности величин соответствующих параметров ΔX , ΔY , ΔZ или ΔL^* , Δa^* , Δb^* :

$$\begin{aligned}\Delta X &= X_{\text{объект2}} - X_{\text{объект1}} & \Delta L^* &= L^*_{\text{объект2}} - L^*_{\text{объект1}} \\ \Delta Y &= Y_{\text{объект2}} - Y_{\text{объект1}} & \Delta a^* &= a^*_{\text{объект2}} - a^*_{\text{объект1}} \\ \Delta Z &= Z_{\text{объект2}} - Z_{\text{объект1}} & \Delta b^* &= b^*_{\text{объект2}} - b^*_{\text{объект1}}\end{aligned}$$

В области колориметрических измерений в системе $L^* a^* b^*$ иногда также принято указывать величину общей цветовой разницы ΔE^* , представляющую собой среднее квадратичное отклонение значений ΔL^* , Δa^* и Δb^* :

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} [6]$$

Но этот параметр не всегда является абсолютным критерием цветовых различий, что видно на следующем примере. Образец 1 имеет по отношению к эталону разности параметров (дельты): $\Delta L^* = 0,57$; $\Delta a^* = 0,57$; $\Delta b^* = 0,57$ и визуально хорошо с ним согласуется, а образец 2 от эталона визуально существенно отличается (менее зеленый) и характеризуется следующими дельтами: $\Delta L^* = 0,0$; $\Delta a^* = 1,0$; $\Delta b^* = 0,0$; т.е. для него все различия связаны параметром a^* . Тем не менее, оба образца имеют одинаковое значение ΔE_{ab}^* .

$$1 - \Delta E_{ab}^* = [(0,57)^2 + (0,57)^2 + (0,57)^2]^{1/2} = 1$$

$$2 - \Delta E_{ab}^* = [(0,0)^2 + (1,0)^2 + (0,0)^2]^{1/2} = 1$$

То есть применение параметра ΔE_{ab}^* как единственного критерия возможно не всегда и для большей надежности помимо него следует учитывать величины самих координат L^* , a^* , b^* . Выбор критерия зависит от вида продукции и требованиям к ней и определяется производителем (индивидуально). Так европейская ассоциация производителей листового стекла (GERVVP) считает, что параметр ΔE_{ab}^* не достаточно точно отражает цветовые различия и в требованиях к допустимым цветовым различиям ограничивается только предельными величинами ΔL^* , Δa^* и Δb^* [8]. В то же время в американском стандарте ASTM Standard C 1376-03 для стекол с покрытием для оценки цветовых различий используется именно параметр ΔE_{ab}^* [9].

Поскольку тип колориметрической системы не регламентируется ГОСТами, то выбор той или иной системы остается на усмотрение производителя. Но отметим, что хотя система $L^* a^* b^*$ более «наглядна», ее применение предусматривает сначала расчет X, Y, Z и последующий пересчет из них параметров L^*, a^*, b^* , соответственно, большое количество расчетов увеличивает трудоемкость и может приводить к дополнительному увеличению погрешностей, хотя это не так страшно для тех, кто оснащен современным оборудованием с компьютерным обеспечением. Кроме того, уже имеются колориметры, выдающие результаты сразу в $L^* a^* b^*$ координатах. Словом, при выборе системы надо учесть все нюансы.

Величины предельно допустимых расхождений, выбранных в качестве критерия параметров образца и параметров эталона, задаются исходя из предварительной специальной визуальной оценки цвета образцов и эталона для каждого вида стекольной продукции отдельно и могут различаться в зависимости от ее предназначения. Какие конкретно значения допусков в каких случаях приняты в качестве критерия «проходит/не проходит», статистика проводимых замеров – это предмет отдельного рассмотрения для конкретного вида продукции. Подчеркнем только еще раз, что для точных и правильных колориметрических измерений и расчетов необходимо оперировать в едином цветовом пространстве, с единым стандартным типом источника излучения и с единым 2° - или 10° -ным стандартным наблюдателем и выбор их также зависит от конкретного случая*. И, конечно, для получения точных и правильных колориметрических параметров необходимо проводить спектральные измерения с минимальной погрешностью и расчет проводить с малым шагом $\Delta\lambda$. Значения $\Delta\lambda$ составляют обычно 5 или 10 нм в зависимости от требуемой точности измерений и вида спектральной характеристики образца. При наличии избирательных полос в спектральной кривой точность особенно зависит от величины $\Delta\lambda$, и, чем она меньше, тем выше точность.

В заключение отметим, что сказанное о необходимости полного перехода к единым образцам, надежным и объективным цифровым критериям оценки цвета касается не только стекла для строительства, но и большинства видов стекольной продукции, в том числе тарного стекла.

*Примечание. В случае больших площадей обзора, что является типичным для стекла строительного предназначения, для лучшего согласования с усредненными визуальными оценками рекомендуется 10-градусный стандартный наблюдатель.

Литература.

1. М.И.Кривошеев, А.К.Кустарев. Цветовые измерения. М.:Энергоатомиздат, 1990.-240с.
2. Щепина Н.С. Основы светотехники. М.: Энергоатомиздат, 1985.-243с.
3. Основы оптической радиометрии . Под ред.проф.А.Ф.Котюка.-М.: Физматлит, 2003.-544с.- ISBN 5-9221-0427-6.
4. Publication CIE No 15. Colorimetry. Official recommendations of the International Commision on Illumination. Paris:1971.-124p.
5. ГОСТ 7721-89 Источники света для измерения цвета.
6. Supplement N 2 to CIE Publication N 15.Recomendations on uniform color space, color-difference equations, and metric color terms. 1976 – 19p. (CIE публ. № 15, прилож. 2, 1976г.)
7. ИСО 7724-1:84 Лаки и краски. Колориметрия. Ч.1.Основные положения.
8. GEPVP Code of Practice for in-situ Measurement and Evaluation of the Color of Coated Glass used in Facades. Bruxelles, 2005- 8p.
9. ASTM Standard C1376-03 “Standard Specification for Pyrolytic and Vacuum Deposition Coating on Flat Glass



Рис. 1. Отличающиеся по цвету элементы на фасаде здания

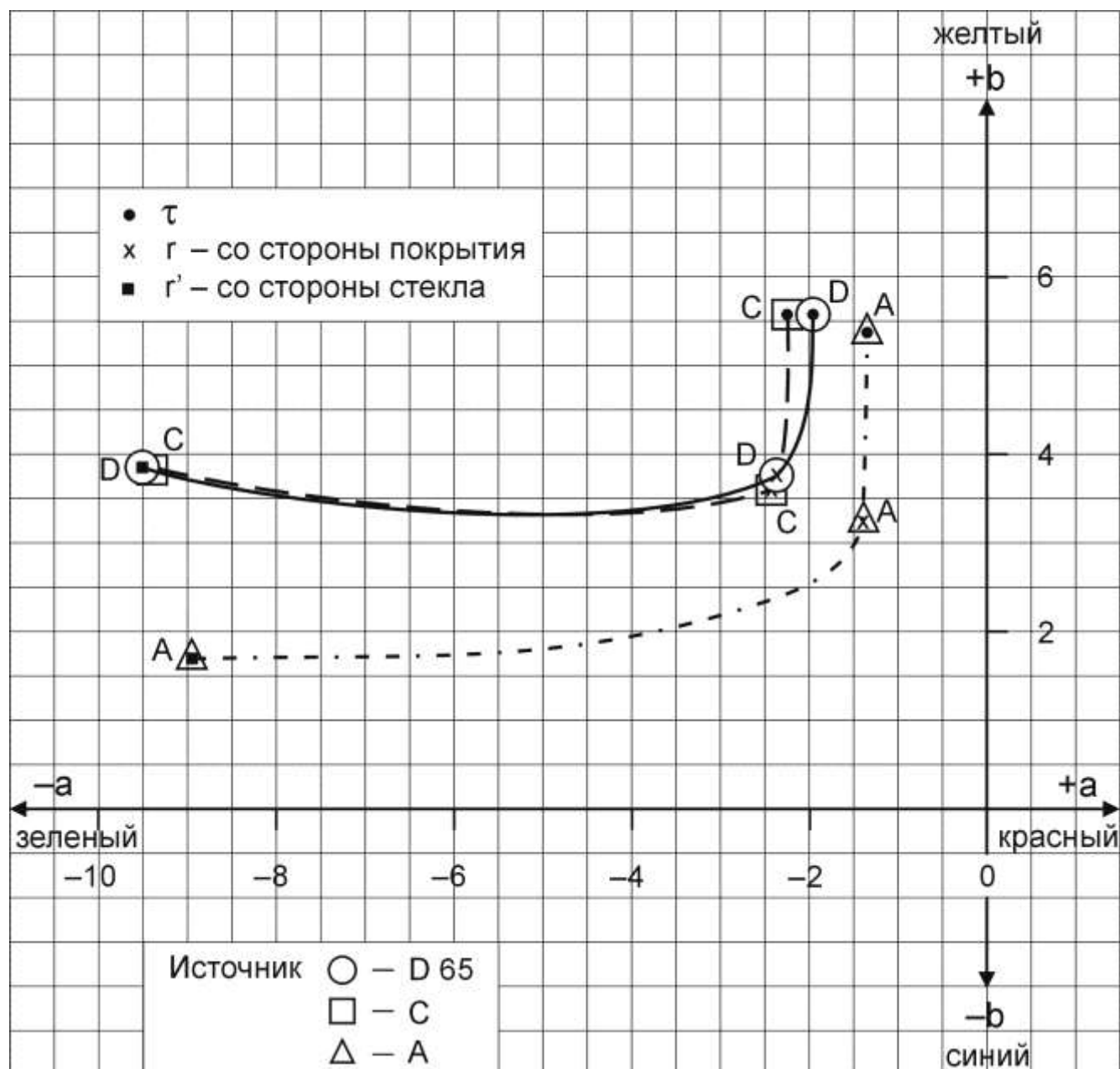


Рис. 2. Значения a^* и b^* для стекла с покрытием.

Обозначения: •...- по пропусканию, x - по отражению со стороны пленки, ■ - по отражению со стороны стекла, ○ - источник Д65, □ - источник C, △ - источник A. Стандартный наблюдатель – 2^0 .