

Расчет оптических и тепловых характеристик остекления

Стандарты ISO 9050, ISO 10292,
EN 673

Автор: Чесноков С.А., ОАО «Институт Стекла»

О чем рассказывается в ЭТОМ докладе

- Как самостоятельно рассчитать характеристики остекления по известным характеристикам его компонентов;
- Какие документы регламентируют методы расчета характеристик остекления.

О чем не будет рассказываться в этом докладе

- Как пользоваться различными программами (хотя на них можно посмотреть при наличии времени);
- Какие стекла и другие компоненты остекления следует использовать и какие использовать не стоит.

Цели расчетов характеристик остекления

- Проектирование остекления, необходимость учета требований нормативных документов, обеспечение эксплуатационных характеристик;
- Оценка характеристик существующего остекления, поиск способов улучшения его характеристик или качества здания в целом;
- Экспертиза в случае отказов, оценка обоснованности претензий потребителей.

Примеры программ расчета характеристик остекления

- LBNL Window (<http://windows.lbl.gov/software/window/window.html>) с пакетом THERM;
- Pilkington Spectrum (<http://www.pilkington.com/>) и Spectrum Online
- AGC YouGlass Toolbox (<http://www.yourglass.ru/>)
- Saint-Gobain Rubis

Расчет оптических характеристик остекления

- ISO 9050.2 2002E. Glass in building - Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
- ИСО 9050 Стекло в строительстве – Определение светопропускания, прямого солнечного пропускания, общего пропускания солнечной энергии, ультрафиолетового пропускания и соответствующие параметры остекления

Область применения ISO 9050

- Остекление с применением обычного стекла, а также с отражающими или поглощающими солнечное излучение стеклами;
- Одинарное, двойное и тройное остекление (приведены приемы расчета для большего количества слоев);
- Любые материалы, которые могут применяться в остеклении (с некоторыми оговорками, относящимися к оргстеклу).

Оптические характеристики остекления

- коэффициент спектрального пропускания $\tau(\lambda)$, коэффициент спектрального внешнего отражения $\rho_0(\lambda)$ и коэффициент спектрального внутреннего отражения $\rho_g(\lambda)$ в диапазоне длин волн от 300 нм до 2500 нм,
- коэффициент светопропускания τ_v , коэффициент внешнего отражения $\rho_{v,o}$ и коэффициент внутреннего отражения света $\rho_{v,i}$ для осветителя D_{65} .
- коэффициент прямого солнечного пропускания τ_e и коэффициент прямого солнечного отражения ρ_e ,
- коэффициент общего пропускания солнечной энергии (солнечный фактор) g ,
- коэффициент УФ-пропускания τ_{uv} ,
- индекс общей цветопередачи R_a .
- Для характеристики остекления принципиальными параметрами являются τ_v и g .

Коэффициент светопропускания

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} \tau(\lambda) D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda}$$

- где D_λ – относительное спектральное распределение мощности осветителя D_{65} (см ISO/CIE 10526:1991)
- $\tau(\lambda)$ - коэффициент спектрального пропускания остекления
- $V(\lambda)$ -спектральная эффективность освещения для стандартного фотометрического наблюдателя (см. ISO/CIE 10526:1991),
- $\Delta\lambda$ - интервал длин волн

Коэффициент спектрального пропускания $\tau(\lambda)$

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda)\rho_2(\lambda)}$$

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)}{[1 - \rho_1'(\lambda)\rho_2(\lambda)] \cdot [1 - \rho_2'(\lambda)\rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda)\rho_1'(\lambda)\rho_3(\lambda)}$$

Коэффициент наружного отражения $\rho_{v,0}$

$$\rho_{v,0} = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} \rho_0(\lambda) D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda}$$

$\rho_0(\lambda)$ - коэффициент наружного отражения остекления

$$\rho_0(\lambda) = \rho_1(\lambda) + \frac{\tau_1^2(\lambda) \rho_2(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda) \rho_2(\lambda)}$$

$$\rho_0(\lambda) = \rho_1(\lambda) + \frac{\tau_1^2(\lambda) \rho_2(\lambda) [1 - \rho_2'(\lambda) \rho_3(\lambda)] + \tau_1^2(\lambda) \tau_2^2(\lambda) \rho_3(\lambda)}{[1 - \rho_1'(\lambda) \rho_2(\lambda)] \cdot [1 - \rho_2'(\lambda) \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) \rho_1'(\lambda) \rho_3(\lambda)}$$

Коэффициент внутреннего отражения света остекления $\rho_{v,i}$

$$\rho_{v,i} = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} \rho_i(\lambda) D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda}$$

$\rho_i(\lambda)$ - спектральный коэффициент внутреннего отражения остекления

$$\rho_i(\lambda) = \rho_2'(\lambda) + \frac{\tau_2^2(\lambda) \rho_1'(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda) \rho_2(\lambda)}$$

$$\rho_i(\lambda) = \rho_3'(\lambda) + \frac{\tau_3^2(\lambda) \rho_2'(\lambda) [1 - \rho_2(\lambda) \rho_1'(\lambda)] + \tau_3^2(\lambda) \tau_2^2(\lambda) \rho_1'(\lambda)}{[1 - \rho_3(\lambda) \rho_2'(\lambda)] \cdot [1 - \rho_2(\lambda) \rho_1'(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) \rho_3(\lambda) \rho_1'(\lambda)}$$

Коэффициент общего пропускания солнечной энергии (солнечный фактор)

$$g = \tau_e + q_i$$

Коэффициент общего пропускания солнечной энергии g есть сумма прямого солнечного пропускания τ_e и коэффициента вторичной теплопередачи q_i извне во внутреннее пространство.

τ_e is the solar direct transmittance (see 3.5.3)
 ρ_e is the solar direct reflectance (see 3.5.4)
 α_e is the solar direct absorptance (see 3.5.5)

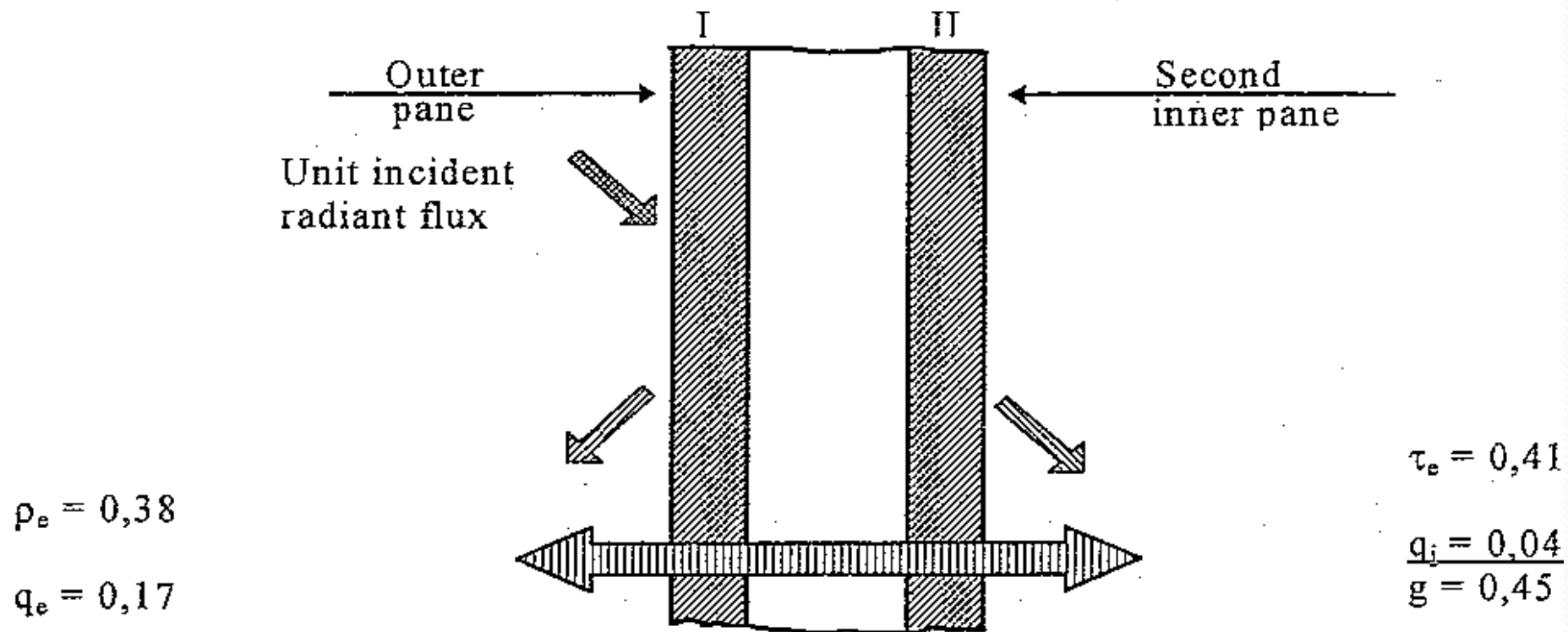


Figure 1 - Division of the incident radiant flux for a double glazing unit

Коэффициент прямого солнечного пропускания τ_e

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} \tau(\lambda) S_{\lambda} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} S_{\lambda} \Delta\lambda}$$

S_{λ} - относительное спектральное
распределение солнечного излучения
 $\tau(\lambda)$ - коэффициент спектрального
пропускания остекления

Коэффициент прямого солнечного отражения ρ_e

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{2500} \rho_0(\lambda) S_\lambda \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{2500} S_\lambda \Delta\lambda}$$

Коэффициент прямого
солнечного поглощения α_e

$$\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1$$

Коэффициент вторичной теплопередачи во внутреннее пространство q_i

$$q_i = \alpha_e \frac{h_i}{h_e + h_i}$$

$$q_i = \frac{\left(\frac{\alpha_{e1} + \alpha_{e2} + \alpha_{e2}}{h_e} + \frac{\alpha_{e2}}{\Lambda} \right)}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda} \right)}$$

$$q_i = \frac{\frac{\alpha_{e1} + \alpha_{e2} + \alpha_{e3} + \dots + \alpha_{en}}{h_e} + \frac{\alpha_{e2} + \alpha_{t3} + \dots + \alpha_{en}}{\Lambda_{12}} + \frac{\alpha_{e3} + \dots + \alpha_{en}}{\Lambda_{23}} + \dots + \frac{\alpha_{en}}{\Lambda_{(n-1)n}}}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda_{12}} + \frac{1}{\Lambda_{23}} + \dots + \frac{1}{\Lambda_{(n-1)n}}}$$

Коэффициенты теплопередачи в наружное пространство h_e и во внутреннее пространство h_i

- стандартные значения для h_e и h_i :
- $h_e = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- $h_i = (3,6 + 4,4\varepsilon_i / 0,837) \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$,
где
- ε_i - скорректированная излучательная способность внутренней поверхности (для натрийсиликатного стекла $\varepsilon_i = 0,837$ и $h_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

Коэффициент общего пропускания солнечной энергии

- Количество общей солнечной энергии, прошедшей в помещение через единицу площади остекления, определяется уравнением:

$$\phi_{ei} = \phi_e g$$

где ϕ_e - поток солнечного излучения на единицу площади

Коэффициент УФ-пропускания τ_{uv}

$$\tau_{uv} = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{380nm} \tau(\lambda) S_{\lambda} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{380nm} S_{\lambda} \Delta\lambda}$$

Коэффициент вредного воздействия Крохмана (CIE damage factor)

$$\tau_{df} = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{600nm} \tau(\lambda) CDF_{\lambda} S_{\lambda} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{600nm} CDF_{\lambda} S_{\lambda} \Delta\lambda}$$

$$CDF_{\lambda} = e^{-0,012 \lambda} \quad \text{with } \lambda \text{ in nm}$$

Коэффициент защиты кожи (Skin protection factor)

$$SPF = \left(\frac{\sum_{\lambda=300nm}^{400nm} \tau(\lambda) E_{\lambda} S_{\lambda} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{400nm} E_{\lambda} S_{\lambda} \Delta\lambda} \right)^{-1} \quad (33)$$

where:

S_{λ} is the relative spectral distribution of solar radiation

E_{λ} is the CIE Erythral Effectiveness spectrum

$\tau(\lambda)$ is the spectral transmittance of the glazing (see 3.3)

Расчет сопротивления теплопередаче и величины U

- EN 673:1998 Glass in building – Determination of thermal transmittance (U value) – Calculation method
- ISO 10292 1994E Glass in building - Calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing
- Стекло в строительстве – определение коэффициента теплопередачи остекления (величины U) – расчетный метод

Область применения EN 673 и ISO 10292

- Стекло без покрытия, с покрытием и материалы, непрозрачные в дальнем инфракрасном диапазоне, к которым относятся изделия из натрий-кальций-силикатного стекла (в дальнейшем называемые натриево-кальциевым стеклом), боросиликатное стекло и стеклокерамика.
- Многослойное остекление, состоящему из таких стекол и/или материалов.
- **Не применим** к многослойному остеклению, которое включает листы или пленки в газовых промежутках, прозрачные в дальнем инфракрасном диапазоне.
- Краевые эффекты, вызываемые тепловым мостиком через дистанционную рамку или оконную раму, не учитываются. Кроме того, перенос энергии за счет солнечного излучения также не принимается во внимание.

Величины R и U

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i}$$

где:

h_e и h_i – внешний и внутренний коэффициенты теплообмена;

h_t – полная теплопроводность остекления.

Полная теплопроводность остекления h_t

$$\frac{1}{h_t} = \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j r_j$$

где

h_s – теплопроводность каждого газового промежутка;

N – количество газовых промежутков;

d_j – толщина каждого слоя материала;

r_j – термическое сопротивление каждого материала (1,0 м К/Вт);

M – количество слоев материалов.

$$h_s = h_r + h_g$$

h_r – проводимость излучением;

h_g – проводимость газа.

Проводимость излучением h_r

$$h_r = 4\sigma \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} T_m^3$$

где

σ – постоянная Стефана-Больцмана;

T_m – средняя абсолютная температура газового промежутка;

ε_1 и ε_2 – приведенные коэффициенты эмиссии ограждающих поверхностей при температуре T_m .

Проводимость газа h_g

$$h_g = Nu \frac{\lambda}{s}$$

s – ширина промежутка;

λ – теплопроводность;

Nu – число Нуссельта;

$$Nu = A(Gr Pr)^n$$

где

A – константа;

Gr – число Грасгофа;

Pr – число Прандтля;

n – показатель степени.

Проводимость газа h_g (продолжение)

$$Gr = \frac{9,81s^3 \Delta T \rho^2}{T_m \mu^2}$$

$$Pr = \frac{\mu c}{\lambda}$$

ΔT – разница температур между поверхностями стекол, ограждающих газовый промежуток;

ρ – плотность газа;

μ – динамическая вязкость газа;

c – удельная теплоемкость газа;

T_m – средняя температура газа.

Если полученное Nu меньше 1, то в уравнение для h_g вместо значения Nu подставляется единица.

Вертикальное, горизонтальное, наклонное остекление

- Для вертикального остекления:
- A равно 0,035;
- n равно 0,38.
- Для горизонтального или наклонного остекления и восходящего потока тепла увеличивается передача тепла за счет конвекции.
- Этот эффект учитывается путем подстановки в уравнение для Nu следующих значений A и n :
- Горизонтальные промежутки: $A = 0,16$, $n = 0,28$;
- Промежутки под углом 45° : $A = 0,10$, $n = 0,31$.
- Для промежуточных значений угла удовлетворительной является линейная интерполяция.
- При нисходящем потоке тепла конвекцию следует считать подавленной в реальных случаях и в уравнение для h_g подставляется $Nu = 1$.

Коэффициент эмиссии

- Для поверхности натрий-кальциевого стекла без покрытия или для поверхностей натрий-кальциевого стекла с покрытиями, не оказывающими влияния на коэффициент эмиссии, следует использовать значение приведенного коэффициента эмиссии равное 0,837.
- С приемлемой точностью то же значение может быть использовано для боросиликатного стекла без покрытия и стеклокерамики.
- Для других поверхностей с покрытием приведенный и нормальный коэффициенты эмиссии определяют измерением.

Свойства газа

- Для расчета требуются следующие свойства газа, заполняющего межстекольное пространство:
- Удельная теплопроводность λ ;
- Плотность ρ ;
- Динамическая вязкость μ ;
- Удельная теплоемкость c .
- Для всех встречающихся на практике газовых смесей свойства газа пропорциональны соотношению объемных долей F_1, F_2, \dots , с достаточной точностью.

Инфракрасное поглощение газа

- Некоторые газы поглощают инфракрасное излучение в диапазоне от 5 μm до 50 μm . Если такой газ используется в сочетании с покрытием, обладающим коэффициентом эмиссии менее 0,2, влияние этого эффекта пренебрежимо мало из-за низкой плотности результирующего потока инфракрасного излучения.

Коэффициент внешнего теплообмена h_e

- Приблизительно можно считать, что h_e зависит от скорости ветра вблизи остекления v по следующему закону:

$$h_e = 10,0 + 4,1 v$$

- Для обычных вертикальных стеклянных поверхностей значение h_e устанавливается равным 23 Вт/(м²·К) для целей сравнения значений R и U остекления.
- Примечание - Обратное значение $1/h_e$ равно 0,04 м²·К/Вт и выражается с точностью до двух десятичных знаков.

Коэффициент внутреннего теплообмена h_i

- Коэффициент внутреннего теплообмена h_i вычисляется по следующей формуле:
- $$h_i = h_r + h_c$$
- Где h_r – проводимость за счет излучения;
- h_c – конвекционная проводимость.
- Проводимость за счет излучения для поверхности натриево-кальциевого стекла без покрытия равна $4,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Если внутренняя поверхность остекления имеет пониженный коэффициент эмиссии, проводимость излучением дается следующим выражением:

$$h_r = 4,4 \varepsilon / 0,837$$

- Где ε – приведенный коэффициент эмиссии поверхности с покрытием;
- $0,837$ – приведенный коэффициент эмиссии натриево-кальциевого стекла без покрытия (см. 6.1).
- Это выражение применимо лишь в случае отсутствия на поверхности с покрытием конденсации.
- Значение h_c равно $3,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в случае свободной конвекции.
- Для вертикального натриево-кальциевого стекла и свободной конвекции:
- $$h_i = 4,4 + 3,6 = 8,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$
- Примечание - Обратное значение $1/h_i$ для поверхности натрий-кальциевого стекла равно $0,13 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ и выражается двумя десятичными знаками.

Проектные значения

- Проектные значения R и U , подходящее для расположения остекления и условий окружающей среды, должно вычисляться с использованием правильных граничных значений h_s , h_e и h_i , которые следует определить учитывая климатические и другие географические особенности региона применения.

Объявляемые значения:

стандартизованные граничные условия

$$r \quad 1,0 \text{ м}\cdot\text{К}/\text{Вт}$$

$$\varepsilon \quad 0,837$$

$$\Delta T \quad 15 \text{ К}$$

$$T_m \quad 283 \text{ К}$$

$$\sigma \quad 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}^4)$$

$$h_e \quad 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$$

$$h_i \quad 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$$

$$A \quad 0,035$$

$$n \quad 0,38$$

Процедура последовательных приближений для расчета U и R

Для остекления с более чем одним газовым промежутком ($N > 1$), расчет следует проводить по итерационной процедуре, в которой проводимость газового промежутка h_s каждого газового промежутка определяется при средней температуре 283 К (при этом достигается достаточная точность, поскольку влиянием малых отклонений от 283 К можно пренебречь).

На первом шаге итерационной процедуры для каждого промежутка используется разница температур $\Delta T = 15/N$ (К).

После расчета проводимостей газовых промежутков h_s , значение новой ΔT_s для каждого промежутка следует найти из уравнения:

$$\Delta T_s = \left(\frac{1/h_s}{\sum_1^N 1/h_s} \right)$$

Спасибо за внимание!

- Для связи:
- sachesnokov@me.com