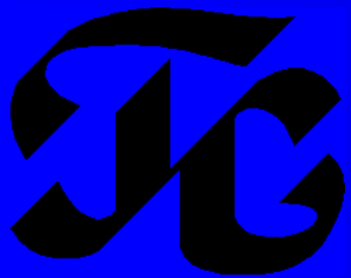




Применение энергоэффективных стекол в современном остеклении

А.Г. Чесноков

ОАО «Институт Стекла»,
Испытательный центр «Стекло»



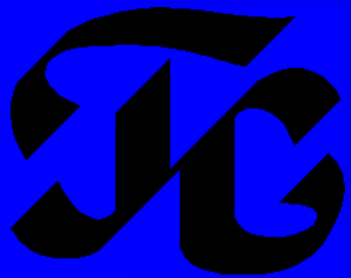
Что такое энергоэффективное остекление?

- Расходы на отопление →
- Расходы на кондиционирование → min
- Расходы на освещение →



Не надо забывать:

- Санитарно-гигиенические нормы – обеспечение нормальной температуры и естественной освещенности в помещении;
- Катастрофические ситуации – отключения отопления и электроэнергии



Энергетический баланс остекления

$$E = U - \frac{\eta \cdot g \cdot f \cdot H_p}{D_p} = U - g \cdot S$$

D – градус-день [К*сутки]

η - коэффициент использования

H – падающее солнечное излучение при
отсутствии помех [кВт*ч/м²]

g – полное пропускание солнечной
энергии остеклением (солнечный
коэффициент)

U – коэффициент пропускания
тепловой энергии (т.н. U-значение)
[Вт/(м²*К)]

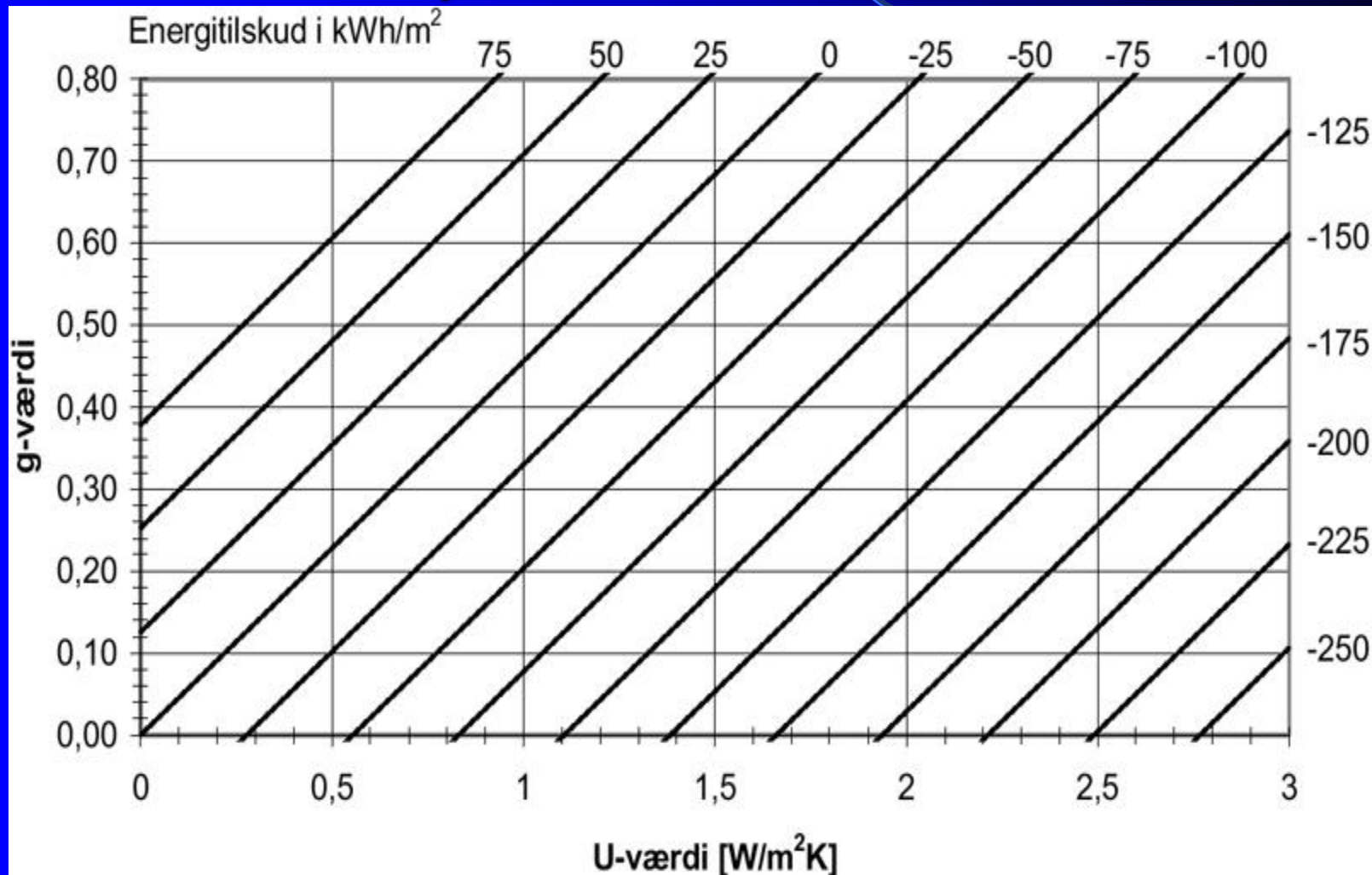
f – коэффициент, зависящий от того,
насколько стекло чистое, и затенения


S – функция H и D, характеризующая
регион применения [Вт/(м²*К)]

E – значение энергетического баланса
[Вт/(м²*К)]



Номограмма енергетического баланса





Основные расчетные формулы

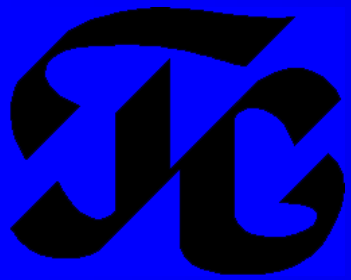
$$R_T = \frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i}$$

R_T – сопротивление теплопередаче в $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$

h_e – коэффициент теплоотдачи с поверхности стеклопакета, обращенной на улицу (т.н. внешний коэффициент теплоотдачи);

h_i – коэффициент теплоотдачи с поверхности стеклопакета, обращенной в помещение (т.н. внутренний коэффициент теплоотдачи)

h_t – теплопроводность остекления



Основные расчетные формулы (Продолжение)

$$\frac{1}{h_t} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{h_{s_k}} + \sum_{m=1}^M d_m r_m$$

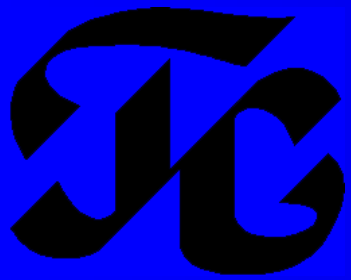
h_{s_k} – пропускание газового промежутка;

N – количество промежутков;

M – количество материалов;

d_m – суммарная толщина m -го материала, т.е. сумма толщин выполненных из него элементов;

r_m – термическое сопротивление m -го материала, термическое сопротивление натрий-кальций-силикатного стекла составляет $1 \text{ м} \cdot \text{К} / \text{Вт}$




Основные расчетные формулы (Продолжение)

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

σ - константа Стефана-Больцмана;

ε_1 и ε_2 – скорректированные излучательные способности стекол при средней абсолютной температуре газового промежутка T_m



Основные расчетные формулы (Продолжение)

$$h_s = h_g + h_r; \quad h_g = Nu \frac{\lambda}{s}; \quad Nu = A(Gr \cdot Pr)^n$$

h_r – радиационная проводимость;

h_g – газовая проводимость (теплопроводность и конвекция)

s – ширина промежутка в метрах (м);

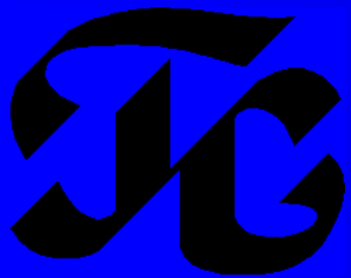
λ - коэффициент теплопроводности газа в [Вт/(м*К)];

Nu – число Нуссельта; A – константа;

Gr – число Грасхофа;

Pr – число Прантля;

n – показатель степени



Основные расчетные формулы (Продолжение)

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

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

ΔT – разность температур между листами стекла, окружающими газовый промежуток в (К);

ρ - плотность газа в (кг/м³);

μ - динамическая вязкость газа в [кг/(м*с)];

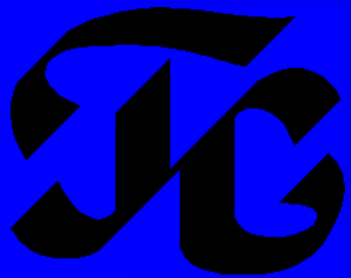
c – теплоемкость газа в [Дж/(кг*К)];

T_m – средняя температура газа (К)



Свойства газов

Газ	Температура, θ $^{\circ}\text{C}$	Плотность, ρ $\text{кг}/\text{м}^3$	Динамическая вязкость, μ $10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}^*\text{с})$	Теплопроводность, λ $10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}^*\text{К})$	Теплоемкость, c 10^3 $\text{Дж}/(\text{кг}^*\text{К})$
Воздух	- 10	1,326	1,661	2,336	1,008
	0	1,277	1,711	2,416	
	+ 10	1,232	1,761	2,496	
	+ 20	1,189	1,811	2,576	
Аргон	- 10	1,829	2,038	1,584	0,519
	0	1,762	2,101	1,634	
	+ 10	1,699	2,164	1,684	
	+ 20	1,640	2,228	1,734	
Гексафторид серы SF_6	- 10	6,844	1,383	1,119	0,614
	0	6,602	1,421	1,197	
	+ 10	6,360	1,459	1,275	
	+ 20	6,118	1,497	1,354	
Криптон	- 10	3,832	2,260	0,842	0,245
	0	3,690	2,330	0,870	
	+ 10	3,560	2,400	0,900	
	+ 20	3,430	2,470	0,926	



Основные расчетные формулы (Продолжение)

$$h_e = 10,0 + 4,1v \quad h_i = h_r + h_c$$

$$h_r = \frac{4,4\varepsilon}{0,837}$$

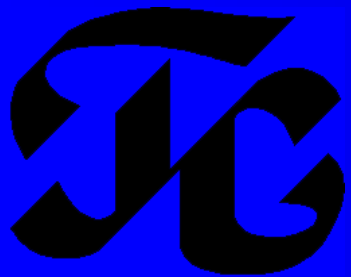
v – скорость в (м/с);

h_r – радиационная проводимость;

h_c – конвекционная проводимость, составляющая 3,6 Вт/(м²*К);

ε - скорректированная излучательная способность поверхности с покрытием;

0,837 – скорректированная излучательная способность прозрачного стекла без покрытия .



Справочные значения

Термическое сопротивление натрий-кальций-силикатного стекла $r = 1 \text{ м}^*\text{К}/\text{Вт}$

Скорректированная излучательная способность обычной стекольной поверхности $\varepsilon = 0,837$

Разница температур между внешними поверхностями внешних стекол, используемая в целях сравнения с расчетами, выполненными по ИСО 10292:1994 или prEN 673 $\Delta T = 15 \text{ К}$

Средняя температура остекления, используемая в целях сравнения с расчетами, выполненными по ИСО 10292:1994 или prEN 673 $T_m = 283 \text{ К}$

Константа Стефана-Больцмана

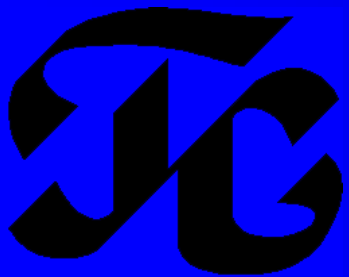
$$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$$

Коэффициент внешней теплоотдачи

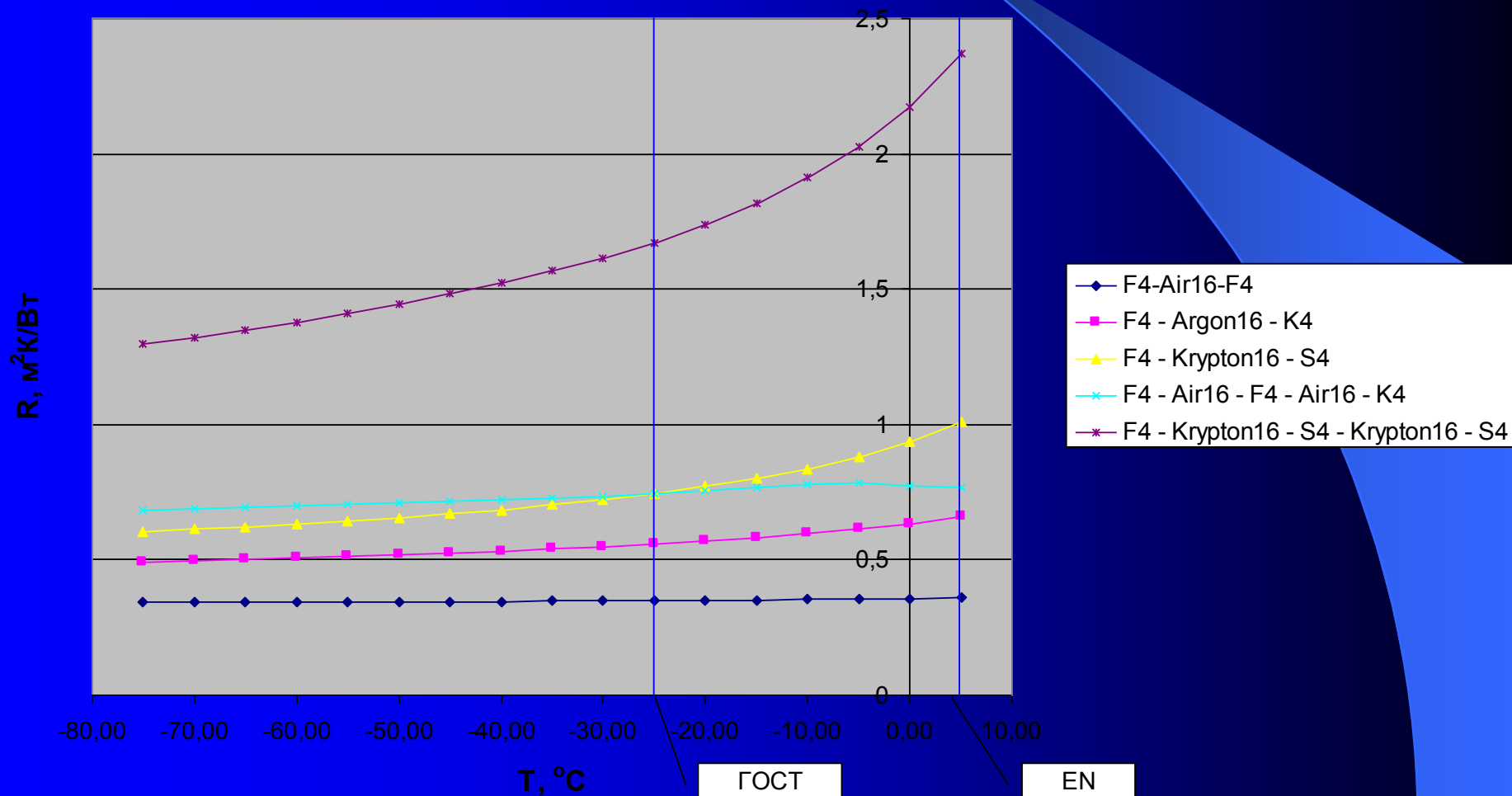
$$h_e = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$$

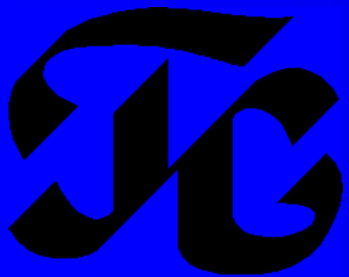
Коэффициент внутренней теплоотдачи

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

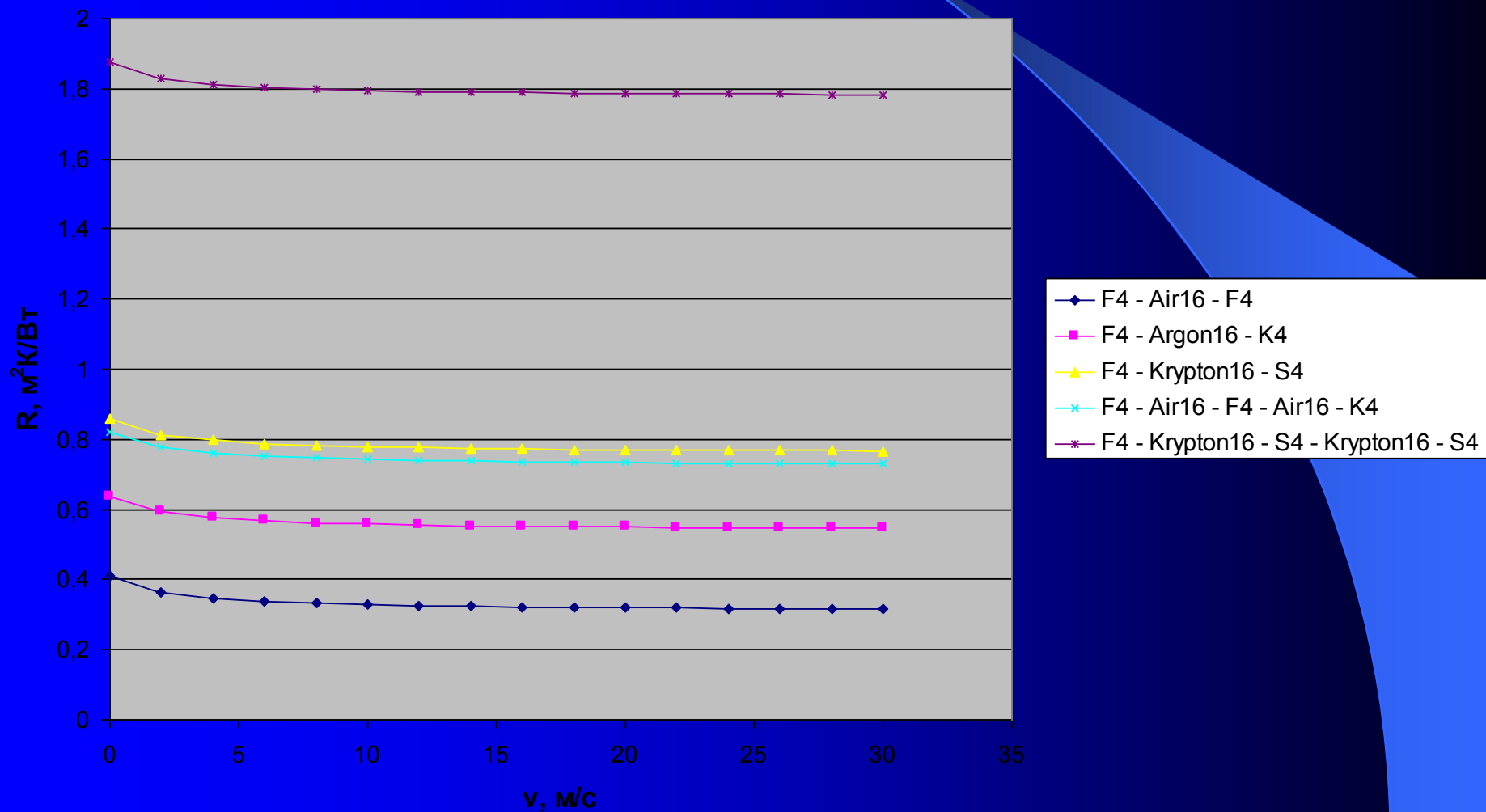


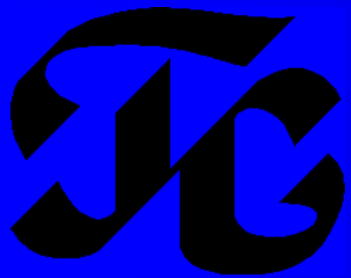
Зависимость $R=1/U$ от уличной температуры





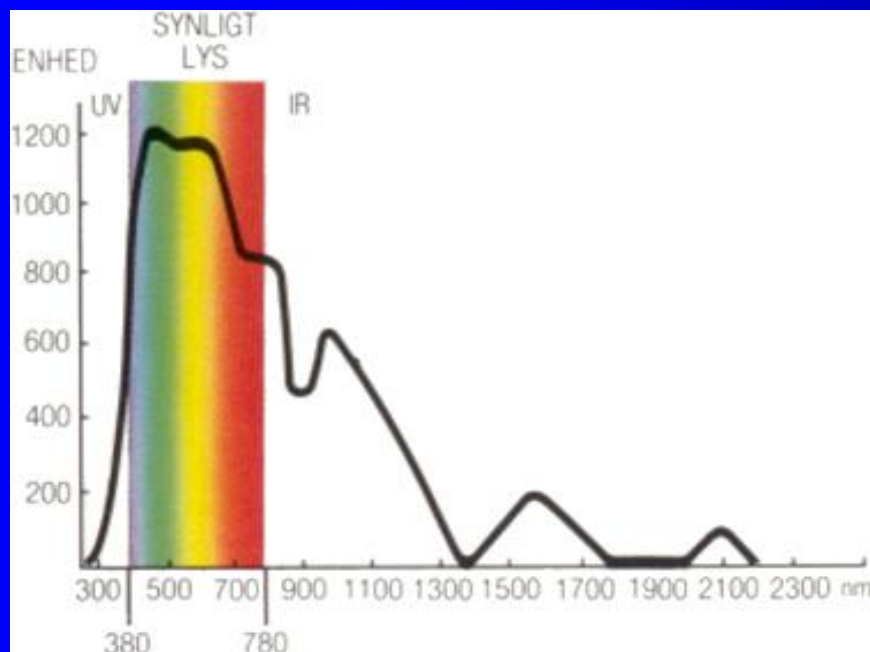
Зависимость R от силы ветра v



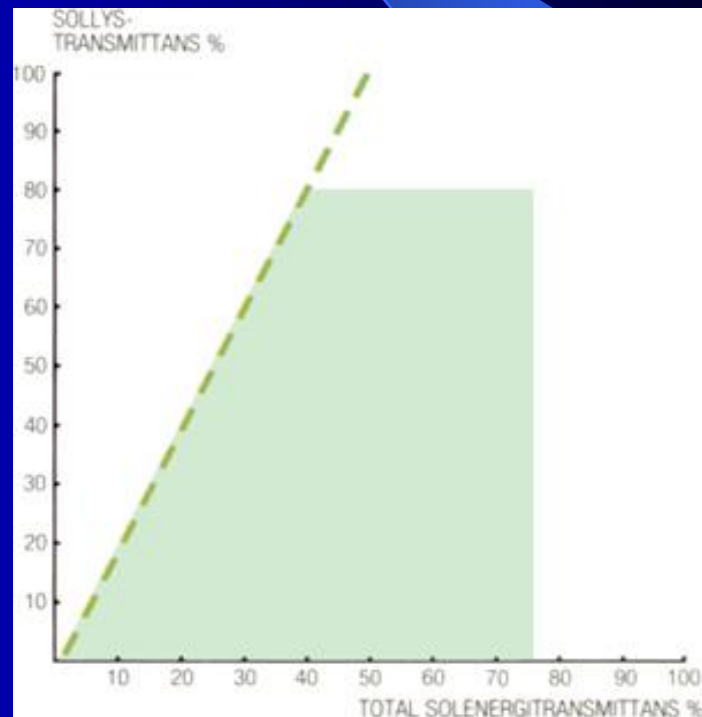


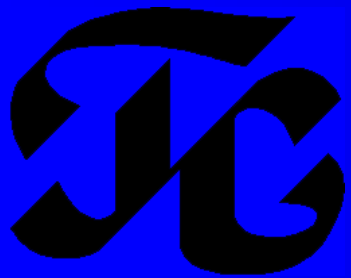
Спектр излучения Солнца

**Solar radiation:
UV + LIGHT + IR**



Solar Light and g-factor





Основные расчетные формулы (Продолжение)

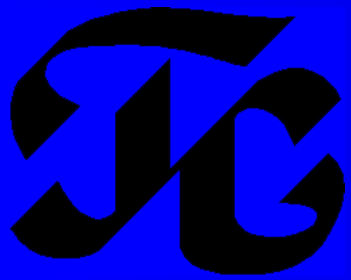
$$\tau_v = \frac{\int_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} D_\lambda \tau(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} D_\lambda V(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\sum_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} D_\lambda \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}}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

τ_v - коэффициент пропускания видимого света

D_λ - относительное распределение спектральной мощности осветителя (в России принят источник света А);

$\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания остекления;

$V(\lambda)$ – функция эффективности свечения, определяющая стандартного наблюдателя для фотометрии

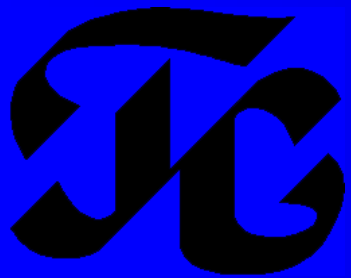


Основные расчетные формулы (Продолжение)

$$\tau_e = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} S_{\lambda} \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} S_{\lambda} d\lambda} \approx \frac{\sum_{\lambda=0}^{\infty} S_{\lambda} \tau(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=0}^{\infty} S_{\lambda} \Delta\lambda}$$

τ_e - коэффициент пропускания солнечного света

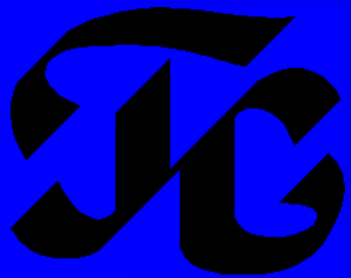
S_{λ} - спектральное распределение солнечного излучения



Основные расчетные формулы (Продолжение)

$$g = \tau_e + q_i$$

q_i - фактор вторичной теплопередачи остекления



Основные расчетные формулы (Продолжение)

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

α_{e1} - коэффициент поглощения солнечного света наружным листом остекления;

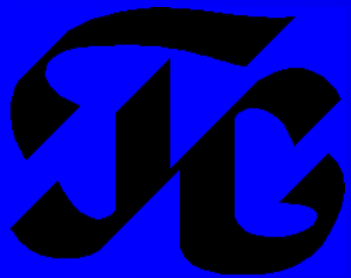
α_{e2} - коэффициент поглощения солнечного света внутренним листом остекления;

Λ - теплопередача между наружным и внутренним листами остекления



Основные расчетные формулы (Продолжение)

$$\alpha_1(\lambda) = 1 - \tau_1(\lambda) - \rho_1(\lambda)$$



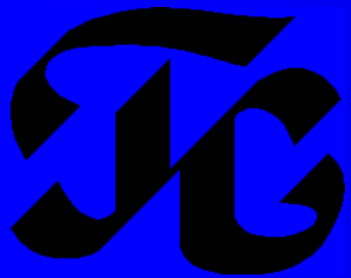
Основные расчетные формулы (Продолжение)

$$R_n = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} R_n(\lambda_i) \quad \varepsilon_n = 1 - R_n$$

R_n - нормальное отражение;

$R_n(\lambda_i)$ - коэффициент спектрального отражения;

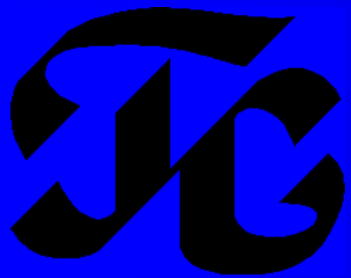
ε_n - нормальная излучательная способность



Основные расчетные формулы (Продолжение)

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)}{1 - \rho'_1(\lambda)\rho_2(\lambda)}$$

ρ - коэффициент отражения видимого света



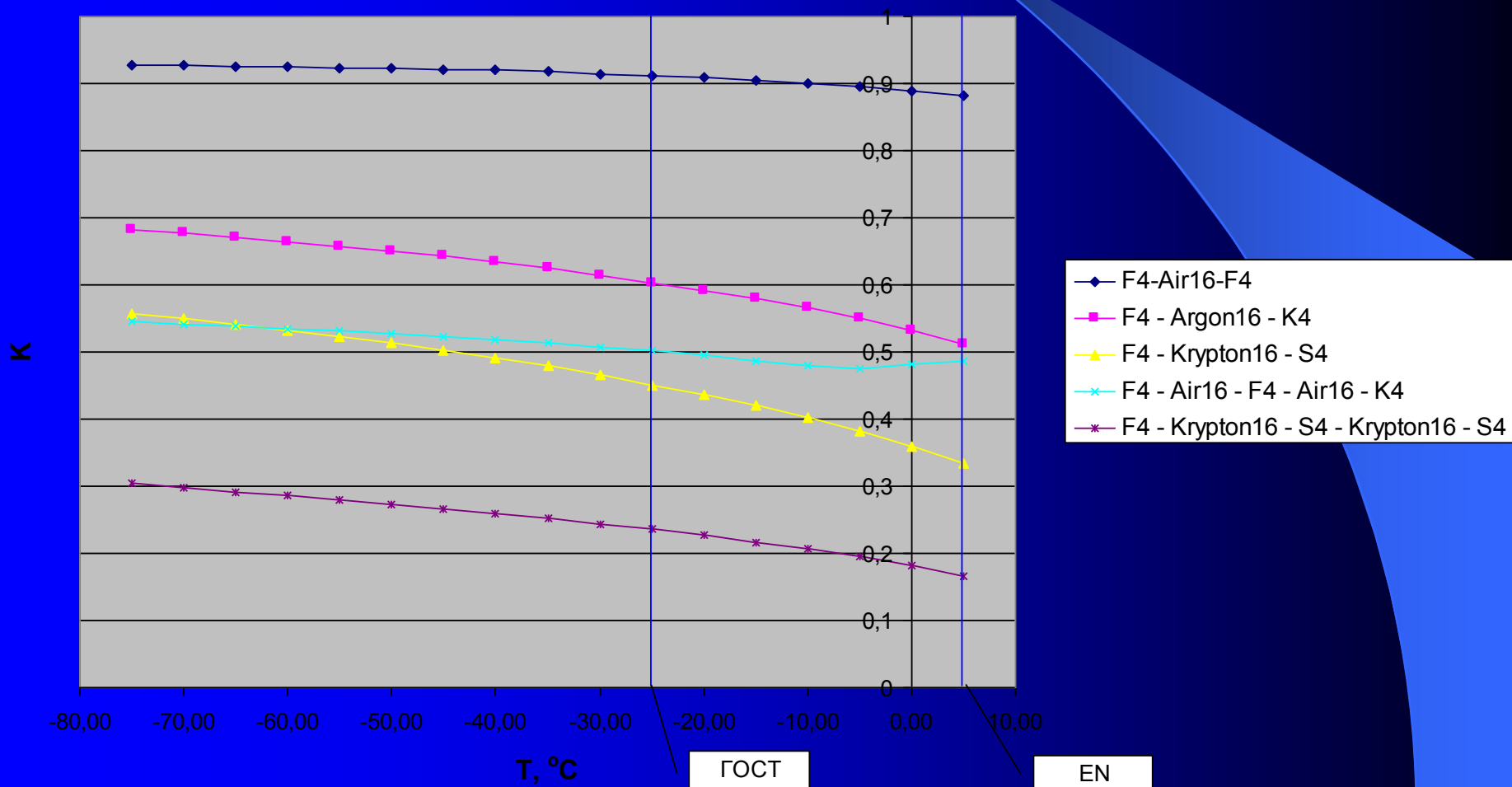
Основные расчетные формулы (Продолжение)

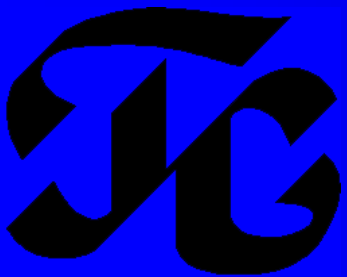
$$K = (1/U_{\text{б}} * t_{\text{вб}}) / (1/U * t_{\text{в}})$$

K — коэффициент энергетической эффективности базовый вариант (характеристики с индексом б) - наиболее широко распространенный в жилищном строительстве вариант остекления: два стекла марки $M_{\text{б}}$ толщиной 4 мм каждое, разделенных воздушным промежутком толщиной 100 мм

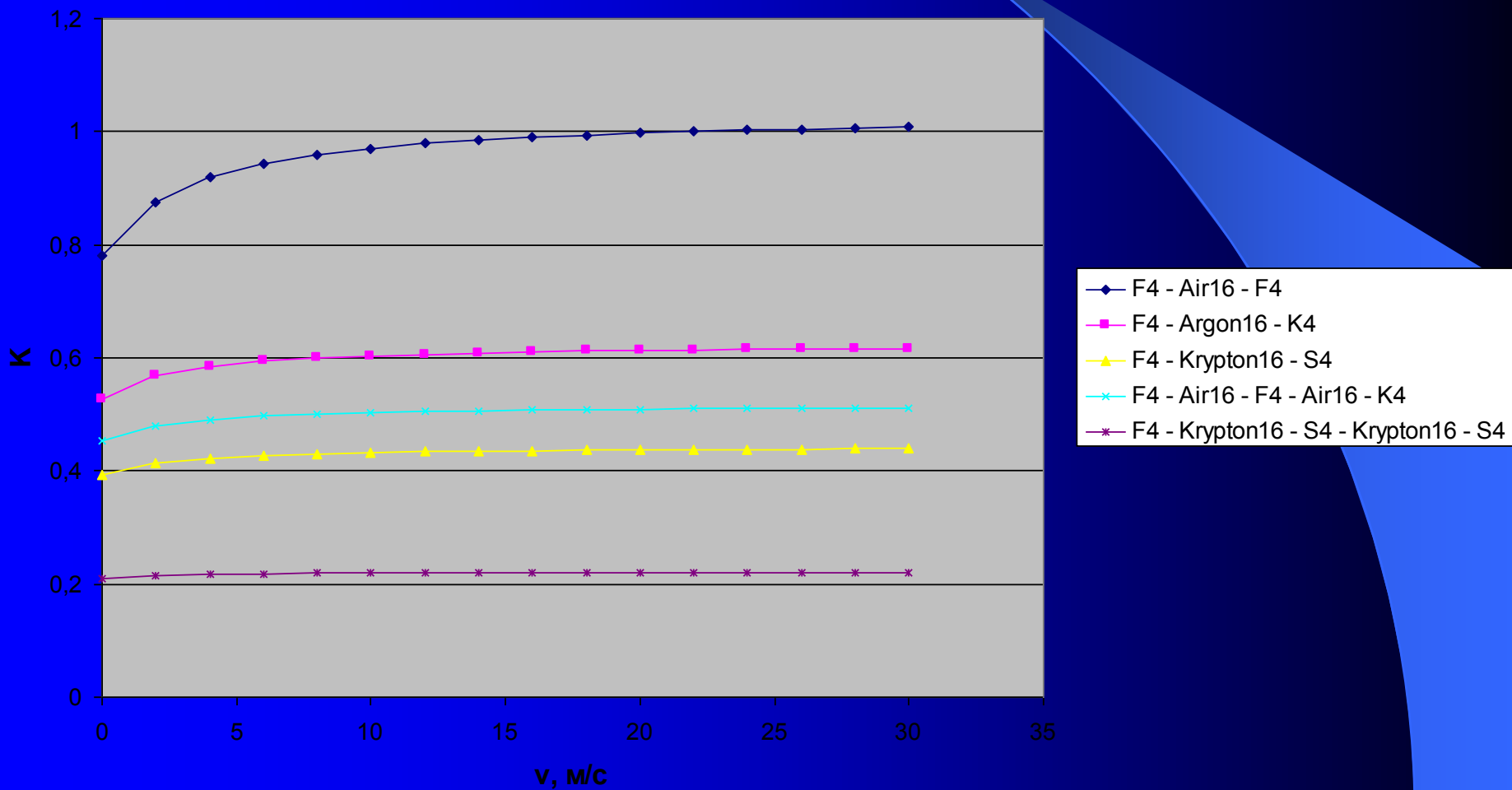


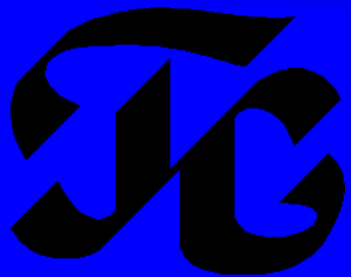
Зависимость К от уличной температуры





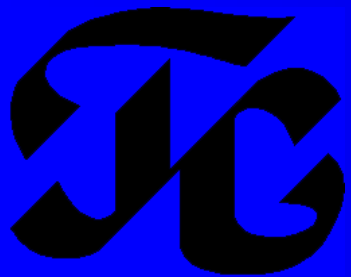
Зависимость K от силы ветра v





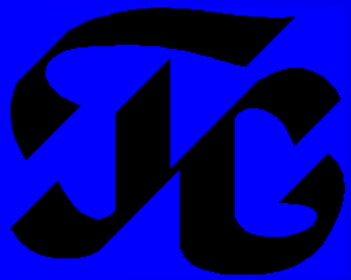
Расчет потерь энергии в кВт*ч

Размещение	Отопительный сезон	Градус-день, D, К*сутки	Солнечное излучение, Н, кВт*ч/м ²			U остекления, Вт/м ² *К	g остекления	Ориентация	eta	f	S	E	Потери энергии, кВт*ч
			Север	Запад/Восток	Юг								
Бельгия (Уккле)	Сентябрь/Май	2900	202	350	505	2,9	0,75	Юг	0,6	0,8	3,483	0,288	20,04
Дания (Копенгаген)	Сентябрь/Май	2936	100	225	420	2,9	0,75	Юг	0,6	0,8	2,861	0,754	53,15
Шотландия	Сентябрь/Май	3200	176	303	452	2,9	0,75	Юг	0,6	0,8	2,825	0,781	60,00
Япония (Саппоро)	Сентябрь/Июнь	3757	175	443	709	2,9	0,75	Юг	0,6	0,8	3,774	0,069	6,25
Москва ст. окна	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	2,86	0,75	Юг	0,6	0,8	1,850	1,473	160,50
Москва	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	2,86	0,75	Север	0,6	0,8	0,440	2,530	275,70
Москва	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	2,86	0,75	Запад/Восток	0,6	0,8	0,991	2,117	230,70
Москва 4М-4К	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	1,74	0,76	Юг	0,6	0,8	1,850	0,334	36,42
Москва	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	1,74	0,76	Север	0,6	0,8	0,440	1,405	153,16
Москва	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	1,74	0,76	Запад/Восток	0,6	0,8	0,991	0,987	107,56
Москва 4М-4И	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	1,43	0,51	Юг	0,6	0,8	1,850	0,487	53,03
Москва	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	1,43	0,51	Север	0,6	0,8	0,440	1,205	131,37
Москва	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	1,43	0,51	Запад/Восток	0,6	0,8	0,991	0,925	100,77
Москва SSCC4-F4-K4	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	1,11	0,43	Юг	0,6	0,8	1,850	0,315	34,29
Москва	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	1,11	0,43	Север	0,6	0,8	0,440	0,921	100,33
Москва	Сентябрь/Апрель	4541	100	225	420	1,11	0,43	Запад/Восток	0,6	0,8	0,991	0,684	74,53



Изменение потерь энергии в зависимости от типа остекления

Размещение	Ориентация	Потери энергии, кВт*ч			Сокращение потерь, %		
Москва ст. окна	Юг	160,50					
Москва	Север		275,70				
Москва	Запад/Восток			230,70			
Москва 4М-4К	Юг	36,42			77%		
Москва	Север		153,16			44%	
Москва	Запад/Восток			107,56			53%
Москва 4М-4И	Юг	53,03			67%		
Москва	Север		131,37			52%	
Москва	Запад/Восток			100,77			56%
Москва SSCC4-F4-K4	Юг	34,29			79%		
Москва	Север		100,33			64%	
Москва	Запад/Восток			74,53			68%



Выводы

1. При проектировании остекления необходимо учитывать:
 - ориентацию окна по сторонам света;
 - климатические факторы местности;
 - назначение помещения.
2. Необходимо использовать различные стекла в разных ситуациях:
 - низкоэмиссионные с твердым или мягким покрытием;
 - солнцезащитные;
 - прозрачные.
3. Кроме технических необходимо учитывать экономические и социальные факторы.



По всем интересующим
вопросам обращайтесь к
докладчику или в:

ОАО «Институт стекла»

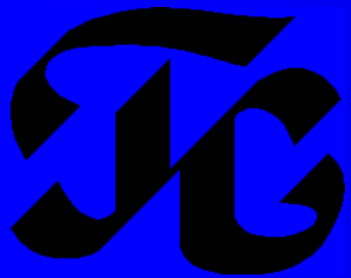
111024, Москва, ул. Душинская, д.7

+7 095 363-9687, 361-1502 (тел)

+7 095 363-9688 (факс)

E-mail: [stateglass @ co. ru](mailto:stateglass@co.ru);

stas_tchesn@mtu-net.ru



Спасибо за внимание!