

Součinitel prostupu tepla izolačních skel ve vztahu k úniku inertních plynů

Jiří Vaverka – Jiří Dvořáček

Článek poukazuje na velmi závažný problém kvality izolačních skel. V praxi jsou časté příklady nedodržení požadované koncentrace inertních plynů již při výrobě izolačních skel. Deklarované hodnoty součinitelů prostupu tepla $U = 1,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ jsou při měřeních v akreditovaných laboratořích dosahovány pouze výjimečně a běžně jsou u těchto izolačních skel naměřeny hodnoty součinitelů prostupu tepla až o 20 % vyšší. Přičteme-li k tomu ještě další pokles koncentrace plynu v průběhu užívání, může být zvýšení tepelných ztrát výplněmi otvorů, zvláště u energeticky úsporných staveb, významné.

Recenzent: Jaroslav Šafránek

Projektant otopné soustavy při rekonstrukcích starších budov často nemá k dispozici technickou dokumentaci k použitým stavebním konstrukcím, přesto potřebuje co nejpřesněji stanovit tepelné ztráty, aby správně nadimenzoval velikost zdroje tepla. Nejslabším článkem obvodového pláště z hlediska tepelných ztrát jsou transparentní prvky, tedy především okna. Již řadu let se používají izolační skla, ve kterých je z důvodu zkvalitnění zejména v tepelných, ale i akustických parametrech, mezera mezi skly naplněna inertním plynem (argon, krypton, SF 6). Otázkou vyvolává, zda je tato náplň plně funkční i po delší době používání, jaký vliv může mít pokles koncentrace inertního plynu a s jakými tepelně technickými vlastnostmi okna může projektant při dalším využití objektu počítat. Odpověď na tuto otázku může být také zajímavá při řešení nízkoenergetického domu, pokud je zdroj tepla pro vytápění řešen jako minimální bez rezervy. Základním významem použití inertního plynu v meziskelním prostoru izolačních skel (dále jen IS) je jeho nižší tepelná vodivost ve srovnání se vzduchem, tedy schopnost poskytnout větší odpor plynu proti přestupu tepla. Zjednodušeně lze tuto vlastnost inertních plynů vysvětlit tím, že molekuly plynů tohoto typu zásadně nevytváří žádné molekulární struktury mezi sebou navzájem ani s částicemi jiných plynů a striktně se vyskytují v jednomolekulárním uspořádání. Rychlost difúze, respektive únik inertního plynu a jeho nahrazení okolním vzduchem, a tím i snížení koncentrace inertního plynu v prostoru mezi skly, má významný vliv na tepelné technické, i akustické parametry IS. Experimentálně bylo prověřeno (CSI, a.s., pracoviště Zlín), že inertní plyny, zejména argon a krypton, jsou akusticky neaktivní a při jejich použití v IS se zlepšuje neprůzvučnost o cca 1 dB. Plyn SF6, který se v současné době pou-

žívá pouze sporadicky, neboť je ekologicky nevhodný, zlepšuje neprůzvučnost ve středním kmitočtovém pásmu 800 až 2000 Hz cca o 3 dB.

Kvalitativní posoupnost tepelně technických požadavků lze řadit do časových období uvedených v tab. 1.

1. Úvod

Často diskutovaným tématem je problematika použití inertního plynu ve vztahu k jeho tepelně technickým vlastnostem (součinitel tepelné vodivosti λ , měrné teplo c , hustota ρ) a cenové relace, případně i náročnost konstrukčních úprav v utěsněnosti obvodu izolačního skla a tím tedy i ekonomičnosti (ceny). Je prokázáno, že inertní plyny majíci

Tab. 1 Hodnoty tepelných odporů R a součinitelů prostupu tepla U obvodového pláště a oken v závislosti na generaci konstrukcí [1]

Generace	Vnější stěna		Střecha		Okna
	R	U	R	U	U
	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$	$[\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}]$	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$	$[\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}]$	$[\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}]$
I.	0,52	1,45	0,63	1,25	–
II.	0,52	1,45	0,91	0,93	3,70
III.	0,95	0,89	1,80	0,51	3,70
IV.	2,00	0,46	3,00	0,32	2,70
V.	2,90	0,33	4,35	0,23	2,90
VI.	3,83	0,25	4,86	0,20	1,20
VII.	3,83	0,25	6,11	0,16	1,20

Poznámka: Hodnoty tepelných odporů a součinitelů prostupu tepla pro I. – IV. generaci jsou hodnoty požadované. Hodnoty pro V. – VII. generaci odpovídají doporučeným hodnotám pro vnější stěny těžké, střechy těžké a pro nová okna.

I.	generaci tepelně technických požadavků konstrukčních prvků lze zařadit do časového období před rok 1964. Hodnoty R a k vycházely z etalonu stěny z plných cihel tloušťky 450 mm, požadavek na okna nebyl specifikován.
II.	generaci lze zařadit do časového období 1964 až 1979. Při zpracování normy se vycházelo z hygienického požadavku na dosažení vnitřní povrchové teploty nad hodnotou rosného bodu. Obecně lze konstatovat, že u stěnových konstrukcí byl tento atribut splněn pouze v ploše konstrukčního prvku, nikoliv v koutech a rozích místností.
III.	generace má dobu účinnosti od roku 1979 až do roku 1992. Při zpracování komplexu tepelně technických norem ČSN 73 0540, ČSN 73 0542, ČSN 73 0544 a ČSN 73 0549 bylo respektováno základní hledisko tepelné pohody během celého roku definované tepelnou stabilitou v zimním období (součtová teplota na konci otopné přestávky t_M) a v letním období (nejvyšší denní vzestup teploty vnitřního vzduchu $\Delta t_{i,max}$).
IV.	generaci lze zařadit do období let 1992 až 1994, kdy byla vydána změna č. 4 k platné ČSN 73 0540 jako dočasné překlenovací provizorium do doby vydání normy nové. V této normě se výrazně zpřísňují požadavky na konstrukční prvky a dominuje hledisko energetické (spotřeba energie na vytápění poklesla z původních 9,3 na 7,3 MWh na běžný byt a rok).
V.	generace se týká období let 1994 až 2002 a zahrnuje konstrukce, které odpovídají doporučeným hodnotám z ČSN 73 0540 vydané v roce 1994. Kriteriaální niveau dosahuje evropský standard energeticky úsporných objektů.
VI.	generace má dobu účinnosti od roku 2002 do roku 2005, kdy byla novelizována část 2 normy ČSN 730540, obsahující výrazně zpřísněné původní i nové požadavky na stavební konstrukce. Hlavní změnou je zavedení součinitele prostupu tepla U jako hodnotícího požadavku pro neprůsvitné konstrukce. Dochází i ke změně energetického požadavku, kdy je zavedena nová hodnotící veličina – měrná potřeba tepla na vytápění e_p . Pro doložení splnění požadavku na energetickou náročnost budovy je zaveden energetický štítek.
VII.	generace má dobu účinnosti od roku 2005, kdy byla vydána změna Z1 k části 2 normy ČSN 73 0540 a současně byly novelizovány další její části 1,3, a 4 v návaznosti na evropské normy. Změna Z1 přinesla některé nové hodnotící veličiny, zejména pro energetický požadavek, kdy stavebně energetické vlastnosti budov se hodnotí pomocí průměrného součinitele prostupu tepla U_{em} .

nižší hodnotu součinitele tepelné vodivosti λ jsou izolačně příznivější než vzduch (tab. 2). Následující článek lze rozdělit do dvou částí:

- metodický postup výpočtu součinitele prostupu tepla U_g u izolačních skel,
- výpočtové hodnocení změny koncentrace inertního plynu u IS.

2. Metodický postup výpočtu součinitele prostupu tepla U_g u izolačních skel

Deklarovaná hodnota součinitele prostupu tepla U dle [2] při normalizovaných okrajových podmínkách středové části (tj. bez okrajových vlivů) je definována hustotou tepelného toku v ustáleném teplotním stavu vztaženého na rozdíl teplot mezi teplotami prostředí na každé straně vztahem

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

kde:

h_e a h_i jsou součinitelé přestupu tepla na vnější a vnitřní straně
 h_t je celková tepelná propustnost zasklení

Teoretický rozbor a odvozené vzorce včetně definování základních vstupních okrajových podmínek lze nalézt v literatuře, zejména v ČSN EN 673+A+1 [2], resp. ČSN EN 1279-3 [3].

Základem jsou normalizované okrajové podmínky, ze kterých se vychází při výpočtu součinitele prostupu tepla U :

ε – korigovaná emisivita sodnovápenatého skla bez povlaku a borosilikátového skla
 0,837

ΔT – teplotní rozdíl mezi hraničními povrchy skla
 15 K

T_m – střední teplota plynového meziprostoru
 283 K

σ – Stefan-Boltzmanova konstanta
 $5,67 \times 10^{-8}$ [W/(m²·K)]

h_e – součinitel přestupu tepla na vnější straně pro povrchy sodnovápenatého skla bez povlaku
 23 [W/(m²·K)]

h_i – součinitel přestupu tepla na vnitřní straně pro povrchy sodnovápenatého skla bez povlaku
 8 [W/(m²·K)]

A – konstanta 0,035

n – exponent 0,38

3. Výpočtové hodnocení změny koncentrace inertního plynu u IS

Vztahem (1) v normě [1] je dána míra poklesu koncentrace inertního plynu izolačního skla jako procentuální podíl objemu plynu, který unikne z meziprostoru izolačního skla přes jeho těsnění plněného plynem za rok

$$L_i = 87,6 \cdot 10^6 \frac{m_i}{c_i \cdot V_{\text{int}} \cdot \rho_{0i}} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{P}{P_0} \quad \% \cdot \text{a}^{-1}$$

Značka	Popis	Jednotky soustavy SI	Jednotky pro praktické použití ve vztahu
c_i	koncentrace plynu	objemový podíl v %	objemový podíl v %
m_i	hmotnost plynu, který unikl z izolačního skla plněného za daný čas	kg/h	µg/h
ρ_{0i}	hustota plynu i při teplotě T a tlaku P_0	kg/m ³	µg/mm ³
P	absolutní atmosférický tlak, při kterém bylo izolační sklo utěsněno	Pa	ve stejných jednotkách jako P_0
P_0	atmosférický tlak při kterém bylo stanoveno ρ_0	Pa	např. hPa
T	teplota, při které bylo izolační sklo utěsněno	K	K
T_0	teplota, při které bylo stanoveno ρ_0	K	K
V_{int}	vnitřní objem zkušební vzorku	m ³	mm ³
a	jeden rok		

Poznámka: ρ_{0i} je často udáváno při $T_0 = 273$ K a $P_0 = 1014$ Pa

Tab. 2 Vlastnosti plynů

Plyn	Teplota ϑ [°C]	Hustota ρ [kg/m ³]	Dynamická viskozita μ [kg/(m·s)]	Tepelná vodivost λ [W/(m·K)]	Měrné teplo c [J/(kg·K)]
Vzduch	-10	1,326	$1,661 \cdot 10^{-5}$	$2,336 \cdot 10^{-2}$	$1,008 \cdot 10^3$
	0	1,277	$1,711 \cdot 10^{-5}$	$2,416 \cdot 10^{-2}$	
	10*	1,232	$1,761 \cdot 10^{-5}$	$2,496 \cdot 10^{-2}$	
	20	1,189	$1,811 \cdot 10^{-5}$	$2,576 \cdot 10^{-2}$	
Argon	-10	1,829	$2,038 \cdot 10^{-5}$	$1,584 \cdot 10^{-2}$	$0,519 \cdot 10^3$
	0	1,762	$2,101 \cdot 10^{-5}$	$1,634 \cdot 10^{-2}$	
	10*	1,669	$2,164 \cdot 10^{-5}$	$1,684 \cdot 10^{-2}$	
	20	1,640	$2,228 \cdot 10^{-5}$	$1,734 \cdot 10^{-2}$	
Fluorid sírový SF ₆	-10	6,844	$1,383 \cdot 10^{-5}$	$1,119 \cdot 10^{-2}$	$0,614 \cdot 10^3$
	0	6,602	$1,421 \cdot 10^{-5}$	$1,197 \cdot 10^{-2}$	
	10*	6,360	$1,459 \cdot 10^{-5}$	$1,275 \cdot 10^{-2}$	
	20	6,118	$1,497 \cdot 10^{-5}$	$1,354 \cdot 10^{-2}$	
Krypton	-10	3,832	$2,260 \cdot 10^{-5}$	$0,842 \cdot 10^{-2}$	$0,245 \cdot 10^3$
	0	3,690	$2,330 \cdot 10^{-5}$	$0,870 \cdot 10^{-2}$	
	10*	3,560	$2,400 \cdot 10^{-5}$	$0,900 \cdot 10^{-2}$	
	20	3,430	$2,470 \cdot 10^{-5}$	$0,926 \cdot 10^{-2}$	
Xenon	-10	6,121	$2,078 \cdot 10^{-5}$	$0,494 \cdot 10^{-2}$	$0,161 \cdot 10^3$
	0	1,277	$2,152 \cdot 10^{-5}$	$0,519 \cdot 10^{-2}$	
	10*	1,232	$2,226 \cdot 10^{-5}$	$0,529 \cdot 10^{-2}$	
	20	1,189	$2,299 \cdot 10^{-5}$	$0,546 \cdot 10^{-2}$	

* Normalizovaná střední teplota měření

Rychlost unikání plynu L_i pro koncentraci vyšší než 15 % a vzduchu měřená na vzorcích ze dvou tabulí čirého skla float 4 mm ve smyslu EN 572 a EN 572-2 musí být $L_i < 1,0$ v % · a⁻¹.

Je prokázáno, že laboratorně měřené hodnoty jsou výrazně vyšší už po 10 letech přirozeného stárnutí. Uvedené tvrzení vychází ze zkušenosti nainstalovaných IS do oken reálného objektu po dobu 10 roků s hodnotami měření u izolačních skel vhodné konstrukce po procesu umělého stárnutí podle DIN 52293. Naměřené experimentálně zjištěné hodnoty z reálného objektu byly 10× nižší než laboratorní.

4. Závislost koncentrace inertního plynu na součiniteli prostupu tepla U_g

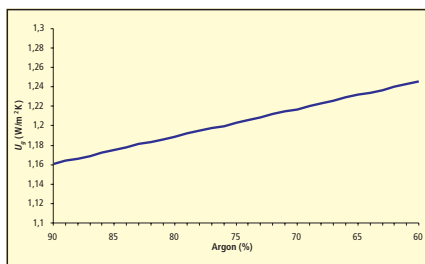
Programem Window 5 byla výpočtově hodnocena závislost koncentrace plynu na součiniteli prostupu tepla IS pro naplnění meziprostoru inertním plynem – argonem a kryptonem. Výstup byl zpracován tabelárně a graficky.

Výpočtové skladby izolačního dvojskla:

- pro plnění argonem
- **Float 4 mm – 16 argon – Low-E 4mm**
- pro plnění kryptonem
- **Float 4 mm – 12 krypton – Low-E 4mm**

Tab. 3 Plnění argonem

Koncentrace plynu		U_g [W/m ² K]
argon	vzduch	
90	10	1,161
89	11	1,164
88	12	1,166
87	13	1,169
86	14	1,172
85	15	1,175
84	16	1,178
83	17	1,181
82	18	1,183
81	19	1,186
80	20	1,189
79	21	1,192
78	22	1,195
77	23	1,198
76	24	1,200
75	25	1,203
74	26	1,206
73	27	1,209
72	28	1,212
71	29	1,215
70	30	1,217
69	31	1,220
68	32	1,223
67	33	1,226
66	34	1,229
65	35	1,232
64	36	1,234
63	37	1,237
62	38	1,240
61	39	1,243
60	40	1,246

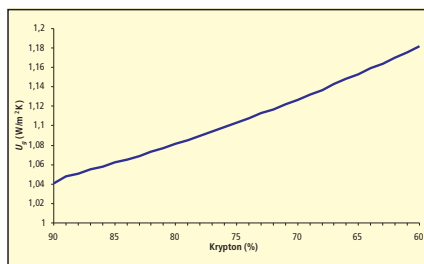
Obr. 1 Závislost U_g na koncentraci argonu v meziskelním prostoru

Součinitel prostupu tepla U_g se při snížení koncentrace argonu z 90 % na 60 % zhorší o 7,3 %. Vliv šířky rámečku (šířka meziskelního prostoru) na výslednou hodnotu U_g je následující:

Šířka rámečku [mm]	U_g [W/m ² ·K]
10	1,461
12	1,306
14	1,206
16	1,161
18	1,170
20	1,189
22	1,206

Tab. 4 Plnění kryptonem

Koncentrace plynu		U_g [W/m ² K]
krypton	vzduch	
90	10	1,041
89	11	1,048
88	12	1,051
87	13	1,055
86	14	1,058
85	15	1,062
84	16	1,065
83	17	1,069
82	18	1,073
81	19	1,077
80	20	1,081
79	21	1,085
78	22	1,09
77	23	1,094
76	24	1,099
75	25	1,103
74	26	1,108
73	27	1,113
72	28	1,117
71	29	1,122
70	30	1,127
69	31	1,132
68	32	1,137
67	33	1,143
66	34	1,148
65	35	1,153
64	36	1,159
63	37	1,164
62	38	1,170
61	39	1,176
60	40	1,182

Obr. 1 Závislost U_g na koncentraci kryptonu v meziskelním prostoru

Součinitel prostupu tepla U_g se při snížení koncentrace kryptonu z 90 % na 60 % zhorší o 13,5 %. Vliv šířky rámečku (šířka meziskelní mezery) na výslednou hodnotu U_g je následující:

Šířka rámečku [mm]	U_g [W/m ² ·K]
8	1,176
10	1,053
12	1,041
14	1,065
16	1,087
18	1,107
20	1,125

4. Závěr

Generační posloupnost zpříšňování požadavků součinitele prostupu tepla konstrukčních prvků obvodového pláště snižuje poměr mezi U plně části pláště a transparentního prvku, ale je evidentní, že i v současné době je okno významným zdrojem tepelných ztrát. Výpočtově je prokázáno, že zhoršení součinitele prostupu tepla U_g při změně koncentrace z 90/10 na 60/40 je u argonu 7,3 %, u kryptonu 13,5 %. Současně je možné konstatovat, že normou předpokládaný roční pokles koncentrace inertního plynu $L_i < 1,0$ v % · a⁻¹ je u experimentálních naměřených hodnot ještě menší. Optimální šířka rámečku není pro oba plyny (argon a krypton) stejná. V případě argonu vychází nejlépe šířka 16 mm, u kryptonu 12 mm. Dalo by se očekávat, že se vzrůstající šířkou rámečků budou hodnoty U_g lepší nebo přinejhorším stejné. Z výpočtu ale vyplývá, že se při zvětšujících nebo naopak zmenšujících šířkách meziskelního prostoru hodnota U_g zhoršuje. Součinitel prostupu tepla izolačního skla je významně ovlivňován emisivitou použitých skel (pokovení pozice 2 – vnitřní líc vnějšího skla) ve vztahu k tepelným ziskům resp. tepelným ztrátám skly. Pro ilustraci uvádíme diferenciaci U_g nejčastěji frekventovaných typů izolačních dvojskel s plněním různými inertními plyny ve variantních koncentracích.

Izolační dvojsklo Low-E 4 mm –12 – Float 4 mm					
	U_g [W/m ² ·K]				
	100 %	90 %	75 %	50 %	25 %
vzduch	1,63				
argon	1,27	1,31	1,36	1,45	1,54
krypton	1,00	1,04	1,10	1,24	1,42

Izolační dvojsklo Low-E 4 mm –16 – Float 6 mm					
	U_g [W/m ² ·K]				
	100 %	90 %	75 %	50 %	25 %
vzduch	1,42				
argon	1,13	1,16	1,20	1,27	1,34
krypton	1,04	1,09	1,15	1,24	1,31

Literatura

1. Vaverka J. a kolektiv: Stavební tepelná technika a energetika budov. Nakladatelství VUTIUM 2006, 648 s. a CD. (ISBN 80-214-2910-0)
2. ČSN EN 673 + A1: Sklo ve stavebnictví – Stanovení součinitele prostupu tepla (hodnota U) – Výpočtová metoda
3. ČSN EN 1279-3: Sklo ve stavebnictví – Izolační skla – Část 3: Dlouhodobá metoda zkoušení a požadavky na rychlost unikání plynu a na tolerance koncentrace plynu

□ Prof. Ing. Jiří Vaverka, DrSc.,
Ústav techniky staveb, Fakulta architektury,
VUT v Brně;
člen redakční rady Topenářství instalace
□ Ing. Jiří Dvořáček, Izolační skla, a.s., Brno