

Ing. Zdenko MALÍK

ČVUT v Praze, Univerzitní
centrum energeticky efektivních
budovČVUT v Praze, Fakulta stavební,
Katedra konstrukcí pozemních
staveb

Recenzent

Ing. Martin Barták, Ph.D.

Ekvivalentná tepelná vodivosť vzduchu vo vzduchových dutinách priečniku fasádneho systému a jej vplyv na tepelnú priepustnosť detailu v porovnaní s CFD modelom

Equivalent Thermal Conductivity of Air in the Air Cavities of the Facade System Crossbeam and Its Effect on the Thermal Transmittance of the Detail Compared to the CFD Model

V technickej praxi sa pri výpočte tepelného správania sa detailov okien alebo fasádnych systémov využíva ekvivalentný súčiniteľ tepelnej vodivosti vzduchu v uzavretých vzduchových medzerách. Týmto sa nahrádza v jednotlivých dutinách vplyv sálania ich povrchov a prúdenia vzduchu úpravou súčiniteľa tepelnej vodivosti vzduchu v nich. Tento príspevok si kladie za cieľ porovnať výsledky modelovania týmto postupom a CFD modelu. Ako geometrický základ slúžil zjednodušený detail priečnika fasádneho systému Schüco [1] v kombinácii s izolačným trojsklom. Dutiny v priečniku sú modelované raz podľa uvedeného postupu a potom CFD modelom. Výsledky sú porovnávané s ohľadom na tepelnú priepustnosť detailu a na najnižšiu povrchovú teplotu.

Kľúčové slova: tepelná technika, simulácia, CFD, normový postup, porovnanie, vzduchové dutiny

In the engineering practice, the equivalent thermal conductivity of air in closed air gaps is used to calculate the thermal behavior of window or facade system details. Thus, the influence of radiation of their surfaces and of the airflow is compensated in individual cavities by adjusting the thermal conductivity coefficient of the contained air. This paper aims to compare the results of models using this method and CFD simulation. A simplified detail of a crossbeam of the Schüco facade system [1] in combination with the insulating triple glazing served as a geometric basis. Crossbeam cavities are modeled first using the mentioned method and then in the CFD model. The results are compared with respect to the thermal transmittance of the detail and the lowest surface temperature.

Keywords: heat engineering, simulation, CFD, standardized approach, comparison, air cavities

ÚVOD

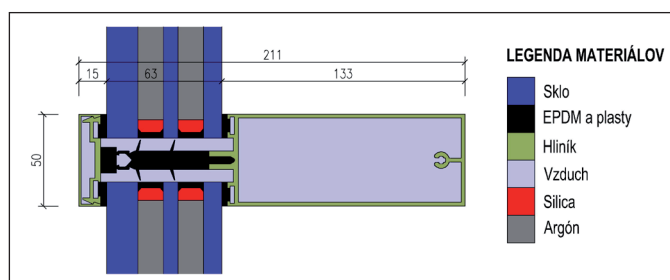
V technickej praxi sa pri výpočte tepelného správania sa detailov obsahujúcich okná alebo fasádne systémy využíva normový postup [2] určenia ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti vzduchu v uzavretých vzduchových medzerách. Ten zlučuje vplyv prúdenia vzduchu v dutine a sálenie tepla medzi jej povrchmi s vedením tepla vzduchom v dutine.

Tento príspevok porovnáva výsledky štandardného výpočtu s výsledkami CFD simulácie, ktorá podrobne rieši vplyv prenosu tepla konvekciou a radiáciou. Výsledky CFD modelu sú považované za presnejšie. Príspevok popisuje modelovaný zjednodušený detail geometricky vychádzajúci z fasádneho priečniku systému Schüco [1] v kombinácii s tepelnoizolačným trojsklom a uvažované vlastnosti materiálov. Ďalej sa príspevok zaoberá určením ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti λ_{ekv} pre jednotlivé dutiny v priečniku. Popísané je aj presnejší CFD model využívajúci rovnakú materiálovú skladbu. Simulácie sú prevádzané v programe COMSOL Multiphysics 4.4 [3].

Výsledky simulácií na jednotlivých modeloch sú potom vzájomne porovnávané z pohľadu celkovej tepelnej priepustnosti a z pohľadu najnižšej teploty na vnútornom povrchu detailu. Výsledky sú doplnené o porovnanie teplotných polí a o vykreslenie rýchlosti prúdenia vzduchu v dutinách pri uvažovaní vplyvu prúdenia a radiácie.

ZJEDNODUŠENÝ DETAIL

Pre hodnotenie vplyvu zavedenia ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti uzavretej vzduchovej dutiny vo fasádnom priečniku nie je potrebné modelovať niektoré časti detailu tak podrobne, ako ostatné. Preto zjednodušený detail zanedbáva zúbkovanie EPDM tesnení. Tiež zjednodušuje ich tvar a zanedbáva niektoré naozaj malé dutiny, ktoré podľa predlohy vo forme technickej dokumentácie k fasádneho systému [1] a jeho prvkom v detaile vznikajú. Tieto majú na reálny spôsob šírenia tepla takmer nulový vplyv. Pokiaľ budú zanedbané pri oboch porovnávaných spôsoboch výpočtu, nemajú vplyv na výsledok porovnávaní. Detail je vystavený teplote vzduchu v interiéri $t_i = 20\text{ °C}$ a v exteriéri $t_e = -15\text{ °C}$



Obr. 1 Geometria a materiálová skladba zjednodušeného detailu

Fig. 1 Geometry and material composition of the simplified detail

pre zimné okrajové podmienky a pre letné okrajové podmienky $t_i = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Exteriérové teploty v letnom období sú uvažované ako rovnocenné slnečné teploty $t_{e, \text{sklo}} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_{e, \text{priechnik}} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tab. 1 udáva súhrn materiálov uvažovaných v detaile a ich fyzikálne vlastnosti. Položky neobsahujúce číslo, ale iba závislosť na ďalších premenných veličinách, majú túto závislosť preddefinovanú vo výpočtovom softvéri. Obr. 1 potom poukazuje na modelovanú zjednodušenú podobu detailu fasádneho priečnika, popisuje jeho geometriu a materiálovú skladbu.

Tab. 1 Materiálové vlastnosti uvažované v modeloch

Tab. 1 Material properties used in the models

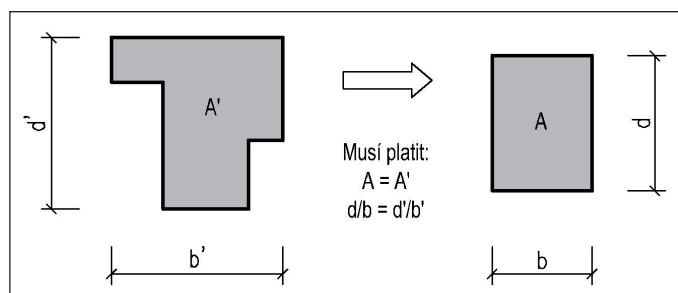
	λ	ρ	c	η	γ
	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$	$[-]$
Sklo	1	2500	840	$2\text{e-}5$	1,4
EPDM a plasty	0,25	1150	1420	$2\text{e-}5$	1,4
Hliník	237	2700	904		
Vzduch	$f(T[\text{K}])$	$f(T[\text{K}], p[\text{Pa}])$	$f(T[\text{K}])$	$f(T[\text{K}])$	1,4
Silica	0,13	500	1000		
Argón	$f(T[\text{K}])$	$f(T[\text{K}])$	$f(T[\text{K}])$	$f(T[\text{K}])$	

NORMOVÝ POSTUP

Normový postup [2] určenia ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti uzavretej vzduchovej medzery umožňuje zlúčiť šírenie tepla vedením, prúdením a sálaním do jedného parametru. Tento postup však vyžaduje znalosť parametrov ovplyvňujúcich jednotlivé spôsoby šírenia tepla. Pre každú jednu uzavretú medzeru je potrebné poznať emisivitu jej povrchov a priemernú teplotu vzduchu v nej.

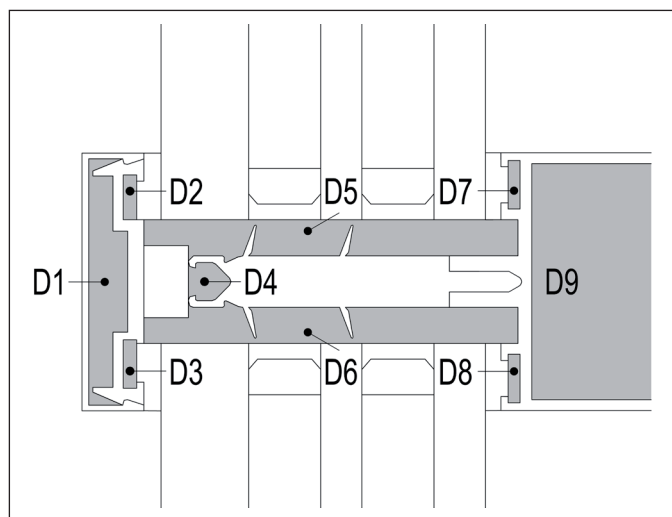
Okrem materiálových charakteristík je pre výpočet ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti tiež potrebné definovať tvar vzduchovej dutiny. Dutiny obdĺžnikového prierezu je možné vyhodnotiť ihneď. Pre vzduchové dutiny nepravidelného tvaru je však potrebné určiť náhradné rozmery. Plocha prierezu náhradnej dutiny musí byť zhodná s plochou prierezu skutočnej dutiny. Zároveň pomer strán náhradnej obdĺžnikovej dutiny musí byť rovnaký ako pomer najväčšieho vodorovného a najväčšieho zvislého rozmeru skutočnej dutiny. Spôsob určenia náhradnej dutiny je graficky znázornený na obr. 2.

Na obr. 3 sú znázornené a označené vzduchové dutiny, s ktorými sa vo výpočtoch uvažuje. Ich rozmery a plochy prierezov, ako aj rozmery a plochy prierezov náhradných dutín pre určenie ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti sú uvedené v tab. 2.



Obr. 2 Princíp určenia rozmerov náhradnej dutiny

Fig. 2 Principle of determining substitute cavity dimensions



Obr. 3 Označovanie dutín priečnika

Fig. 3 Identification of crossbeam cavities

Tab. 2 Určenie rozmerov náhradných dutín pre výpočet ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti

Tab. 2 Determination of dimensions of substitute cavities for calculation of equivalent thermal conductivity coefficient

Zn.	Skutočný tvar			Náhradný tvar			Kontrola	
	d'	b'	A'	d	b	A	$(d'/b')/(d/b)$	A'/A
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm ²]	$[-]$	$[-]$
D1	47,8	7,55	268	44,4	6,48	287,0	0,92	0,93
D2	8,70	2,60	22,6	8,70	2,60	22,6	1,00	1,00
D3	9,40	2,60	24,4	9,40	2,60	24,4	1,00	1,00
D4	7,70	8,30	48,1	6,69	7,19	48,1	1,00	1,00
D5	7,00	72,7	483	6,81	68,0	463,0	0,96	1,04
D6	7,00	72,7	483	6,81	68,0	463,0	0,96	1,04
D7	9,40	2,30	21,6	9,40	2,30	21,6	1,00	1,00
D8	9,40	2,30	21,6	9,40	2,30	21,6	1,00	1,00
D9	45,8	122	5528	45,7	121,0	5528,0	1,00	1,00

Ako už bolo spomenuté, pre čo najpresnejší výpočet ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti je potrebné poznať priemernú teplotu vzduchu v danej dutine. Za účelom eliminácie neistôt bol preto prevedený najskôr výpočet na modeli uvažujúcom s prúdením vzduchu a sálaním tepla povrchmi dutiny. Tak boli určené priemerné teploty vzduchu v dutinách pre výpočet normovým postupom. Normový postup bol potom iteratívne opakován s uvažovaním priemernej teploty vzduchu v dutinách podľa predchádzajúceho kroku. Hodnoty priemernej teploty vzduchu v jednotlivých dutinách a z nich vychádzajúce hodnoty ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti po ukončení iteratívneho výpočtu sú zhrnuté v tab. 3a a tab. 3b. Iteratívny výpočet bol ukončený v momente, kedy sa hodnota λ_{ekv} po zaokrúhlení na 4 desatinné miesta nezmenila voči predchádzajúcemu kroku.

V praxi je ale pravdepodobne viac využívaný postup využívajúci odhad teplôt v dutine. Preto je výpočet pre zimné okrajové podmienky rozdelený na dva prípady – využívajúci presné hodnoty popísané vyššie (nazvaný ďalej „Zima – teploty z CFD“) a využívajúci odhad teplôt z predpokladu

lineárneho spojenia okrajových teplôt (nazvaný ďalej „Zima – teploty odhadom“) Princíp odhadu teploty v dutine je znázornený na obr. 4. Z tab. 3a je badateľné, že rozdiely hodnôt ekvivalentných tepelných vodivostí vypočítané týmito dvoma spôsobmi sú minimálne.

Tab. 3a Určenie ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti v jednotlivých dutinách

Tab. 3a Determination of equivalent thermal conductivity coefficient in individual cavities

Zn.	Zima – teploty z CFD				Zima – teploty odhadom		
	ε	t	$\lambda_{x,ekv}$	$\lambda_{y,ekv}$	t	$\lambda_{x,ekv}$	$\lambda_{y,ekv}$
	[-]	[°C]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[°C]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
D1	0,8	-13,27	0,0410	0,1328	-13,87	0,0409	0,1324
D2	0,8	-13,09	0,0310	0,0383	-12,93	0,0310	0,0383
D3	0,8	-13,10	0,0311	0,0392	-12,93	0,0311	0,0392
D4	0,8	-9,66	0,0389	0,0383	-9,48	0,0389	0,0383
D5	0,8	2,90	0,2203	0,0456	-4,25	0,2117	0,0441
D6	0,8	2,91	0,2203	0,0456	-4,25	0,2117	0,0441
D7	0,8	17,17	0,0326	0,0445	3,67	0,0316	0,0419
D8	0,8	17,17	0,0326	0,0445	3,67	0,0316	0,0419
D9	0,3	17,55	0,2606	0,1097	18,00	0,2609	0,1098

Tab. 3b Určenie ekvivalentného súčiniteľa tepelnej vodivosti v jednotlivých dutinách

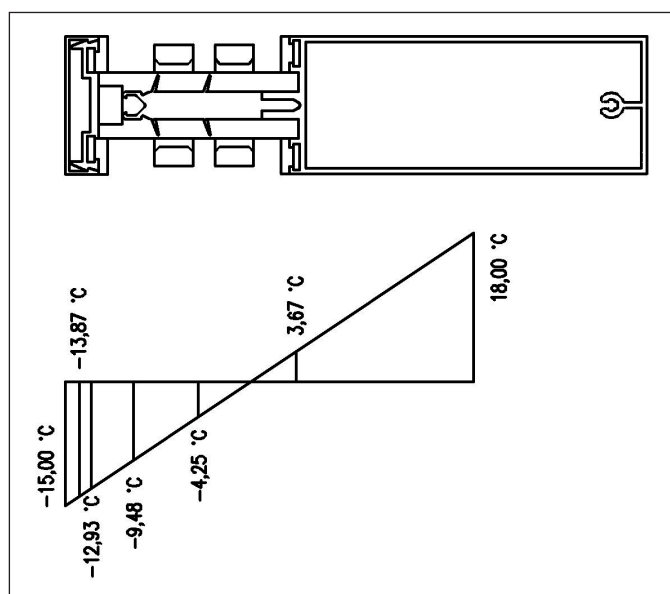
Tab. 3b Determination of equivalent thermal conductivity coefficient in individual cavities

Zn.	Leto – teploty z CFD			
	ε	t	$\lambda_{x,ekv}$	$\lambda_{y,ekv}$
	[-]	[°C]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
D1	0,8	51,72	0,0563	0,1931
D2	0,8	51,31	0,0367	0,0508
D3	0,8	51,33	0,0368	0,0526
D4	0,8	46,54	0,0498	0,0487
D5	0,8	34,75	0,2643	0,0537
D6	0,8	34,72	0,2643	0,0536
D7	0,8	21,96	0,0330	0,0455
D8	0,8	21,95	0,0330	0,0455
D9	0,3	21,67	0,2636	0,1113

CFD MODEL

Pri výpočte pomocou CFD modelu sa uvažovalo s prúdením vzduchu a sálaním povrchov len v rámci samotného prierečníka. Trojsklo bolo modelované ako skupina tuhých materiálov s uvažovaním iba vedenia tepla cez jednotlivé vrstvy. 2D model bol zostavený v prostredí softvéru COMSOL Multiphysics 4.4 [3].

Charakteristiky výpočtovej siete FEM sú uvedené v tab. 4. Kvalita prvků je hodnotená podľa jeho šikmosti v porovnaní so šikmostou ideálneho prvků.



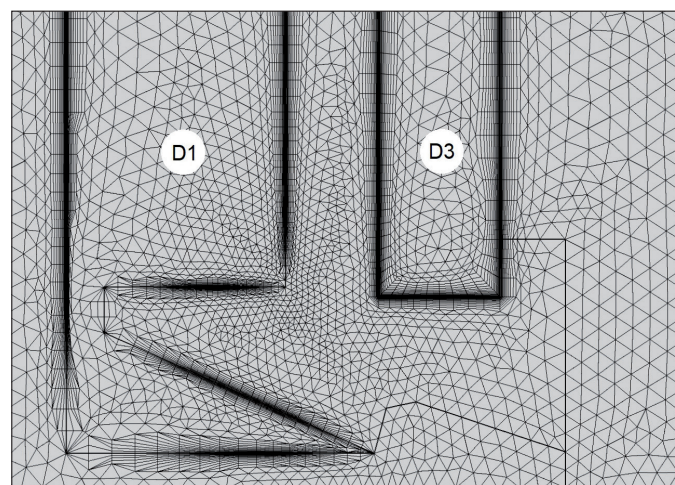
Obr. 4 Odhad teploty v dutinách (predpokladané teploty v ose prierezu)

Fig. 4 Estimation of temperature in the cavities (assumed temperatures in the cross-sectional axis)

Tab. 4 Charakteristika siete FEM pre model CFD

Tab. 4 Parameters of FEM network for CFD model

Parameter siete	hodnota	
Plocha siete	50 510	mm ²
Celkový počet prvků	607 612	
Počet trojuholníkových prvků	554 148	
Počet štvoruholníkových prvků	53 464	
Počet prvků na rozhraní materiálov	12 194	
Počet vrcholových prvků (vrcholy geometrie rozhraní materiálov)	226	
Priemerná kvalita prvků	0,8956	



Obr. 5 Detail zahustenia siete na okrajoch dutín (D1 a D3)

Fig. 5 Detail of fine mesh at the edges of cavities (D1 and D3)

Na obr. 5 je znázornený detail výpočtovej siete v oblasti dutiny D1 a D3. Pre simuláciu bolo zvolené riešenie pomocou v COMSOL-e preddefinovaného k-ε modelu pri nízkom Reynoldsovom čísle. Turbulentný model umožňuje postihnúť rozdielnu rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí stien

duťin a zohľadniť vplyv ich členitosti. Model k-ε je výhodný z hľadiska dobrej konvergencie a nízkeho nároku na operačnú pamäť. Zavedenie predpokladu nízkeho Reynoldsovho čísla umožňuje podľa [4] presnejšie určiť tepelné toky.

POROVNANIE VÝSLEDKOV

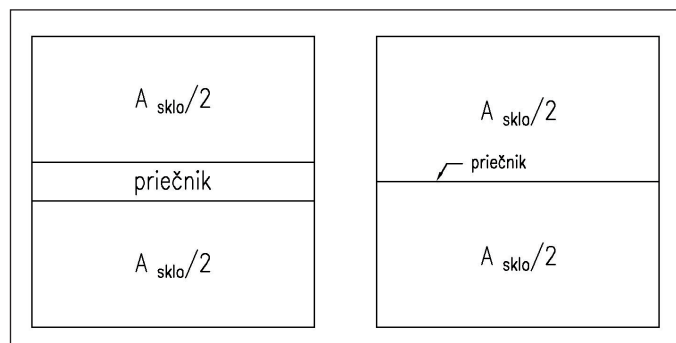
Porovnanie výsledkov bolo prevedené pomocou vyčíslenia lineárneho stratového súčiniteľa a najnižšej teploty na vnútornom povrchu pre model podľa normy [2] a pre CFD model. Ako hlavná konštrukcia bolo uvažované trojsklo. Samotný priečnik predstavuje lineárny tepelný most v tejto konštrukcii a je teda hodnotený lineárnym stratovým súčiniteľom. Za týmto účelom je potrebné vyhodnotiť súčiniteľ prestupu tepla zasklenia. Ten na základe tepelného toku v krajnom bode zasklenia ($L_g = 18,68 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) a teplotného rozdielu medzi interiérom a exteriérom ($\Delta t = 35 \text{ }^\circ\text{C}$) predstavuje $U_g = 0,53 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Táto hodnota je vypočítaná na základe simulácie v modeli pri popísaných uvažovaných materiálových parametroch. V reálnej aplikácii je pravdepodobné použitie izolačného trojskla s iným súčiniteľom prestupu tepla. Tab. 5 popisuje vstupné parametre pre výpočet lineárneho stratového súčiniteľa tepelného mostu.

Pri tepelnotechnickom výpočte s uvažovaním lineárnych stratových súčiniteľov je potrebné pamätať na správnu interpretáciu vzťahu lineárneho stratového súčiniteľa k hlavnej plošnej konštrukcii. Ako je vidieť na obr. 6, za plochu s tepelnotechnickými vlastnosťami zasklenia je možné považovať buď zasklenie skutočne viditeľné pri kolmom pohľade na fasádu (ďalej označované ako VAR1, na obrázku vľavo),

Tab. 5 Parametre pre výpočet lineárneho stratového súčiniteľa pre zimné okrajové podmienky

Tab. 5 Parameters for calculation of linear heat loss coefficient for winter boundary conditions

Parameter	Označenie	Jedn.	Hodnota	
			Teploty z CFD	Teploty odhadom
Celková výška detailu	l_{detail}	mm	684	684
Celková výška zasklenia	l_{sklo}	mm	634	634
Výška priečnika	$l_{\text{priečnik}}$	mm	50	50
Súčiniteľ prechodu tepla zasklenia	U_g	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	0,53	0,53
Tepelný tok detailom v CFD modeli	L_{CFD}	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$	16,66	16,66
Tepelný tok detailom v štandardnom modeli využívajúcom λ_{ekv}	L_{standard}	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$	18,11	18,05



Obr. 6 Možné spôsoby uvažovania priečnika v tepelnotechnickom výpočte: vľavo – VAR1; vpravo – VAR2

Fig. 6 Possible ways of considering a crossbeam in thermal calculation: left – VAR1; right – VAR2

alebo celú fasádu, kde bude lineárny tepelný most vo forme priečnika úsečkou (ďalej označované ako VAR2, na obrázku vpravo).

Tab. 6 a tab. 7 potom zhŕňajú výsledné hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa vypočítané pre obe možnosti jeho uvažovania v geometrii fasády. Hodnoty sú v tabuľke uvedené pre oba porovnávané spôsoby modelovania – model uvažujúci konvekciu a radiáciu, a štandardný výpočet uvažujúci λ_{ekv} . Hodnota lineárneho stratového súčiniteľa je v zimných okrajových podmienkach pri určení z modelu nahrádzajúceho prúdenie vzduchu a radiáciu v dutinách ekvivalentným súčiniteľom tepelnej vodivosti oproti detailnému CFD modelu vyššia o 0,041 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. To platí pre oba spôsoby geometrickej interpretácie a oba spôsoby určenia teplôt v dutinách. V relatívnom pomere k podrobnému CFD modelu ide však o nadhodnotenie o 29,3 % pre VAR1 a o 37,1 % pre VAR2. Pre letné obdobie sa lineárny stratový súčiniteľ nevyhodnocuje. Aj tam však vidno trend nadhodnocovania tepelnej priepustnosti detailu.

Tab. 6 Hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa pre prípad „Zima – teploty z CFD“

Tab. 6 Linear heat loss coefficient values for the case “Winter – temperatures from CFD”

Lineárny stratový súčiniteľ		Spôsob modelovania	
		CFD	Štandardný výpočet
Ψ_{VAR1}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	0,140	0,181
Ψ_{VAR2}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	0,113	0,155

Tab. 7 Hodnoty lineárneho stratového súčiniteľa pre prípad „Zima – teploty odhadom“

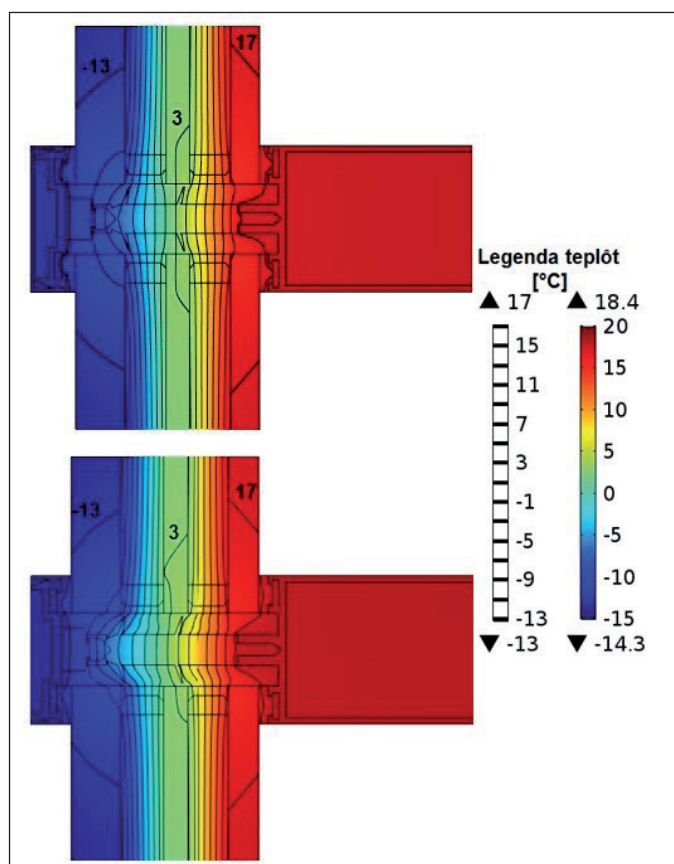
Tab. 7 Linear heat loss coefficient values for the case “Winter – estimated temperatures”

Lineárny stratový súčiniteľ		Spôsob modelovania	
		CFD	Štandardný výpočet
Ψ_{VAR1}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	0,140	0,180
Ψ_{VAR2}	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	0,113	0,153

Detailné priebehy teploty v detaile styku zasklenia a priečnika pre jednotlivé spôsoby modelovania (CFD, štandardný výpočet využívajúci λ_{ekv}) pre sadu okrajových podmienok „Zima“ presne sú vykreslené na obr. 7. Teplotné polia vypočítané na jednotlivých modeloch sú si veľmi podobné. Najviditeľnejšia zmena nastáva iba v tvare izotermy $3 \text{ }^\circ\text{C}$ a nižších teplôt. V simulácii na CFD modeli je päta stredného skla horšieho zasklenia mierne teplejšia. To súvisí práve so stúpaním teplého vzduchu v dutinách D5 a D6 nahor.

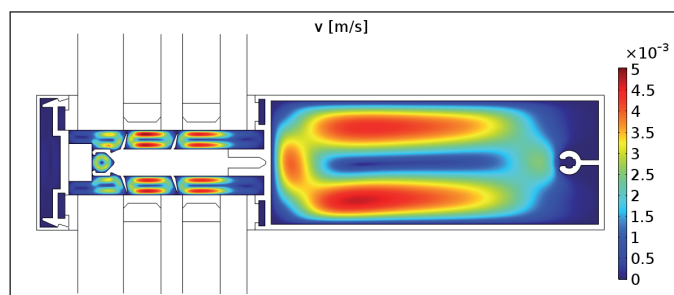
Rýchlosť prúdenia vzduchu v dutinách priečnika je pre celý priečnik vykreslená v obr. 8, detailnejšie potom pre jednotlivé dutiny v obr. 9 a obr. 10. Z obrázkov je viditeľné, že vzduch v dutinách vonkajšieho krytu priečnika neprúdi, prípadne prúdi zanedbateľnou rýchlosťou v porovnaní s ostatnými časťami detailu. To je zapríčinené zanedbateľným teplotným rozdielom medzi jednotlivými povrchmi dutiny (rozdiel najvyššej a najnižšej teploty povrchu dutiny D1 je $0,08 \text{ }^\circ\text{C}$). Vzduch naopak výraznejšie prúdi v dutinách medzi zaskleniami a v interiérovej časti priečnika (D9). V dutine D9 je totiž maximálny rozdiel teplôt na povrchoch $0,36 \text{ }^\circ\text{C}$. Rýchlosť vzduchu sa však stále pohybuje rádovo v $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tab. 8 vyhodnocuje najnižšiu teplotu na vnútornom povrchu detailu. Tepelná strata vo výpočte podľa normového postupu je mierne nadhodnotená. To vedie k „podhodnoteniu“ najnižšej povrchovej teploty na vnútornom povrchu a to o $0,30 \text{ }^\circ\text{C}$.



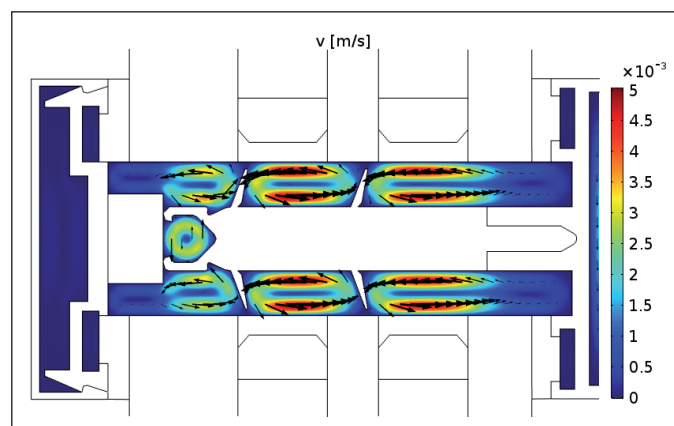
Obr. 7 Teplotné pole a priebeh izoterm v styku priečnika a zasklenia: hore – štandardná metóda; dole – CFD model

Fig. 7 Temperature field and course of isotherms in contact of the crossbeam and glazing: up – standard method; down – CFD model



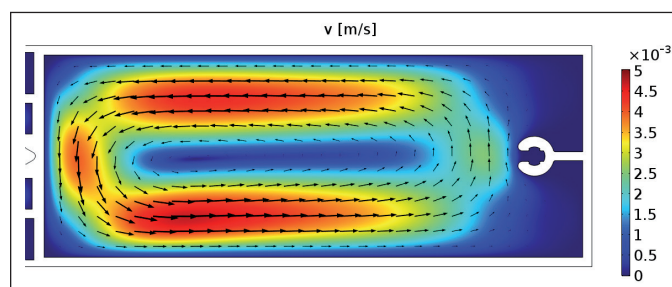
Obr. 8 Rýchlosť prúdenia vzduchu v dutinách fasádneho priečnika

Fig. 8 Airflow velocity in the cavities of the facade crossbeam



Obr. 9 Rýchlosť prúdenia vzduchu v D1 – D8

Fig. 9 Airflow velocity in D1 – D8



Obr. 10 Rýchlosť prúdenia vzduchu v dutine D9

Fig. 10 Airflow velocity in the cavity D9

Tab. 8 Najnižšia teplota na vnútornom povrchu – „Zima – teploty z CFD“ i „Zima – teploty odhadom“

Tab. 8 Lowest temperature on the internal surface – “Winter – temperatures from CFD” and also “Winter – estimated temperatures”

Metóda	$t_{si, min}$ [°C]
Štandardný výpočet	16,40
CFD	16,70

DISKUSIA

Z výsledkov je zrejmé, že sa pri využití normového postupu [2] pre simuláciu dutín vo fasádnych profiloch tepelný tok fasádnym priečnikom v porovnaní so simuláciou na CFD modeli mierne nadhodnocuje. Na nami modelovanom detaile dochádza k nadhodnoteniu o $0,041 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Takáto hodnota je relatívne malá.

Je otázne, či je táto nepresnosť stále pre všetky kombinácie okrajových podmienok, alebo sa mení v závislosti na nich. Ďalšou analýzou opakovaním rovnakého postupu sa zistilo, že pri vonkajšej teplote $t_e = 6,4 \text{ °C}$ (priemerná teplota vzduchu v Prahe počas vykurovacej sezóny [5]) dochádza k nadhodnoteniu tepelného toku detailom oproti simulácii na CFD modeli o $0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Zároveň sa ukázalo, že pri symetrickom detaile, akým je priečnik fasádneho systému, sa dajú teploty vzduchu v jednotlivých dutinách pomerne presne odhadnúť z predpokladu lineárneho priebehu teplôt.

Pri hodnotení detailu pre potreby zistenia najnižšej teploty na povrchu detail modelovaný podľa normového túto teplotu podhodnocuje, a to o $0,30 \text{ °C}$. Takéto podhodnotenie je pomerne výrazné, no je na strane bezpečnosti. Spôsobené môže byť tým, ako je interpretované sálanie v jednotlivých modeloch. Zatiaľ, čo pri normovom postupe je vplyv sálania rozdelený do celej dutiny a teda ovplyvňuje priamo aj teplotu vzduchu v dutine, sálanie v CFD modeli je modelované tak, že teplotu vzduchu ovplyvní až nepriamo (zmenou teploty povrchov dutiny, odkiaľ potom dôjde k odovzdaniu tepla vzduchu vedením).

ZÁVER

Boli porovnané výsledky simulácií tepelného správania sa detailu fasádneho priečnika pri osadení trojskla na CFD modeli a na modeli nahradzujúceho prúdenie vzduchu a sálanie tepla ekvivalentným súčiniteľom tepelnej vodivosti vzduchu v uzavretých dutinách pre rôzne okrajové podmienky. Porovnanie prebehlo ako vzhľadom na tepelnú stratu takýmto detailom, tak aj vzhľadom na najnižšiu teplotu na vnútornom povrchu detailu.

Tepelný tok detailom je pri výpočte normovou metódou v porovnaní s výpočtom na CFD modeli mierne nadhodnotený. Model zostavený podľa normového postupu vykazuje aj nižšiu hodnotu najnižšej teploty na

vnútornom povrchu (o 0,30 °C). Nadhodnotenie tepelnej straty normovým modelom je z pohľadu výpočtu bezpečným riešením. Nižšia hodnota najnižšej povrchovej teploty, čo je zväčša rozhodujúcim dôvodom pre modelovanie takéhoto detailu je rovnako na strane bezpečnosti.

Ďalší výskum v tejto téme by sa mohol zaoberať ďalšou citlivosťou analýzou vstupných parametrov takýchto modelov. Rovnako môže byť zaujímavé sledovať rozdiely medzi uvedenými výpočtami pre kombináciu priečnika s dvojsklom. V takom prípade sa totiž jedná o skrátenie dutín D5 a D6. To vedie k lepšiemu vedeniu tepla a potenciálne zvyšuje vplyv nepresnosti výpočtu na celkový výsledok.

Kontakt na autora: zdenko.malik@cvut.cz

Podakovanie: Tento príspevok vznikol za finančnej podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. LO1605 a bol podporený grantom ČVUT číslo SGS17/008/OHK1/1T/11.

Literatúra:

- [1] Profesionální plánování s Schüco – okna, dveře a fasády [online]. Bielfeld, 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <https://www.schueco.com/web2/cz/architekti> (dostupné iba pre registrovaných používateľov).
- [2] ČSN EN ISO 10077-2. Tepelné chování oken, dveří a okenic – Výpočet součinitele prostupu tepla: Část 2: Výpočtová metoda pro rámy. 2012.
- [3] COMSOL Multiphysics 4.4 [online]. b.r. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- [4] FREI, W. Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?. Comsol Blog [online]. 2017, 6 July 2017 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>
- [5] TINTĚRA, L. Vyhodnocení otopného období 2014/2015 v Praze [online]. TZB-Info.cz, 2015 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vytapani/13420-vyhodnoceni-otopneho-obdobi-2014-2015-v-praze>

Fyzikálne veličiny:

t	teplota [°C]
T	termodynamická teplota [K]
λ	súčiniteľ tepelnej vodivosti [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
ρ	merná hmotnosť [kg·m ⁻³]
c	merná tepelná kapacita [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
η	dynamická viskozita [Pa·s]
γ	pomer tepelných kapacít (tepelná kapacita pri konštantnom tlaku/tepelná kapacita pri konštantnom objeme) [-]
d	výška dutiny [m]
b	šírka dutiny [m]
A	plocha prierezu dutiny [m ²]
l	dĺžka [mm]
ε	emisivita povrchu [-]
Ψ	lineárny stratový súčiniteľ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
L	tepelná priepustnosť [W·m ⁻²]
U	súčiniteľ prechodu tepla [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
v	rýchlosť prúdenia [m·s ⁻¹]
p	tlak [Pa]

Horný index:

' označuje rozmer skutočnej dutiny

Dolný index:

i	hodnota v interiéri
e	hodnota v exteriéri
sklo, g	hodnota pre zasklenie fasádneho systému
priečnik	hodnota pre priečnik fasádneho systému
x, y	hodnota v smere osi (x – vodorovný smer, y – zvislý smer)
ekv.	ekvivalentný
standard	zo štandardného modelu
CFD	z podrobného CFD modelu
detail	celého detailu
si, min	minimálna hodnota na vnútornom povrchu

Operátory:

Δ rozdiel



BETA - 9/8



- obousměrná větrací jednotka s nastavitelným vzduchovým výkonem do 8000 m³·h⁻¹
- při splnění požadavků „Nařízení EK č. 1253/2014“ jmenovitý vzduchový výkon 7000 m³·h⁻¹
- volná oběžná kola s EC motory s proměnlivými otáčkami
- protiproudý deskový rekuperační výměník s účinností rekuperace až 82 %
- pro zvýšení komfortu možnost vybavení kondenzačním plynovým teplovodním kotlem
- automatické řízení a regulace jednotek s možností připojení k síti ETHERNET
- distribuce vzduchu dálkově ovládanou tryskovou vyústkou