

Ekvivalentní tepelná vodivost zdiva z dutinových keramických tvarovek ve směru svislého tepelného toku

Equivalent thermal conductivity of hollow bricks masonry in the vertical heat flow direction

Zbyněk Svoboda, ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Marek Kubr, Metrostav, a. s.

Článek je zaměřen na stanovení poměru mezi ekvivalentní tepelnou vodivostí zdiva z dutinových tvarovek ve svislém a vodorovném směru. Výpočet parametrů zdiva z modelových i reálných tvarovek byl proveden přesným CFD modelováním tak, aby byl co nejlépe zohledněn skutečný charakter šíření tepla ve vzduchových dutinách. Vypočtený poměr mezi ekvivalentní tepelnou vodivostí ve svislém a vodorovném směru se pro jednovrstvé tepelně izolační zdivo pohybuje v rozmezí 2 až 3.

The paper focuses on derivation of the ratio between equivalent thermal conductivities of hollow bricks masonry in vertical and horizontal directions. The calculation of properties of masonry from model and real bricks was carried out by means of CFD analysis in order to model real nature of heat transfer in air spaces. The calculated ratio between equivalent thermal conductivities in vertical and horizontal directions ranges from 2 to 3 for one-layered thermo-insulating brickwork.

Mezi nejčastější soudobé stavební materiály patří zdivo z keramických tvarovek s vertikálně orientovanými dutinami. Výrobci pro ně standardně uvádějí ekvivalentní tepelné vodivosti pro vodorovně orientovaný tepelný tok, což ve většině běžných případů (např. při výpočtu součinitele prostupu tepla) bez problémů postačuje. Zdivo z dutinových tvarovek ovšem není izotropním materiálem a nemá ve všech směrech stejné tepelné izolační vlastnosti. Chybějící údaje o tepelné vodivosti především ve svislém směru, citelně snižují přesnost výpočtu určitých tepelných vazeb, např. atik či založení stěn (obr. 1), u kterých hraje svisle orientovaný tepelný tok významnou roli. Uvažuje-li se totiž tepelná vodivost zdiva shodná ve všech směrech, mohou být výsledky posouzení podobných detailů značně příznivější, než by odpovídalo skutečnosti – a to ať hodnotíme vnitřní povrchovou teplotu nebo lineární činitel prostupu tepla. Zdivo z dutinových tvarovek ve skutečnosti vykazuje ve svislém směru citelně horší tepelné vlastnosti vzhledem k tomu, že struktura dutinových tvarovek je optimalizována celkem logicky jen pro převažující vodorovný směr šíření tepla. Příčinou zvýšené hustoty tepelného toku ve svislém směru jsou sice především nějak nepřerušené svislé stěny voštin, ale svou roli sehrává i konvekce ve větších svislých vzduchových dutinách.

Šíření tepla v dutinových tvarovkách

Problematickou komplexního šíření tepla vedením, prouděním a sáláním v dutinových tvarovkách se již výpočtově zabývala řada odborníků (např. [1-3]), ale většina se soustředila pouze na vodorovný směr šíření tepla. Výjim-

Klíčová slova:

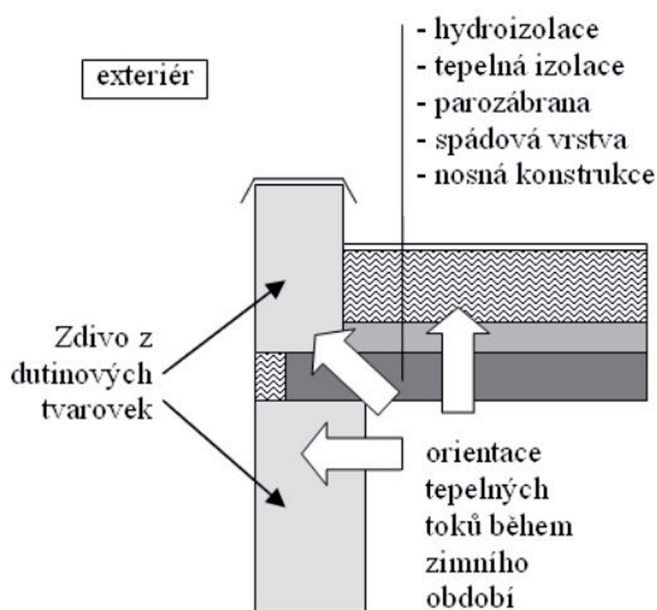
šíření tepla ♦ dutinové tvarovky ♦ tepelná vodivost ♦ CFD modelování

Key words:

heat transfer ♦ hollow bricks ♦ thermal conductivity ♦ CFD modelling

Recenzent:

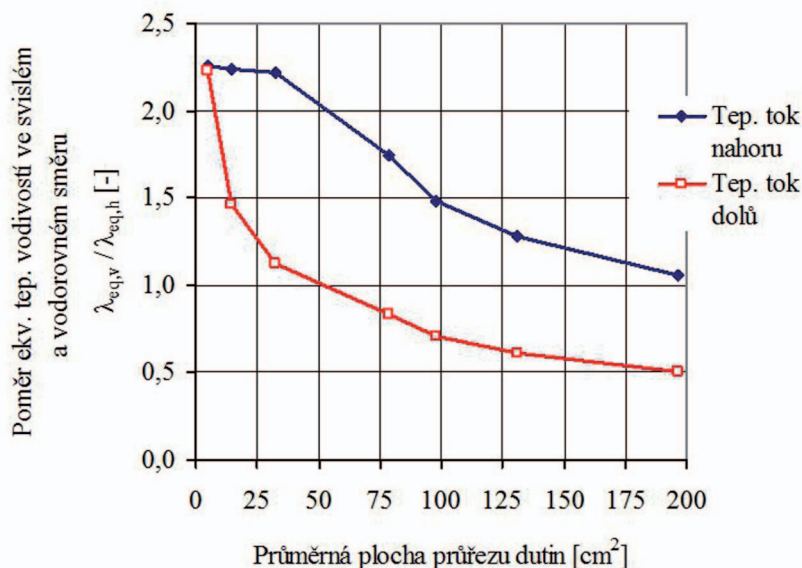
Jiří Šála



Obr. 1 Příklad typické tepelné vazby s výrazným vlivem svisle orientovaného tepelného toku

ku představují například práce [4-6], v nichž byl ale použit pouze zjednodušený 2D výpočetní model a navíc se v nich uvažují vesměs poměrně nízké vzduchové dutiny (poměr mezi výškou a šířkou dutin se pohybuje mezi 0,125 a 1). Podobně nízké dutiny se ale v soudobých dutinových tvarovkách nevyskytují (poměr výška/šířka se pro typické dutiny pohybuje od 1,5 do 25), takže výsledky těchto publikací se dají aplikovat jen omezeně.

V ČR se diskutovanou problematikou zabývala zatím pouze průkopnická práce [7]. Šíření tepla ve vzduchových dutinách se v ní ale modelovalo jen orientačně prostřednictvím ekvivalentní tepelné vodivosti odvozené metodikou ČSN EN ISO 6946. Citovaná norma předpokládá, že tepelný odpor vzduchové dutiny závisí pouze na směru tepelného toku, na rozdílu teplot mezi povrchy vzduchové dutiny, na emisivitách povrchů a na tloušťce dutiny ve směru tepelného toku. Výsledné vlastnosti vzduchové dutiny (vyjádřené s pomocí součinitelů přestupu tepla sáláním, vedením a prouděním) jsou tedy podle ČSN EN ISO 6946 nezávislé na rozměrech dutiny kolmo na směr tepelného toku. To ovšem neplatí zcela obecně a již vůbec ne v úzkých vysokých dutinách, které se vyskytují v diskutovaných dutinových tvarovkách. Pokud přes podobné dutiny prochází tepelný tok orientovaný svisle nahoru, ukazují dosud provedené analýzy, že vliv proudění se ztrácí, jakmile je výška dutiny větší než 20 násobek šířky dutiny [8]. U soudobých tvarovek pro jednovrstvé obvodové zdivo se poměr výšky a šířky vzduchových dutin běžně pohybuje nad touto hranicí, takže lze předpokládat,



Obr. 2 Poměr mezi ekvivalentní tepelnou vodivostí zdiva ve svislém a vodorovném směru a jeho závislost na průměrné průřezové ploše dutin ve tvarovce

že se v nich teplo šíří ve svislém směru pouze vedením (ve střepu a v dutinách) a sáláním (v dutinách). Tento závěr platí samozřejmě nejen pro tepelný tok orientovaný nahoru, ale i pro tepelný tok orientovaný dolů, protože v tomto směru je vliv proudění prakticky zanedbatelný pro jakékoli poměry mezi výškou a šířkou dutiny.

Přecenění vlivu proudění v úzkých svislých dutinách pro svislý tepelný tok, které bylo zavedené do práce [7] prostřednictvím modelu vzduchových dutin z ČSN EN ISO 6946, výrazně ovlivnilo publikované výsledky. Ekvivalentní tepelné vodivosti zdiva ve svislém směru vycházejí v práci [7] zhruba 6x vyšší než tepelné vodivosti pro vodorovný tepelný tok (přesně 5,7 až 6,6krát vyšší, přičemž výpočet byl proveden pro tvarovky Heluz Supertherm 44 STI a 44

P+D). Otázkou je, zda není podobné zvýšení tepelné vodivosti zdiva ve svislém směru až příliš na straně bezpečnosti.

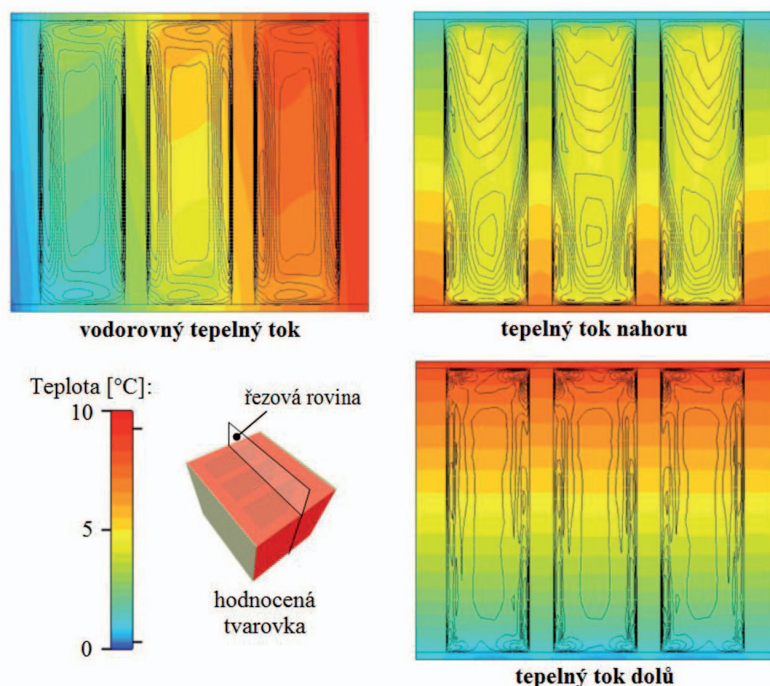
Cílem první prezentované studie bylo proto ověření závislosti mezi ekvivalentní tepelnou vodivostí zdiva z dutinových tvarovek ve svislém směru a průměrnou plochou průřezu vzduchových dutin (ve vodorovném řezu). Výpočty byly provedeny s pomocí CFD modelování, které umožní přesně zachytit konvektivní šíření tepla ve vzduchových vrstvách. Pro výpočty byl použit program Flovent [9].

Poměr mezi ekvivalentní tepelnou vodivostí ve svislém a vodorovném směru pro modelové zdivo

Výpočet byl proveden pro řadu modelových tvarovek, které se lišily po-

Tab. 1 Ekvivalentní tepelná vodivost zdiva z modelových dutinových tvarovek

Průměrná plocha průřezu vzduchových dutin A_c [cm²]	Počet dutin v jedné tvarovce	Ekvivalentní tepelná vodivost zdiva pro tepelný tok			Poměr mezi ekv. tepelnými vodivostmi	
		vodorovný $\lambda_{eq,h}$ [W/(m·K)]	nahoru $\lambda_{eq,v,u}$ [W/(m·K)]	dolů $\lambda_{eq,v,d}$ [W/(m·K)]	$\lambda_{eq,v,u} / \lambda_{eq,h}$ [-]	$\lambda_{eq,v,d} / \lambda_{eq,h}$ [-]
196,4	2	0,559	0,593	0,282	1,06	0,50
130,9	3	0,470	0,600	0,287	1,28	0,61
98,2	4	0,408	0,602	0,289	1,48	0,71
78,6	5	0,351	0,610	0,292	1,74	0,83
32,7	12	0,277	0,616	0,309	2,22	1,12
14,5	27	0,222	0,497	0,324	2,24	1,46
5,0	70	0,164	0,371	0,365	2,26	2,23



Obr. 3 Rozložení teplotních polí a izochar rychlostí proudění vzduchu ve tvarovce s malým počtem velkých dutin

četem a velikostí vzduchových dutin, přičemž jejich celkové rozměry zůstávaly stejné a odpovídaly běžně vyráběným tvarovkám (300 x 238 x 247 mm). Ve všech případech také tvořil vzduch 52% z celkové plochy průřezu tvarovky (toto procento odpovídá průměrnému podílu vzduchových dutin v soudobých tvarovkách). Ložné spáry byly uvažovány v tloušťce 12 mm a styčné spáry v tloušťce 3 mm – obojí pak vyplněné lehkou maltou. Pro keramický střepek byla předpokládána tepelná vodivost 0,5 W/(m·K) a pro lehkou maltu 0,2 W/(m·K).

V tab. 1 a na obr. 2 jsou uvedeny výsledky CFD analýzy, které ukazují jasně silnou závislost poměru mezi ekvivalentními tepelnými vodivostmi zdiva ve svislém a vodorovném směru na směr tepelného toku a na průměrné velikosti průřezu vzduchových dutin v keramických tvarovkách.

Tvarovky s malým počtem velkých dutin vykazují pro tepelný tok vzhůru poměrně nízké hodnoty poměru $\lambda_{eq,v}/\lambda_{eq,h}$ (do 1,5), protože jejich „horizontální“ ekvivalentní tepelná vodivost je dosti vysoká. Pro tepelný tok dolů je zároveň jejich poměr $\lambda_{eq,v}/\lambda_{eq,h}$ menší než 1, což znamená, že zdivo z těchto tvarovek má v tomto směru nižší ekvivalentní tepelnou vodivost než ve vodorovném směru. Tyto výsledky jsou způsobeny výrazným přirozeným prouděním v dutinách

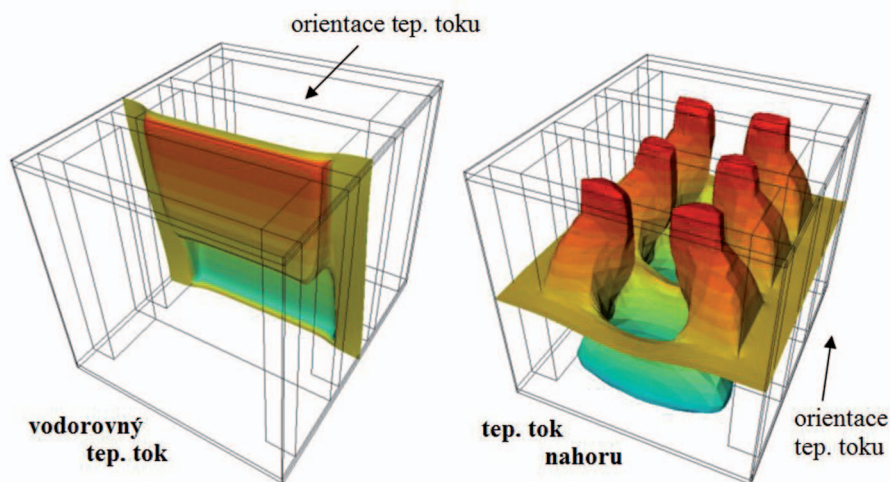
v případě tepelného toku orientovaného vodorovně a vzhůru a zanedbatelným prouděním pro tepelný tok orientovaný dolů. Velmi zřetelně dokumentuje tyto efekty rozložení teplot ve vzduchových dutinách na obr. 3 a 4.

Tvarovky s velkým počtem malých dutin mají zcela odlišné poměry mezi ekvivalentními tepelnými vodivostmi ve svislém a vodorovném směru $\lambda_{eq,v}/\lambda_{eq,h}$. Protože je tepelný tok prouděním v obou svislých směrech velmi blízký či rovný nule, teplo se šíří hlavně vedením. Konduktivní přenos tepla ve svislém směru se postupně zvyšuje, tak jak se zvyšuje i počet vzduchových dutin (a snižuje jejich průměrná průřezová

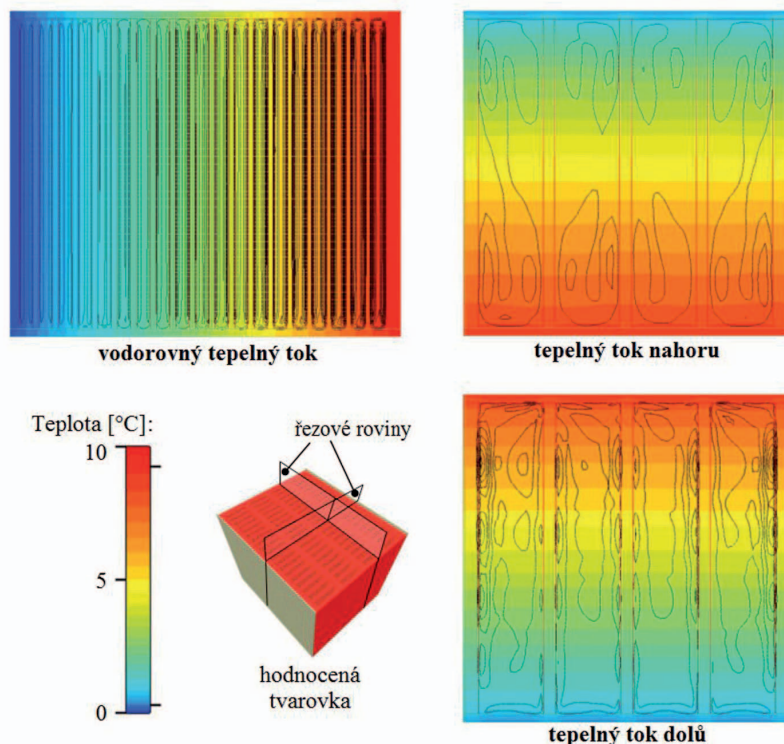
plocha). Příčinou je samozřejmě zvyšující se množství průsečíků voštin v příčném řezu cihlou. Vodorovný tepelný tok je současně u těchto tvarovek omezen kvůli velkému počtu dutin s malou průřezovou plochou. V případě extrémně perforovaných cihel (počet dutin 70 a více) je pak ekvivalentní tepelná vodivost prakticky shodná pro tepelný tok orientovaný dolů i nahoru. Poměr $\lambda_{eq,v}/\lambda_{eq,h}$ se pro podobné zdivo ustálí kolem hodnoty 2,2 – což jinými slovy znamená, že toto zdivo má více než dvojnásobnou ekvivalentní tepelnou vodivost ve svislém směru než ve směru vodorovném. Rozložení teplot v příčném řezu (obr. 5 a 6) zřetelně ukazuje, že vedení je převažujícím mechanismem šíření tepla. Deformace teplotního pole způsobená konvekcí ve tvarovkách s velkými dutinami (obr. 4) se v tomto případě nikde neobjevuje. Většina tepla se šíří keramickým střepekem a nikoli vzduchovými dutinami, což zřetelně ilustruje obr. 6, na kterém jsou izoplochy vybarveny podle velikosti tepelných toků.

Poměr mezi ekvivalentní tepelnou vodivostí ve svislém a vodorovném směru pro zdivo ze skutečně vyráběných dutinových tvarovek

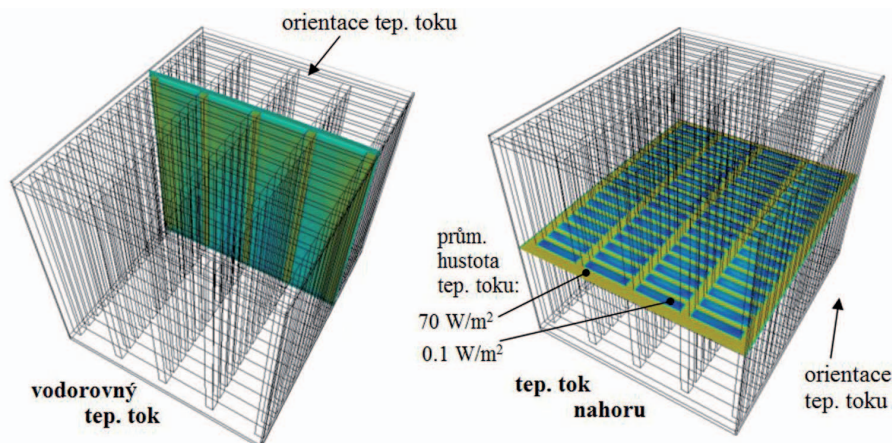
Výše diskutované modelové dutinové tvarovky neodpovídají zcela přesně skutečně vyráběným cihlám. Celková plocha vzduchových dutin ve vodorovném řezu modelovou tvarovkou sice v zásadě odpovídá ploše vzduchových dutin v reálné dutinové cihle, ale skutečná voštinová struktura vyráběných cihel je podstatně složitější (obr. 7). To může



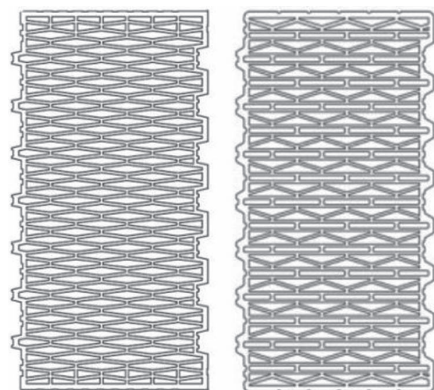
Obr. 4 Izoplocha reprezentující teplotu 4,5 °C ve tvarovce s malým počtem velkých dutin



Obr. 5 Rozložení teplotních polí a izochar rychlostí proudění vzduchu ve tvarovce s velkým počtem malých dutin



Obr. 6 Izoplocha reprezentující teplotu 4,5 °C ve tvarovce s velkým počtem malých dutin



Obr. 7 Příklady struktury soudobých dutinových keramických tvarovek

být samozřejmě příčinou různých odchylek poměru $\lambda_{eq,v}/\lambda_{eq,h}$ od hodnot uvedených v tab. 1.

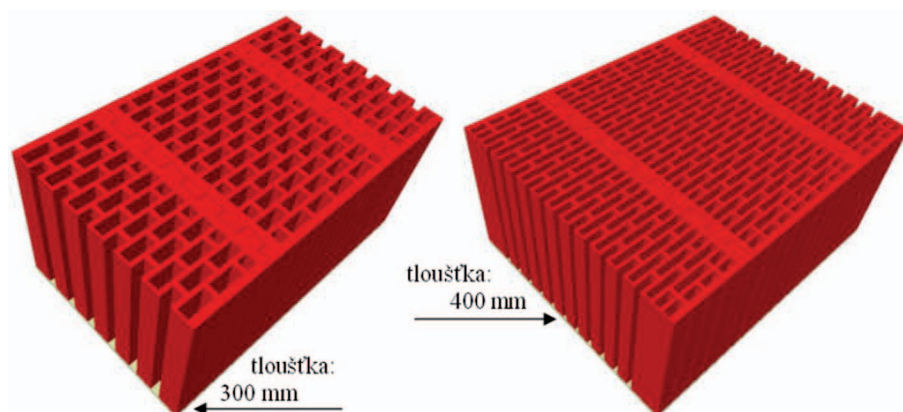
Aby bylo možné zjistit případné rozdíly mezi výsledky pro modelové a pro skutečné zdivo, byly vybrány tři skutečné dutinové cihelné tvarovky z produkce renomovaného výrobce cihlářských materiálů. Výrobce pro ně uvádí pouze obvyklé hodnoty ekvivalentní tepelné vodivosti zdiva ve vodorovném směru. Tyto hodnoty je možné použít pro další verifikaci vytvořených CFD modelů zdiva (obr. 8), přičemž chybějící ekvivalentní tepelné vodivosti ve svislém směru jsou cílem výpočtu.

Výsledky analýzy jsou uvedeny v tab. 2 a na obr. 9. Všechny výsledky byly stanoveny pro předpoklad laminárního proudění ve vzduchových dutinách a pro tepelnou vodivost střeptu 0,5 W/(m·K) v případě tvarovek tl. 300 mm a 0,3 W/(m·K) v případě tvarovek tl. 400 a 440 mm. Tepelná vodivost malty byla uvažována 0,2 W/(m·K). Jak je patrné z tab. 2, vypočtené ekvivalentní tepelné vodivosti ve vodorovném směru se od hodnot uváděných výrobcem neliší o více než 3,5 %.

Poměr mezi ekvivalentními tepelnými vodivostmi ve svislém a ve vodorovném směru se pohybuje od 2,2 do 2,7 v závislosti na typu tvarovek. Výsledky pro zdivo z tvarovek tl. 300 mm odpovídají prakticky přesně výsledkům pro modelové cihly uvedeným v tab. 1. V případě zdiva z tvarovek tl. 400 a 440 mm se objevují rozdíly, které jsou pravděpodobně způsobené sofistikovanější strukturou reálných cihel a s tím související nižší ekvivalentní tepelnou vodivostí ve vodorovném směru. Lze očekávat, že v případě ještě komplexnějších prů-

Tab. 2 Ekvivalentní tepelné vodivosti zdiva z reálných dutinových tvarovek

Tloušťka zdiva	Měření (úplné či částečné)	CFD výpočet					
		Ekvivalentní tepelná vodivost zdiva pro směr tepelného toku:				Poměr mezi ekv. tepelnými vodivostmi:	
		vodorovný	vodorovný	nahoru	dolů	$\frac{\lambda_{eq,v,u}}{\lambda_{eq,h}}$	$\frac{\lambda_{eq,v,d}}{\lambda_{eq,h}}$
		d [mm]	$\lambda_{eq,h,test}$ [W/(m·K)]	$\lambda_{eq,h,CFD}$ [W/(m·K)]	$\lambda_{eq,v,u,CFD}$ [W/(m·K)]	$\lambda_{eq,v,d,CFD}$ [W/(m·K)]	$\frac{\lambda_{eq,v,u}}{\lambda_{eq,h}}$ [-]
300	0,250	0,259	0,565	0,561	2,18	2,17	
400	0,131	0,132	0,353	0,350	2,67	2,65	
440	0,152	0,156	0,380	0,377	2,44	2,42	



Obr. 8 CFD modely zdiva z reálných dutinových tvarovek

řezů (obr. 7) by mohl poměr $\lambda_{eq,v}/\lambda_{eq,h}$ dosáhnout hodnot až kolem 3. Potřebný výzkum v tomto směru se připravuje a jeho výsledky budou následně rovněž publikovány.

Tento příspěvek byl podpořen výzkumným záměrem MSM 6840770005.

Literatura

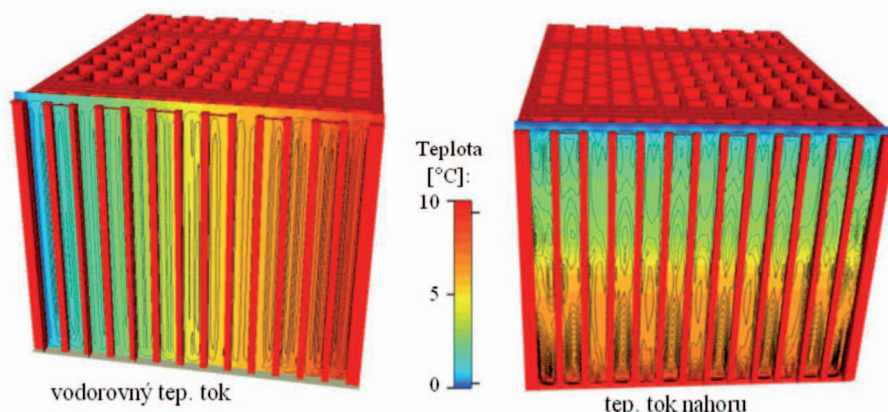
- [1] VASILE C., LORENTE S., PERRIN B., Study of Convective Phenomena Inside Cavities Coupled with Heat and Mass Transfer through Porous Media – Application to Vertical Hollow Bricks – A First Approach, *Energy and Buildings*, 28 (3): 229-235, 1998.
- [2] AL-HAZMY M. M., Analysis of Coupled Natural Convection-Conduction Effects on the Heat Transport through Hollow Building Blocks, *Energy and Buildings*, 38 (5): 515-521, 2006.
- [3] SUN J., FANG L., Numerical Simulation of Concrete Hollow Bricks by

the Finite Volume Method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (23-24): 5598-5607, 2009.

- [4] AIT-TALEB T., ABDELBAKI A., ZRIKEM Z., Numerical Simulation of Coupled Heat Transfers by Conduction, Natural Convection and Radiation in Hollow Structures Heated from Below or Above, *International*

Journal of Thermal Sciences, 47 (4): 378-387, 2008.

- [5] HASNAOUI M., BILGEN E., VASSEUR P., Natural Convection Heat Transfer in Rectangular Cavities Partially Heated from Below, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 6 (2): 255-264, 1992.
- [6] CALCAGNI B., MARSILI, F., PARONCINI, M., Natural Convective Heat Transfer in Square Enclosures Heated from Below, *Applied Thermal Engineering*, 25 (16): 2522-2531, 2005.
- [7] ŠUBRT R., *Anizotropie stavebních materiálů a její vliv na tepelné mosty*, <http://www.tzb-info.cz/3200-anizotropie-ci-helných-materialu-a-její-vliv-na-tepelne-mosty>, 2006.
- [8] SVOBODA Z., *Šíření tepla ve zdivu z dutinových tvarovek ve svislém směru*, 6. konference IBPSA CZ „Simulace budov a techniky prostředí 2010“, Praha 2010 (v tisku).
- [9] Mentor Graphics, FloVENT 8.1, Wilsonville, Oregon 2008.



Obr. 9 Rozložení teplotních polí ve zdivu z tvarovky tl. 300 mm

17. Betonářské dny 2010

17th Concreting days 2010 congress

Česká betonářská společnost ČSSI a ČBS Servis, s. r. o. Vás zvou na konferenci s mezinárodní účastí 17. Betonářské dny 2010 spojenou s výstavou BETON 2010.

Odborný program konference proběhne v úterý 23. listopadu a ve středu 24. listopadu 2010 v prostorách Kongresového centra ALDIS (KC Aldis) v Hradci Králové, Eliščíno nábřeží 375; přednášky paralelně ve Velkém sále (Sál A) a v Malém sále (Sál B), Betonářské kino ve výstavní síni v 1. patře. V prostorách centra ALDIS proběhne i výstava.

Konference se koná pod záštitou:

- Ing. Martina Kocourka, ministra průmyslu a obchodu ČR
Ing. Václava Matyáše, prezidenta Svazu podnikatelů ve stavebnictví v ČR
Ing. Jaroslava Míla, MBA, prezidenta Svazu průmyslu a dopravy ČR
Ing. Svatopluka Zídka, prezidenta Českého svazu stavebních inženýrů