

PROFESORSKÁ PŘEDNÁŠKA

MODELOVÁNÍ TRANSPORTNÍCH JEVŮ
V KONSTRUKČNÍCH PRVCÍCH
SE SLOŽITOU VNITŘNÍ GEOMETRIÍ

doc. Ing. JIŘÍ MADĚRA, Ph.D.

ČVUT



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Civil Engineering

doc. Ing. JIŘÍ MADĚRA, Ph.D.

**Modelování transportních jevů v konstrukčních
prvcích se složitou vnitřní geometrií**

Modelling of Transport Processes in Building Elements
with Complex Internal Geometry

Praha, 2021

Summary

Hollow clay blocks represent one of the most widely used building materials in these days. Their origin is dated back to the end of 20th century, when first thermal standards were introduced and requirements towards energy efficiency of buildings started being enforced. Since their launch, clay blocks have experienced rapid development, mainly due to industrial progress, technological innovations and gradually increasing requirements on the functional properties of building materials. Their contemporary design, which is characterized by a complex internal geometry, reflects the outcomes of long-term research that provided those blocks with outstanding features, especially thermal insulating capabilities.

The development of clay blocks and optimization of their properties require an application of advanced techniques that involve various approaches of computational modeling. However, the complex internal geometry of these elements may act as a serious hindrance. Therefore, the computational research of clay bricks is considered as a challenging task which must be overcome to discover new enhancements and improvements.

The objective of this work is to present selected solutions in the field of building physics, which are based on the computational analysis of transport phenomena in the blocks with a complex internal geometry. In the introduction, the state-of-the-art is provided, which is dedicated to recent computational methods applied for the research of brick blocks. This part is followed by a theory of mathematical models suitable for a description of transport processes in the system containing voids and hollows. The second part refers to practical applications of selected computational techniques that helped to identify effective thermal properties of analyzed blocks. Finally, the outcomes of advanced computational techniques are reported to show the potential of the acquired knowledge in the field of computer modeling and material characterization of hollow bricks.

Souhrn

Dutinové cihelné bloky jsou v současnosti jedním z nejpoužívanějších stavebních materiálů. Impulsem pro vznik tohoto typu zdících prvků bylo zavádění nových norem na konci 20. století, které specifikovaly požadavky na tepelněizolační vlastnosti stavebních konstrukcí. Od svého uvedení na trh zaznamenaly dutinové cihly překotný vývoj, a to zejména díky technologickému rozvoji a neustále se zpřisňujícím požadavkům na funkční vlastnosti stavebních materiálů. Současná podoba cihelných tvárnic, které je charakteristická složitou vnitřní geometrií, je výsledkem dlouhodobého vývoje a výzkumu, díky čemuž disponují tyto výrobky vynikajícími vlastnostmi, zejména v oblasti tepelné techniky.

Při vývoji dutinových cihel a optimalizaci jejich funkčních vlastností je nutné využívat nejmodernější postupy, mezi které patří různé metody počítačového modelování. Složitá vnitřní geometrie těchto prvků však může být limitujícím faktorem. Aplikace počítačového modelování v oblasti výzkumu dutinových cihel proto představuje určitou výzvu, jejíž překonání je základním předpokladem pro další jejich vývoj.

Cílem této práce je prezentace vybraných úloh počítačového modelování v oblasti stavební fyziky, které jsou zaměřeny na analýzu transportních jevů v dutinových cihlách se složitou vnitřní geometrií. V úvodu této práce je popsán současný stav z hlediska modelování v oblasti výzkumu dutinových cihel. Následuje teoretická část zabývající se popisem matematických modelů, které je možné aplikovat v podmínkách složitě vnitřní geometrie těchto prvků. Druhá polovina práce je zaměřena na konkrétní aplikace počítačového modelování. Nejprve je prezentováno a zhodnoceno několik vybraných metod pro identifikaci efektivních tepelných parametrů dutinových cihel. V závěru je popsáno několik pokročilých analýz, které byly provedeny s využitím získaných poznatků v oblasti počítačového modelování a materiálové charakterizace dutinových cihel.

Klíčová slova

Transport tepla a vlhkosti, tepelné vlastnosti, cihelný blok, efektivní součinitel tepelné vodivosti

Keywords

Heat and moisture transport, thermal properties, hollow brick, effective thermal conductivity

Obsah

1. Úvod	7
2. Matematické modelování	10
2.1 Sdružený transport tepla a vlhkosti v porézním systému	10
2.2 Transport tepla v dutinách	12
2.2.1 Přenos tepla konvekcí	12
2.2.2 Přenos tepla radiací	15
3. Stanovení efektivních tepelných parametrů dutinových cihel ..	18
3.1 Aproximace s využitím „lumped“ modelu	18
3.2 Modifikovaná experimentální metoda „hot-plate“	22
3.3 Homogenizační metody na makroúrovni	27
3.4 Experimentální validace	29
4. Pokročilé analýzy cihelných bloků s dutinami	32
4.1 Okrajové podmínky	32
4.2 Degradace povrchových vrstev budov vlivem mrazu.....	33
4.3 Energetická náročnost budov	34
5. Závěr	38
Literatura	40

Poděkování

Životopis

1. Úvod

Prudký rozvoj výpočetní techniky, který je charakteristický exponenciálním nárůstem výpočetního výkonu, ovlivnil prakticky každou oblast lidské činnosti. Pro oblast vědy a techniky měl tento rozvoj naprosto zásadní vliv. S nárůstem výpočetního výkonu se otevřel zcela nový prostor pro zavedení moderních výpočetních metod a postupů, díky čemuž získalo počítačové modelování velmi cennou schopnost – a sice řešit rozsáhlé a komplexní úlohy, které se ještě před několika dekádami zdály být neřešitelné. V dnešní době je počítačové modelování nedílnou součástí všech inženýrských a vědních oborů od biomedicíny (Zhang a kol., 2008, Babaeva a Naidis, 2018), přes dopravu (Deng, 2016, Xu a kol., 2011), elektrotechniku (Siam a Abdo, 2020, Suvorov a kol., 2019), chemii (Arguello-Luengo a kol., 2019, Martin a kol., 2019), letectví (Kieckhafer a kol., 2018, Moreno-Gomez a kol., 2021, Planes a kol., 2021), meteorologii (An a kol., 2020, Kumar a kol., 2021), stavebnictví (Naranjo-Perez a kol., 2021, Schaaf a kol., 2020, Akhtar a Sarmah, 2018), strojírenství (Li a Yu, 2020, Voitenko a kol., 2019) či vesmírné inženýrství (Shen a kol., 2021, Wang, 2020). Schopnost simulovat reálné úlohy pomocí počítačového modelu přináší nesporné výhody, jakými jsou např. studování systémů bez nutnosti jejich fyzické existence, možnost opakování simulací a experimentů, zkoumání široké škály variantních řešení, relativně rychlé generování výsledků, relativně snadná změna vstupních podmínek a parametrů apod. To vše ve výsledku přináší značnou úsporu času a finančních prostředků při současném minimalizaci rizik.

V oblasti stavebního inženýrství se počítačové modelování využívá v celé řadě případů od návrhů konstrukcí jako celků, simulací jejich odezvy vlivem různých typů zatížení až po vývoj a optimalizaci materiálů na mikroúrovni. Způsob využití počítačového modelování je vždy specifický a musí být přizpůsoben požadavkům a podmínkám dané úlohy.

Cílem této práce je prezentace vybraných aplikací pokročilých metod v oblasti stavební fyziky, které využívají počítačové modelování. Složitost a komplexnost těchto úloh prakticky vylučuje využití standardních postupů, díky čemuž se počítačové modelování stává zřejmě jediným dostupným způsobem řešení, který je schopen poskytnout adekvátní výsledky v přijatelném čase. Společným prvkem vybraných aplikací je analýza transportních jevů v dutinových cihlách, jejichž vnitřní geometrie je velmi složitá a vyžaduje pokročilé metody počítačového modelování.

Jakkoliv v úvodu zazněla pozitiva a výhody počítačového modelování, je také na místě zmínit nevýhody a nedostatky, které musí být zhodnoceny před každou aplikací. Asi nejzásadnějším nedostatkem je

skutečnost, že každý počítačový model předpokládá určité zjednodušení reálného problému. Toto zjednodušení je dáno zejména snahou o zkrácení doby řešení s ohledem na dostupný výpočetní výkon, snížení počtu vstupních parametrů či jejich zjednodušení s cílem zachování uživatelské přívětivosti, nedokonalá teoretická znalost zkoumaných jevů nebo přizpůsobení problému požadavkům použitého modelu.

V případě tepelně-vlhkostních simulací obvodových pláštů budov z dutinových cihel s komplexní vnitřní geometrií (viz. obr. 1) se obvykle problém zjednodušuje na úlohu dvourozměrného nebo dokonce jednorozměrného vedení tepla a vlhkosti. Je proto nutné definovat, jakým způsobem se bude k dutinovým cihlám přistupovat v rámci počítačové aproximace. Dutinovou cihlu lze definovat dvěma přístupy. V prvním případě se k dutinové cihle přistupuje jako k makroskopicky homogennímu materiálu s efektivními parametry, které se mohou lišit v různých směrech. Ve druhém se k ní přistupuje jako k heterogennímu materiálu, ve kterém jsou cihelný stěp a dutiny modelovány jako samostatné oblasti. Oba přístupy jsou legitimní a přinášejí určité výhody i nevýhody.



Obr. 1: Zjednodušené schéma vzduchové dutiny (Kočí a kol., 2015a)

Homogenizace tepelně-vlhkostních parametrů stavebních materiálů není jednoduchá, což platí obzvláště pro cihelné bloky s makroskopickým systémem vnitřních dutin. Některé typy těchto pokročilých cihel obsahují různé druhy tepelněizolačních výplní (např. polystyren, minerální vlnu, polyuretan apod.), což má zásadní vliv na vlhkostní a tepelné chování cihelného bloku jako celku. Případná absence výplní dutin úlohu homogenizace ještě více komplikuje. Zatímco dominantním způsobem přenosu tepla v dutinových cihlách s výplněmi je kondukce, v případě cihel bez výplní je nutné uvažovat i s dalšími způsoby přenosu tepla ve formě konvekce a radiace. Vzhledem k vnitřní geometrii dutinových cihel je navíc nutné, aby na tento prvek bylo pohlíženo jako na anizotropní materiál. Příklady posouzení tepelně-vlhkostních parametrů těchto druhů cihel lze

nalézt v odborné literatuře ve formě studií a vědeckých prací (Kočí a kol., 2014b, Kočí a kol., 2015b, Zukowski a Haese, 2010, Kočí a kol., 2014d). Stanovení efektivních materiálových vlastností dutinových cihel výrazně zjednodušuje řešené úlohy a je nezbytnou podmínkou pro některé typy aplikací, například stanovení energetické náročnosti budov, optimalizaci skladeb obvodových pláštů apod. (Maděra a kol., 2018, Maděra a kol., 2017b, Maděra a kol., 2010).

Druhým přístupem k dutinovým cihlám v rámci počítačového modelování je zachování složité struktury v rámci diskretizace řešeného problému. Na rozdíl od homogenizace je v případě toho přístupu rozlišováno mezi jednotlivými fázemi dutinového střepu, a to včetně jejich materiálových parametrů a prostorové konfigurace. Počítačový model tak rozlišuje mezi cihelným střepem, který tvoří nosnou část stavebního prvku, a izolačními výplněmi či vzduchovými dutinami. Homogenizační metody jsou často aplikovány na jednotlivé materiály, avšak existují i takové modely, které popisují materiál na mikroúrovni. Tyto modely obecně zvyšují náročnost řešení a kladou velmi vysoké nároky na výpočetní kapacitu. Na druhou stranu ale poskytují výsledky v mnohem detailnějším rozlišení. Pro řešení těchto úloh lze využít metody paralelizace, kdy je celá úloha řešena současně na několika počítačích (jádrech) tvořících cluster. Metoda paralelizace byla využita např. pro tepelně-vlhkostní analýzu cihelného bloku vyplněného minerální vlnou (Maděra a kol., 2017a).

Výše uvedený výčet metod naznačuje, že počítačové modelování transportních jevů v dutinových cihlách je velmi specifické a obsahuje mnohá úskalí. Ačkoli dutinové cihly představují jeden konkrétní segment stavebního trhu, problematika s ním spojená je natolik rozsáhlá a komplikovaná, že přesahuje do několika vědních disciplín. Tato práce je zaměřena jen na jednu konkrétní část této problematiky, kterou je analýza přenosu tepla v dutinových cihlách vyplněných vzduchem. V rámci této práce jsou představeny tři různé metody počítačového modelování pro stanovení efektivního součinitele tepelné vodivosti dutinových cihel. Aplikace získaných efektivních parametrů je demonstrována ve dvou studiích prezentovaných v závěru této práce.

2. Matematické modelování

Základním předpokladem pro vznik počítačového modelu je existence matematického modelu popisující daný problém. Matematický model je nejčastěji definován teoreticky na základě fyzikálních vlastností systému, případně empiricky na základě pozorování. Implementací matematického modelu do počítačového prostředí vzniká počítačový model, který obsahuje také konkrétní numerickou metodu pro řešení rovnic matematického modelu.

Tato kapitola popisuje teoretický přístup k modelování transportních jevů v konstrukčních prvcích se složitou geometrií, které jsou reprezentovány dutinovými cihelnými bloky. Matematické modely nejčastěji popisují samostatný přenos tepla případně sdružený přenos tepla a vlhkosti. Modelování samostatného přenosu vlhkosti je méně obvyklé a používá se jen ve specifických případech, např. při simulaci laboratorních experimentů v izotermických podmínkách (Kočí a kol., 2013b, Kočí a kol., 2013a).

Keramický stěp dutinových cihel lze na mikroskopické úrovni definovat jako porézní materiál, tj. materiál, který se skládá z pevné části (matrice) a pórů obsahujících další fázi (nejčastěji vodu nebo vzduch). Pokud jsou dutiny vyplněny izolačním materiálem, lze na ně nahlížet jako na další porézní materiál. Dominantním přenosem tepla je v tomto případě konduktce. Konvekce a radiace může být vzhledem k velikosti pórů zanedbána. Pokud budou dutiny vyplněny jen vzduchem, je nutné do analýzy zahrnout i další formy přenosu tepla ve formě konvekce a radiace.

Transport vlhkosti probíhá ve všech případech, ať už se jedná o cihelný stěp nebo dutinu vyplněnou vzduchem či izolační materiálem. V porézním prostředí lze přenos vlhkosti charakterizovat pomocí difuzních či konvektivních teorií. V dutinách se uplatňuje konvekce, jejíž popis vyžaduje implementaci *CFD* modelů (Computational Fluid Dynamics), které nejsou součástí této práce.

2.1 Sdružený transport tepla a vlhkosti v porézním systému

Modelování sdruženého transportu tepla a vlhkosti v porézních materiálech je velmi používanou disciplínou. Nejčastějším přístupem k modelování toků v porézním prostředí je využití principu statistické mechaniky. Tento princip předpokládá prostorové vyhlazení bodových veličin pomocí průměrných hodnot a vytvoření umělého kontinua.

Základní modely sdruženého přenosu tepla a vlhkosti můžeme rozdělit do tří hlavních skupin na základě transportního mechanismu vedení

vlhkosti. První skupinou jsou tzv. konvektivní modely, které jsou založeny na předpokladu, že vlhkost proudí v porézním systému materiálu kanálky (kapiláry, soustava pórů) obdobně jako např. v potrubí. Tyto modely byly primárně sestaveny pro modelování proudění vody v půdách, nicméně se rozšířily i do dalších vědních oborů. Základní empirickou rovnicí proudění zformuloval Darcy (1856), který řešil tok vody ve sloupci s pískem. Druhou skupinu tvoří difúzní modely, které jsou založeny na předpokladu, že vlhkost, ať už v plynné či kapalně fázi, je transportována v porézním systému materiálu mechanismem podobným přenosu ve směsi dvou plynů. Za autory tohoto přístupu lze považovat Krischera (1942) a Lykova (1954), kteří pracovali nezávisle na sobě. Třetí skupinou jsou modely, které používají všechny výhody z předchozích dvou skupin modelů.

Difúzní model popisující sdružený přenos tepla a vlhkosti představil Krischer (1963). V tomto modelu bylo uvažováno s fázovými změny mezi kapalnou vlhkostí a vodní párou, nicméně křížové efekty byly opominuty. Další model spadající do kategorie difúzních modelů představil Lykov (Lykov, 1966, Lykov, 1972). Tento model lze z termodynamického hlediska považovat za přesnější než model Krischerův. Lykov definoval bilanční rovnici vlhkosti jako součet parciálních hustot toků plynné a kapalně vlhkosti. Oba výše uvedené difúzní modely (Krischerův a Lykovův) posloužily jako inspirace pro další autory, kteří z těchto modelů primárně vycházeli a postupně je dokázali rozvinout. Např. Kiessl ve své disertační práci (1983) popsal obsah vodní páry a relativní vlhkost vzduchu pomocí parciální hustoty namísto parciálního tlaku vodní páry.

Jedním z nejpoužívanějších modelů současného přenosu tepla a vlhkosti v porézním prostředí je Künzlův model (1995). Tento model vychází z Krischerova schématu, nicméně zavádí určitá zjednodušení. Na základě provedené analýzy (Kočí a kol., 2010) byl tento difúzní model vybrán jako nejvhodnější model pro popis přenosu tepla a vlhkosti. Ačkoli je tento model poměrně rozšířený a oblíbený, ve své původní podobě obsahuje určitá úskalí při popisu přenosu vlhkosti. Z tohoto důvodu byla provedena modifikace bilanční rovnice vlhkosti (Maděra a kol., 2017a) s cílem dosažení vyšší přesnosti. Modifikovaná bilanční rovnice vlhkosti má tvar

$$\left[\rho_w \frac{dw}{dp_v} + (n - w) \frac{M}{RT} \right] \frac{\partial p_v}{\partial t} = \text{div} \left[D_g \text{grad } p_v \right], \quad (1)$$

a bilance tepla má tvar

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + L_v \text{div}[A_v \delta_p \text{grad}(p_v)], \quad (2)$$

kde ρ_w ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota vody, w ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) je objemová vlhkost, n je pórovitost (-), M ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$) je molární hmotnost vodní páry, R ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) je univerzální plynová konstanta, D_g (s) je globální transportní funkce vlhkosti, p_v (Pa) je parciální tlak vodní páry, δ_p (s) je permeabilita vodní páry, H ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota entalpie, L_v ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) je latentní teplo vypařování vody, λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti, T (K) je termodynamická teplota a A_v (-) je koeficient příslušnosti. Podrobněji tento model popsal Kočí ve své práci (2018a). Porovnání počítačové analýzy s použitím základního a modifikovaného Künzelova modelu provedl Maděra (2017).

2.2 Transport tepla v dutinách

Rozměry dutin uvnitř cihelného bloku neumožňují přistupovat k těmto oblastem jako k pórům. Bilance vedení tepla proto musí zahrnovat i další způsoby přenosu tepla, které tvoří nezanedbatelný podíl celkového množství přenesené energie. Bilanční rovnice jsou proto rozšířeny o přenos tepla konvekcí (proudění) a radiací (sálání).

2.2.1 Přenos tepla konvekcí

Základní rovnice pro modelování proudění v tekutinách zahrnují zákon zachování hmoty (rovnice continuity) a zákon zachování hybnosti. Rovnice continuity v obecném tvaru lze vyjádřit

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (3)$$

kde ρ je hustota tekutiny ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), t je čas (s), u_i jsou komponenty vektoru rychlosti (u , v a w) a x_i definuje osy Kartézské soustavy souřadnic (x , y , a z).

Při proudění nestlačitelných tekutin lze rovnici continuity vyjádřit jako

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0. \quad (4)$$

Bilanční rovnice hybnosti má tvar

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{f}, \quad (5)$$

kde p je tlak (Pa), $\boldsymbol{\tau}$ je dynamický tenzor napětí a \mathbf{f} je vnější pole objemových sil.

Při proudění newtonských kapalin je zvykem dosadit konstitutivní rovnici (Newtonův zákon) do dynamické Cauchyho rovnice, a tím eliminovat neznámé složky tenzoru dynamických napětí a snížit tím počet rovnic. Takto získané rovnice se nazývají Navier-Stokesovy (N-S) a jsou základem pro modelování proudění tekutin a jejich řešením. Při konkrétních okrajových a počátečních podmínkách získáme znalost o rychlosti a tlaku v dané oblasti.

V oblasti dynamiky tekutin jsou různé režimy proudění, které jsou kategorizovány podle bezrozměrného Reynoldsova čísla, které vyjadřuje poměr setrvačných sil k silám vazkým a je vhodný pro předpovídání, zda bude proudění laminární nebo turbulentní. Reynoldsovo číslo (-) má tvar

$$\text{Re} = \frac{u \rho L}{\mu}, \quad (6)$$

kde L (m) je charakteristický lineární rozměr, u ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) je rychlost proudění kapaliny, ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota kapaliny, μ ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$) je dynamická viskozita.

V případech, kdy je Reynoldsovo číslo menší než 2000 (pro kruhové potrubí $\text{Re} = 2300$), se jedná o laminární proudění. Je-li Reynoldsovo číslo je větší než 4000, jedná se o turbulentní proudění. Pokud je Reynoldsovo číslo mezi limitními hodnotami, jedná se o přechodové proudění.

Pokud se při proudění uvažuje s transportem tepla, je nutné zahrnout i zákon zachování energie který lze zapsat

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T, \quad (7)$$

kde c_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrná tepelná kapacita, S_T ($\text{K} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) vyjadřuje zdroj tepla. Při modelování toku tekutin v děrovaných cihlách je lepší obecnou N-S rovnici upravit, protože v dutinách bloků ve většině případů vzniká tzv. přirozená, volná konvekce. Přirozená konvekce je proudění kapaliny nebo plynu, které není závislé na vnějším zdroji, ale na

objemových změnách, například vlivem teploty v gravitačním poli. Nejpoužívanější zjednodušení N-S rovnic pro stlačitelné tekutiny je Boussinesqova aproximace, která řeší neizotermické proudění. Tuto aproximaci pro výpočty použil například (Sun a Fang, 2009, Alhazmy, 2010, Li a kol., 2008) a výsledné rovnice jsou v tomto tvaru

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} &= \\ &= \frac{1}{\rho_{air}} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{air} \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} &= \\ &= \frac{1}{\rho_{air}} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{air} \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) + (\rho\beta)_{air} g \Delta T \right], \end{aligned} \quad (9)$$

kde β (K^{-1}) je součinitel objemové tepelné roztažnosti, g ($m \cdot s^{-2}$) je gravitační zrychlení, ΔT (K) je rozdíl teplot.

U přirozené konvekce nerozhoduje o typu proudění Reynoldsovo číslo, ale Rayleighovo číslo (-), které je definováno ve tvaru

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad (10)$$

kde Gr (-) je tzv. Grashofovo číslo, Pr (-) je Prandtlovo číslo, které vyjadřuje míru podobnosti mezi rychlostním a teplotním polem a je definováno

$$Pr = \frac{\gamma}{a}, \quad (11)$$

kde γ ($m^2 \cdot s^{-1}$) je kinematická viskozita tekutiny, a ($m^2 \cdot s^{-1}$) je součinitel teplotní vodivosti a Grashofovo číslo je definováno

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\gamma^2}, \quad (12)$$

kde L je charakteristický rozměr oblasti (m).

Pro vertikální stěny lze pro hodnoty Rayleighova čísla stanovit typ proudění na:

$$Ra < 10^8 - \text{laminární proudění}$$

$10^8 < Ra < 10^{10}$ – přechodová oblast

$10^{10} > Ra$ – turbulentní proudění

Dalším důležitým koeficientem je tzv. Nusseltovo číslo (-), které je definováno jako poměr konvektivního přenosu tepla k vedení tepla a lze ho vyjádřit jako.

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \quad (13)$$

kde α ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) je součinitel přestupu tepla, L (m) je charakteristická délka a λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti. Za předpokladu tepelně hraniční vrstvy s volnou konvekcí a laminárního proudění na svislé polokonečné ploché desce lze Nusseltovo číslo vyjádřit jako (Churchill a Chu, 1975)

$$Nu = 0,68 + \frac{0,67Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}. \quad (14)$$

2.2.2 Přenos tepla radiací

Přenos tepla radiací (sáláním) je realizován prostřednictvím elektromagnetického vlnění, které se šíří v prostoru rychlostí světla. Jako tepelné záření se označuje obvykle rozsah infračerveného záření s délkou vlny od 0,8 do 360 μm . Toto záření je pohlcováno tělesy a jeho energie se při tom změní v energii tepelnou. Vzhledem k tomu, že není žádný rozdíl mezi tepelným a jiným elektromagnetickým zářením, lze každé záření spojit s přenosem energie. Vznik tepelného záření ze zdroje tepelné energie se označuje jako emise, přeměnu záření v tepelnou energii jako absorpce. Přeměna záření v teplo, a naopak, je vázána na hmotnost tělesa. Množství vyzařené energie je závislé jen na vlastnostech zářiče, nikoliv na jeho okolí. Vedle teploty zářiče jsou pro emise důležité také vlastnosti povrchu zářiče. Vyzářená energie se při dopadu na jiné těleso částečně odráží, část tělesem prochází a také je jím pohlcena. Každé těleso nepřetržitě vyzařuje, pohlcuje, odráží a propouští zářivou energii. Celý proces má tak za následek sdílení tepla radiací (Kalčík a Sýkora, 1973). Celková energie záření E_I ($W \cdot m^{-2}$) dopadající na jednotku plochy povrchu tělesa za jednotku času je hustota dopadajícího zářivého toku, kterou lze zapsat jako

$$E_I = E_R + E_A + E_D, \quad (15)$$

kde E_R ($W \cdot m^{-2}$) je odražená energie, E_A ($W \cdot m^{-2}$) je pohlcená energie a E_D ($W \cdot m^{-2}$) je prošlá energie. Vydělíme-li tuto rovnici celkovým tokem E_i , dostaneme poměrné zastoupení jednotlivých složek

$$1 = R + A + D, \quad (16)$$

kde R (-) je poměrná tepelná odrazivost, A (-) je poměrná tepelná pohltivost a D (-) je poměrná propustnost. Tyto veličiny jsou bezrozměrné a nabývají hodnot v intervalu 0 až 1. Je-li $A = 1$, pak $R = 0 \wedge D = 0$ a celá dopadající energie je pohlcena tělesem. Takové těleso je dokonale černým.

Pro technické výpočty je úhrnné množství energie, které dokonale černé těleso o jednotkové ploše vysílá za jednotku času, dáno Stefan-Boltzmanovým zákonem ve tvaru

$$E_o = \sigma_{SB} T^4, \quad (17)$$

kde σ_{SB} ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$) je Stefan-Boltzmannova konstanta a T (K) je termodynamická teplota. Tento zákon platí pro černá tělesa, ale lze ho zobecnit i pro tzv. šedá tělesa pomocí emisivity tělesa ε (-), která je definována jako

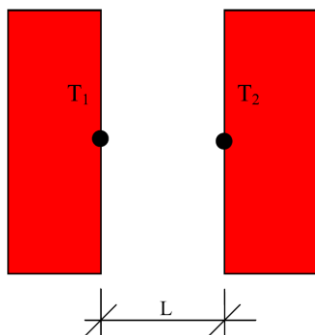
$$\varepsilon = \frac{E}{E_o}. \quad (18)$$

Emisivita ε , která je někdy označena jako emisní součinitel, se pohybuje v rozmezí od 0 do 1. Mezi šedá tělesa lze považovat většinu pevných těles.

Řešení radiace v dutinových cihlách je nejčastěji založeno na zjednodušené aproximaci tvarů dutin pomocí obdélníků (Sala a kol., 2008, Al-Hadhrami a Ahmad, 2009, Antoniadis a kol., 2012) a kosočtverců (Pavlík a kol., 2013a, Pavlík a kol., 2014). Aproximace pomocí obdélníků (Obr. 2) předpokládá hustotu toku tepla mezi dvěma nekonečnými rovnoběžnými deskami, který lze vyjádřit jako

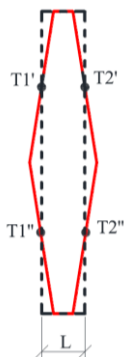
$$q_{rad} = \varepsilon \sigma_{SB} (T_1^4 - T_2^4), \quad (19)$$

kde q_{rad} ($W \cdot m^{-2}$) je hustota radičního tepelného toku absorbovaného deskou, přičemž T_1 (K) a T_2 (K) jsou teploty povrchů desek.



Obr. 2: Zjednodušené schéma vzduchové dutiny (Kočí a kol., 2015a)

V případě kosočtvercových dutin lze analogii rovnoběžných desek využít také. V tomto případě je nutné transformovat kosočtverec na obdélník se stejnou plochou a teploty jednotlivých desek se vypočítají jako průměr teplot $T1'$, $T1''$ a $T2'$, $T2''$, viz. obr. 3.



Obr. 3: Stanovení ekvivalentní tloušťky a povrchové teploty kosočtvercové dutiny (Kočí a kol., 2015a).

Detailní analýzu vlivu vnitřní geometrie na celkový přenos tepla radiací v dutinových cihlách provedl Kočí a kol. (2015a).

3. Stanovení efektivních tepelných parametrů dutinových cihel

Rostoucí požadavky na snižování energetické náročnosti budov vedly výrobce stavebních materiálů k vývoji nových konstrukčních prvků, které lépe vyhovují standardům nízkoenergetických a pasivních budov. Jedním z výsledků tohoto vývoje bylo uvedení dutinových cihel na evropský trh, které téměř vytlačily tradiční plně pálené cihly. Tepelné vlastnosti dutinových cihelných bloků, které jsou stěžejní pro tepelně-technické posouzení stavebních konstrukcí, lze určit jen velmi obtížně. Standardizované postupy, jakými jsou například stacionární metody typu „hot-plate“ (Sanjaya a kol., 2011) nebo „hot-wire“ (Healy a kol., 1976) nebo nestacionární impulsní metody jsou proveditelné velmi obtížně. Složitá vnitřní geometrie cihelných bloků spolu s konvekčním a radiačním přenosem tepla v dutinách představují zcela novou výzvu na poli experimentální analýzy. Ze standardizovaných postupů lze s určitou mírou adaptace použít některé stacionární postupy, jako ideální volba se však jeví kombinace počítačově-experimentálních postupů, případně řešení pomocí počítačových simulací s experimentální validací. Specifika a jedinečnost inženýrských úloh v oblasti tepelné techniky vyžadují sestavení detailní metodiky a postupu řešení, které budou zohledňovat veškerá rizika, omezení a úskalí daného problému, ale současně nabídnou nejvýhodnější dostupné řešení v rámci lokálních podmínek řešení úlohy. Nejvýhodnější strategií se jeví zavádění takových zjednodušení při řešení inženýrského problému, která přinesou významnou úsporu času, finančních či materiálových zdrojů, aniž by výrazně snížila kvalitu generovaných výstupů.

V následujících podkapitolách jsou prezentovány vybrané metody řešení, které byly aplikované při analýzách cihelného bloku HELUZ Family 50 s dutinami vyplněnými vzduchem.

3.1 Aproximace s využitím „lumped“ modelu

Jednou z metod, které lze využít pro stanovení efektivní tepelné vodivosti cihelného bloku, je aproximace pomocí „lumped“ modelu. Tento postup je založen na rozdělení řešené oblasti do několika zón ve směru gradientu teploty. Každá zóna je charakterizována svou průměrnou teplotou a rozdílem teplot uvnitř dutin, díky čemuž je možné linearizovat efekty radiace a konvekce napříč cihelným blokem. Postupnými iteracemi je pak možné dosáhnout ustáleného tepelného toku v dutinové cihle a stanovit globální (efektivní) tepelné parametry (Kočí a kol., 2015a). Linearizace problému se týká pouze vlastních dutin. V cihelném střepu se uvažuje s přenosem tepla kondukcí řízeného součinitelem tepelné vodivosti střepu λ_{bb} ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Modelováním konduktance v cihelném střepu jsou

vytvořeny okrajové podmínky (teplotní pole podél dutin) pro aplikaci lineárnizačních technik a stanovení dodatečného přenosu tepla kondukcí a radiací.

Zjednodušený fyzikální model, který je založený na aplikaci konceptu zjevné tepelné vodivosti vzduchu v dutinách, předpokládá ideální přenos tepla na vnitřních rozhraních dutého cihelného bloku. To umožňuje zacházet s celou dutinovou cihlou jako s nehomogenním systémem dvou materiálů s rozdílnou tepelnou vodivostí, díky čemuž je možné aplikovat společnou Fourierovu rovnici vedení tepla. Součinitel tepelné vodivosti vzduchu v dutině λ_{app} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) můžeme popsat jako

$$\lambda_{app} = \lambda_{cond} + \lambda_{conv} + \lambda_{rad}, \quad (20)$$

kde λ_{cond} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti vzduchu kondukcí, λ_{conv} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti vzduchu konvekcí a λ_{rad} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti vzduchu radiací. Tímto způsobem je možné definovat problém přenosu tepla v ustáleném stavu pouze pomocí čtyř vstupních parametrů modelu – λ_{cond} , λ_{conv} , λ_{rad} a λ_{bb} . Zatímco tepelnou vodivost cihelného střepu lze měřit standardními laboratorními metodami a konduktivní tepelná vodivost vzduchu je všeobecně známá, konvektivní a radiční složky vedení tepla v dutinách musí být stanoveny v závislosti na konkrétní velikosti a tvaru dutiny a rozložení teploty. Tepelná vodivost vzduchu prouděním, λ_{conv} byla stanovena Litovským a kol. (1997) nebo Marem a kol. (2008) jako

$$\lambda_{conv} = \lambda_{cond} \cdot (Nu - 1). \quad (21)$$

Pro výpočet radiční složky součinitele tepelné vodivosti vzduchu lze použitím konceptu ekvivalentní tloušťky dutiny použít vzorec

$$\lambda_{rad} = \varepsilon\sigma_{SB} \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)} L. \quad (22)$$

V obdélníkových dutinách lze délku L vyjádřit jako rozměr dutiny ve směru tepelného toku (Obr. 2).

Ekvivalentní tepelná vodivost dutých cihel λ_{eq} se vypočítá jako

$$\lambda_{eq} = q \frac{\Delta x}{\Delta T}, \quad (23)$$

kde Δx (m) je celková tloušťka cihelného bloku, tj. vzdálenost mezi dvěma čelními stranami, ΔT (K) je teplotní rozdíl mezi oběma čelními

stranami cihelného bloku a q ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) je ustálený tepelný tok v dutém cihlovém bloku, který se vypočítá jako

$$q = \lambda_{\text{bb}} \frac{\Delta T_e}{\Delta x_e}, \quad (24)$$

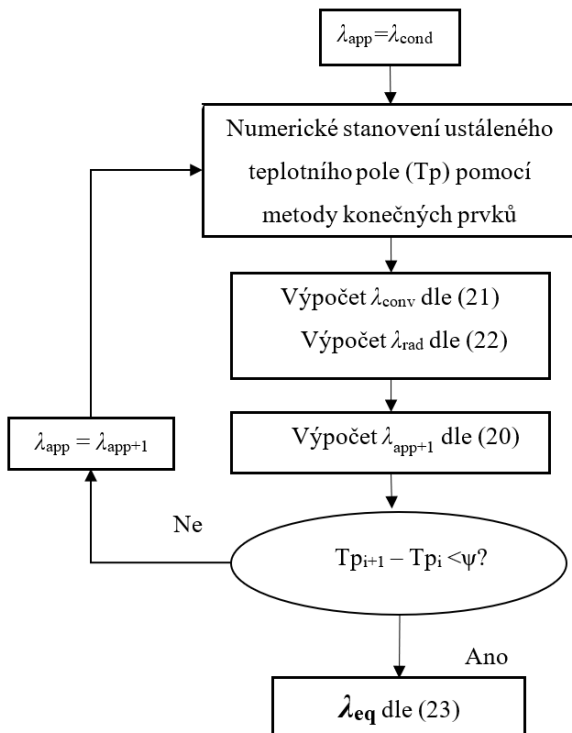
kde Δx_e (m) je tloušťka pravoúhlého konečného prvku přiléhajícího k lící straně cihlového bloku v hlavním směru tepelného toku a ΔT_e (K) je teplotní rozdíl mezi protilehlými stranami obdélníkového konečného prvku přiléhajícího k lící straně cihlového bloku v hlavním směru tepelného toku.

Řešení rovnice vedení tepla v ustáleném stavu v analyzovaném cihelném bloku se provádí ve 2-D aproximaci za použití metody konečných prvků (Kruis a kol., 2010). Při řešení byly předepsány okrajové podmínky Dirichletova typu na obě čelní strany cihelného bloku, zatímco na bočních stranách se předpokládá nulový tepelný tok. Tím byl definován hlavní směr tepelného toku kolmý na lící strany.

Za účelem aplikace „lumped“ modelu byl cihelný blok rozdělen na deset segmentů. Pro každý segment byla vybrána jedna charakteristická dutina v jeho střední části a hodnoty λ_{conv} a λ_{rad} vypočítané pro tuto dutinu byly použity v celém konkrétním segmentu. Výpočet teplotního pole v ustáleném stavu v analyzovaném cihelném bloku byl proveden podle iterativního postupu na obr. 4. Nastavení parametrů modelu je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1: Základní vstupní parametry modelu

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
Teplota teplé strany (K)	303,71
Teplota studené strany (K)	288,39
Součinitel tepelné vodivosti cihelného střepu ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (Pavlík a kol., 2013b)	0,30
Emisivita cihelného střepu (-) (Modest, 2003)	0,93



Obr. 4: Vývojový diagram algoritmu

Teploty T_1 a T_2 byly stanoveny na základě schématu uvedeného na obr. 2. S rostoucí teplotou se podle očekávání zvyšuje podíl radiace díky rozdílu čtvrtých mocnít teplot ($T_1^4 - T_2^4$), viz rovnice (22). Naopak konvekce s rostoucí teplotou mírně klesá v důsledku zvyšující se kinematické viskozity vzduchu, viz. rovnice (11),(12). Finální efektivní součinitel tepelné vodivosti analyzovaného cihelného bloku včetně vstupních parametrů dosazovaných do rovnic (23) a (24) je uveden v tab. 2.

Tab. 2: Výsledky tepelně-technické analýzy

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
λ_{bb} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,300
Δx_e (m)	0,001
ΔT_e (K)	0,01322
Δx (m)	0,500
ΔT (K)	15,32
λ_{app} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,087
λ_{eff} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,1294±0,0039

3.2 Modifikovaná experimentální metoda „hot-plate“

Jedním ze standardních postupů, které je možné použít pro stanovení ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti heterogenního systému reprezentovaným dutinovým cihelným blokem, je stacionární metoda chráněné teplé desky (metoda „hot-plate“). Experimentální schéma dle ČSN 72 7012-2 (1994) je založeno na vytvoření ustáleného teplotního pole napříč zkoumaným vzorkem, čehož je dosaženo pomocí ohřevné a chladicí desky na protilehlých podstavách vzorku. Poté, co je dosaženo ustáleného teplotního pole, lze stanovit součinitel tepelné vodivosti vzorku jako

$$\lambda_{eq} = \frac{q \cdot d}{\Delta T}, \quad (25)$$

kde λ_{eq} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti zkoumaného vzorku, q ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) označuje absolutní hodnotu hustoty tepelného toku skrz vzorek, d (m) je průměrná tloušťka/výška vzorku a ΔT (K) je kladný teplotní rozdíl chladicí a ohřevné desky.

Zkoumaný vzorek má převážně tvar pravidelného čtyřbokého hranolu, jeho výška h bývá přibližně desetkrát menší než délka hrany podstavy a . Boční stěny vzorku bývají obvykle zaizolovány.

Z experimentálního uspořádání na obr. 5 (výplň dutin polystyrenem) je však patrné, že výška vzorku je výrazně větší než šířka podstavy, jelikož musí být zohledněn vliv heterogenit napříč celým vzorkem. Z tohoto důvodu je nutné metodu modifikovat tak, aby ji bylo možné použít pro stanovení tepelných parametrů dutinových cihel. Boční strany musí být důkladně izolovány, přičemž tloušťka izolace se může lišit dle specifik

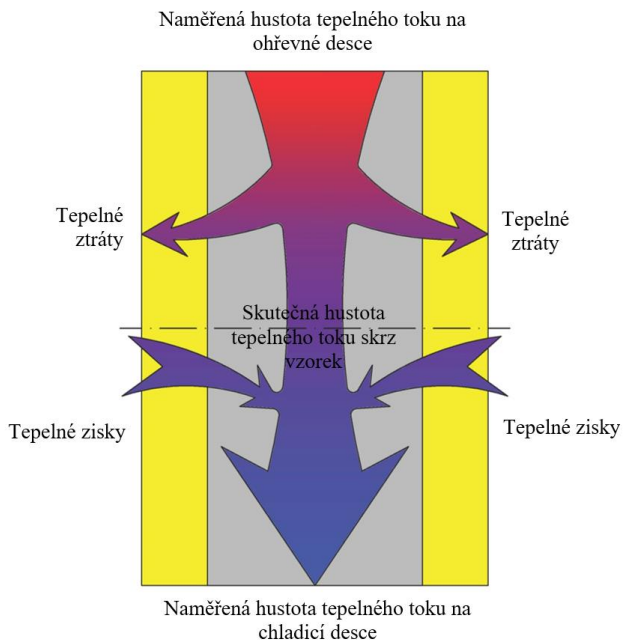
jednotlivého měření (např. poměr h/a , očekávaný rozsah součinitele tepelné vodivosti apod.).



Obr. 5: Experimentální nastavení (Maděra a kol., 2015)

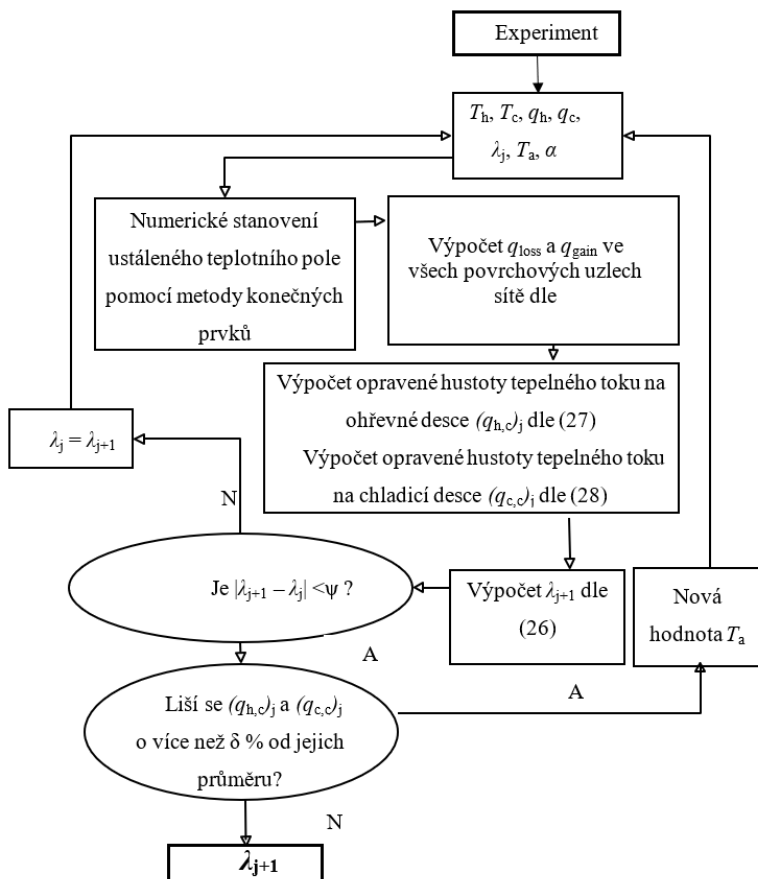
Vzhledem k vysokému poměru h/a a nízké tepelné vodivosti zkoumaného heterogenního vzorku se v modifikované verzi experimentu objevují značné tepelné ztráty, a to i navzdory přítomnosti tepelné izolace. Na obr. 6 je zachyceno zjednodušené schéma tepelných toků uvnitř vzorku při uvažování tepelných ztrát a zisků. Předpokládá se, že po dosažení ustáleného teplotního pole je horní část systému teplejší než okolí a naopak, spodní část je chladnější. Není to však nutnou podmínkou pro počítačové modelování a volba teplot závisí čistě na experimentálním hledisku, stejně jako u klasické metody chráněné teplé desky.

V systému se značnými tepelnými ztrátami pozbývá platnost základní předpoklad, že průměrnou hustotu tepelného toku vypočteme jako průměrnou hodnotu z hustoty tepelného toku teplé a studené desky, a hodnota hustoty tepelného toku q musí být stanovena prostřednictvím počítačové analýzy. Vývojový diagram algoritmu je znázorněn na obr. 7.



Obr. 6: Schéma tepelných toků v experimentu s uvažováním tepelných ztrát a zisků

Na základě výsledků experimentálních měření byla stanovena teplota ohřevné desky T_h (K), teplota chladicí desky T_c (K), teplota okolního vzduchu T_a (K), absolutní hodnota hustoty tepelného toku na rozhraní mezi ohřevnou deskou, resp. chladicí deskou a vzorkem, q_h a q_c ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Tyto hodnoty byly použity jako vstupní parametry počítačového modelu pro stanovení ustáleného teplotního pole.



Obr. 7: Vývojový diagram algoritmu

Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ_{j+1} se vyjádří jako

$$\lambda_{j+1} = \frac{(q_{h,c})_j + (q_{c,c})_j}{T_h - T_c} d, \quad (26)$$

kde $q_{h,c}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) a $q_{c,c}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) jsou absolutní hodnoty opravených hodnot hustot tepelných toků na ohřevné a chladicí desce a mohou být spočítány jako

$$q_{h,c} = \frac{q_h A_{pl} - \sum_i q_{loss,i} A_{node,i}}{A} \quad (27)$$

a

$$q_{c,c} = \frac{q_c A_{pl} - \sum_i q_{gain,i} A_{node,i}}{A}, \quad (28)$$

kde A_{pl} (m^2) je plocha ohřevné a chladicí desky, A_{node} (m^2) je vztažná plocha ke každému povrchovému uzlu i , A (m^2) je plocha vzorku, q_{loss} ($W \cdot m^{-2}$) je absolutní hodnota hustoty tepelného toku ztrát, q_{gain} ($W \cdot m^{-2}$) je absolutní hodnota hustoty tepelného toku zisků.

Nevykazuje-li systém žádné ztráty ani zisky do/z okolí, potom platí, že

$$q = q_{h,c} = q_{c,c}, \quad (29)$$

kde q ($W \cdot m^{-2}$) je ideální hustota tepelného toku. Tato hodnota je získána pouze tehdy, je-li použita správná hodnota ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti při numerickém stanovení ustáleného teplotního pole. Z tohoto důvodu je pro její přesné stanovení použit iterační proces. Celý iterační proces se poté opakuje, dokud není splněna podmínka

$$|\lambda_{j+1} - \lambda_j| < \psi, \quad (30)$$

kde ψ je maximální přípustný rozdíl mezi hodnotami tepelné vodivosti v průběhu iteračního procesu. Je-li podmínka splněna, srovnají se absolutní hodnoty opravených hustot tepelných toků ($q_{h,c}$) _{j} a ($q_{c,c}$) _{j} . Liší-li se hustoty tepelného toku o více než $\delta = 3$ % od jejich průměru, znamená to, že teplota okolí T_a nebyla uvažována s dostatečnou přesností. V takovém případě se stanoví nová hodnota T_a a celý iterační proces se opakuje. Podrobněji je celý proces popsán v článku Kočí (2014d).

Souhrn experimentálních dat, která byla použita jako vstupní parametry počítačového modelu, jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3: Experimentální nastavení (Maděra a kol., 2015)

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
Průměrná teplota topné desky (K)	317,40
Průměrná teplota chladicí desky (K)	288,39
Průměrný tepelný tok topné desky ($W \cdot m^{-2}$)	22,150
Průměrný tepelný tok chladicí desky ($W \cdot m^{-2}$)	9,075

Tepelná ztráta je závislá na tepelně izolačních schopnostech zkoumaného materiálu, resp. na poměru tepelné vodivosti vzorku a izolačního materiálu. Čím je poměr nižší, tím vyšší jsou ztráty do okolí. Dalším faktorem ovlivňujícím tepelné vlastnosti je teplota vzduchu v laboratoři. Výsledný ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti dutinové cihly s dutinami vyplněnými vzduchem byl stanoven pomocí výše popsané experimentálně-počítačové metody jako $\lambda_{ekv} = 0,132 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

3.3 Homogenizační metody na makroúrovni

Homogenizace materiálů představuje jednu z metod, která může podstatně snížit nároky na čas nebo výpočetní výkon při řešení složitých výpočetních úloh. Hlavním úkolem je stanovení efektivních homogenizovaných parametrů heterogenního materiálu, které následně umožní řešení úloh převedením do jednorozměrné úlohy, bez ohledu na lokální zastoupení jednotlivých fází, ze kterých je složen. Homogenizační metody (směšovací pravidla) byly primárně určeny pro stanovení elektrických a dielektrických vlastností (měrná elektrická vodivost, relativní permitivita). Díky (částečné) podobnosti fyzikálních jevů je možné homogenizační techniky využít při stanovení jiných materiálových charakteristik, například efektivního součinitele tepelné vodivosti. Teorii směšovacích pravidel se zabývá řada autorů, kteří vytvořili mnoho modelů. Mezi nejčastěji používané patří Maxwellův – Garnetův (1904), Bruggemanův (1935), Polderův – van Santenův (1946) nebo Lichteneckrův model (1926). Každý ze zmíněných modelů je navržen pro konkrétní aplikace. Při volbě modelu je proto nutné zohlednit typ zkoumaného materiálu vč. typu, množství a uspořádání jednotlivých složek heterogenní soustavy. Podrobnou analýzu dostupných homogenizačních modelů provedl Fiala ve své disertační práci (2012).

Základní směšovací pravidla pro homogenizaci porézních materiálů vychází z teoretických principů. Většina z nich byla odvozena pro dvoufázové směsi (pevná matrice-vzduch) a následně byla rozšířena o další

fáze, například o kapalnou vlhkost. Hrubý náhled na hodnotu efektivní vlastnosti je možné získat pomocí stanovení mezí (intervalu), ve kterých se výsledná efektivní hodnota heterogenního materiálu pohybuje. Je třeba vzít v úvahu, že efektivní tepelná vodivost vícefázového materiálu nesmí překročit meze dané tepelnými vodivostmi a objemovým zastoupením jednotlivých složek. Horní hranice je dosaženo v systému sestávajícím z paralelních vrstev umístěných podél vektoru tepelného toku. Spodní hranice je definovaná pomocí soustavy s vrstvami kolmými na směr tepelného toku. Tyto hranice, obvykle nazývané jako Wienerovy meze (1912), lze pro dvoufázové směsi vyjádřit jako

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{f_m}{\lambda_m} + \frac{f_a}{\lambda_a}}, \quad (31)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = f_m \lambda_m + f_a \lambda_a, \quad (32)$$

kde rovnice (31) je dolní mez a rovnice (32) je horní mez efektivního součinitele tepelné vodivosti λ_{eff} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), f_m (-) je objemové zastoupení matrice, f_a (-) je objemové zastoupení vzduchu, λ_m je součinitel tepelné vodivosti pevné fáze ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a λ_a ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti vzduchu. V literatuře jsou uvedeny i další zpřesňující meze, jako například Hashin a Shtrikman (1963).

V této práci byly použity dva směšovací modely, Bruggemannův (1935) a Lichteneckerův (1926). Bruggemannův model, který byl zobecněn Polderem a van Santenem (1946), předpokládá efektivní médium, v němž odchytku vlastností (relativní permitivita, součinitel tepelné vodivosti,) způsobují jak inkluze, tak matrice. Model zavádí tzv. depolarizační faktor pro různé tvary inkluzí, jako např. kulové, jehlové nebo deskové. Umožňuje tak definovat základní geometrii porézního prostoru. Pro n fází s objemovým zastoupením f_i (kde $i = 1, 2, 3, \dots, n$) platí pro systémy s kulovými inkluzemi, že

$$\sum_{j=1}^n f_j \frac{\lambda_j - \lambda_{\text{eff}}}{\lambda_j + 2\lambda_{\text{eff}}} = 0. \quad (33)$$

Pro systém s dvěma fázemi a deskovými inkluzemi má rovnice (33) tvar

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_m + f_a (\lambda_a - \lambda_m) \frac{2\lambda_a + \lambda_{\text{eff}}}{3\lambda_a}. \quad (34)$$

Dalším modelem, který je vhodný pro stanovení efektivního součinitele tepelné vodivosti, je Lichteneckerův model. Tento model zavádí parametr

k (-) v rozsahu $\langle -1; 1 \rangle$, který definuje uspořádání systému od paralelního až po sériový, tj. v rozsahu Wienerových mezí. Lichteneckerův model lze pro n fází zapsat jako

$$\lambda_{\text{eff}}^k = \sum_{j=1}^n f_j \lambda_j^k. \quad (35)$$

V případě této práce byl pro homogenizaci použit experimentálně stanovený součinitel tepelné vodivosti cihelného střepu v suchém stavu ($\lambda_m = 0,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Součinitel tepelné vodivosti vzduchu byl definován dvěma způsoby – jako konduktivní složka suchého vzduchu při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$ nebo jako efektivní parametr získaný v kapitole 3.1., jehož hodnota je uvedena v tab. 2. Při homogenizaci bylo uvažováno s objemovým zastoupením dutin v cihelném bloku $f_a = 0,56$ a objemovým zastoupením cihelného střepu $f_m = 0,44$.

Výsledky homogenizace součinitele tepelné vodivosti cihelného bloku s využitím Bruggemanna a Lichteneckerova modelu jsou uvedeny v tab. 4. Chybová analýza použitých homogenizačních metod byla provedena v práci Pavlík a kol. (2013b).

Tab. 4: Shrnutí výsledků homogenizace součinitele tepelné vodivosti

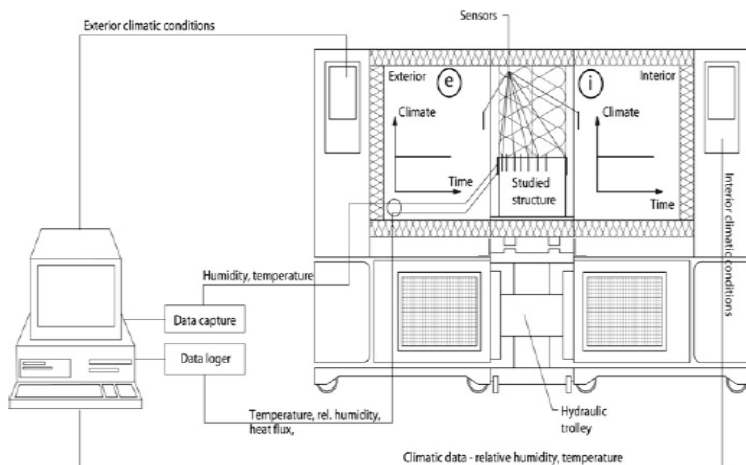
Model	Lichtenecker		Bruggemann
Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	k	λ_{eff}	λ_{eff}
$\lambda_a = 0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0,72	$0,126 \pm 0,013$	$0,067 \pm 0,007$
$\lambda_{\text{app}} = 0,086 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	-0,76	$0,130 \pm 0,013$	$0,150 \pm 0,015$

3.4 Experimentální validace

Pro validaci použitých metod a ověření výsledků počítačových simulací ke stanovení součinitele tepelné vodivosti dutinových cihel byl navržen „semi-scale“ experiment, který provedli kolegové z katedry materiálového inženýrství a chemie (Pavlík a kol., 2013a).

Základem tohoto experimentu byl dříve vyvinutý systém NONSTAT (Pavlík a kol., 2002), který se skládá ze dvou klimatických komor spojených tunelem. Tento tunel o velikosti $0,72 \times 0,72 \times 0,6 \text{ m}^3$ slouží pro umístění testované konstrukce. Pomocí soustavy klimatických komor se vytvoří nerovnovážné prostředí, které umožňuje zkoumat odezvu konstrukce. Sledovaným objektem v tunelu byl cihelný blok, jehož čela byla

vystavena konstantním teplotám $30,0 \pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ a $15,0 \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Relativní vlhkost v obou komorách byla nastavena na $30 \pm 1 \%$, čímž došlo k vyloučení vlivu vlhkosti na přenos tepla. Schéma uspořádání experimentu je znázorněno na obr. 8.



Obr. 8: Schéma měřicí aparatury (Pavlík a kol., 2013a).

Testovaný prvek byl osazen senzory od firmy Ahlborn pro kontinuální monitoring průběhu teploty a relativní vlhkosti. Data z těchto senzorů umožnila získat rozložení teploty a relativní vlhkosti napříč cihelným blokem v závislosti na čase. V rámci experimentu byl sledován také tepelný tok deskovými snímači Ahlborn FQA020C, které byly umístěny na čelních stranách cihelného bloku. Experimentální měření probíhalo 25 dní, aby bylo zaručeno, že dojde k ustálení tepelného toku a teplotního pole napříč vzorkem. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5: Experimentální stanovení součinitele tepelné vodivosti cihelného bloku (Pavlík a kol., 2013a)

Senzor tepelného toku	Tepelný tok ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	Součinitel tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
T1	3,82	$0,125 \pm 0,006$
T2	-3,75	$0,123 \pm 0,006$

V tab. 6 jsou souhrmně uvedeny výsledky z provedených analýz a experimentálního ověření. Jak je vidět z výsledků, tak všechny představené metody lze použít ke stanovení efektivního součinitele tepelné vodivosti.

Tab. 6: Porovnání efektivního součinitele tepelné vodivosti

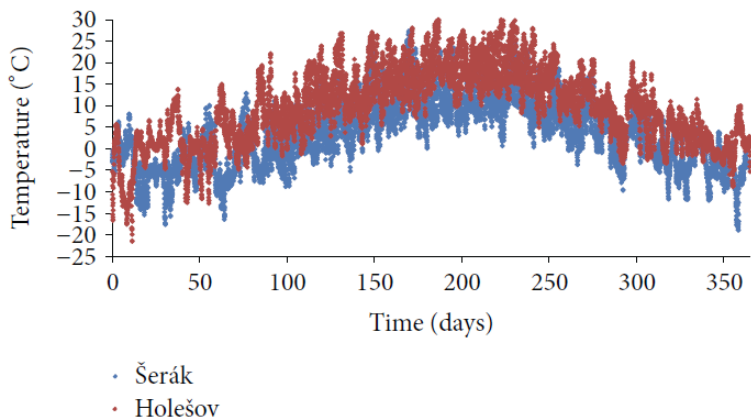
Metoda	Efektivní součinitel tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
„Lumped“ model	$0,129 \pm 0,0039$
„Hot-plate“ experiment	$0,132 \pm 0,011$
Homogenizace - Bruggeman	$0,150 \pm 0,015$
„Semi-scale“ experiment	$0,125 \pm 0,006$

4. Pokročilé analýzy cihelných bloků s dutinami

Na základě výsledků výše uvedených metod počítačového modelování bylo možné provést pokročilé analýzy a simulace tepelně-vlhkostní odezvy obvodových pláštěů budov na bázi cihelných bloků s dutinami.

4.1 Okrajové podmínky

Analýzu tepelně-vlhkostního chování stavebních prvků je nutné řešit komplexně v podmínkách klimatické zátěže charakteristické pro danou lokalitu. Nejinak je tomu i v případě dutinových cihel. Klimatické zatížení typické pro danou lokalitu se obvykle definuje pomocí různých typů návrhových klimatických roků. V oblasti tepelné techniky jsou návrhové roky nejčastěji definovány prostřednictvím referenčního klimatického roku (TRY – Test Reference Year). Referenční klimatický rok obsahuje charakteristické hodnoty environmentálních veličin, které jsou dlouhodobě charakteristické pro danou lokalitu. Metodika stanovení referenčního roku je poměrně komplikovaná, jednotlivé veličiny nelze získávat prostým průměrováním (ČSN EN ISO 15927-4, 2011). Referenční rok obsahuje hodnoty teploty, relativní vlhkosti a tlaku vzduchu, intenzitu přímého a rozptýleného slunečního záření, směr a rychlost větru a úhrn srážek, to vše v hodinových intervalech. Databáze referenčních roků pro více než 70 lokalit v České republice byla vytvořena na Katedře materiálového inženýrství a chemie, Fakulty stavební ČVUT v Praze, a je dostupná v rámci webové aplikace (Đurana a Maděra, 2013). Klimatická data pro Českou republiku byla zakoupena od Českého hydrometeorologického ústavu, který je oficiální autoritou v ČR. Klimatická data pro dalších více než 100 lokalit mimo ČR byla získána z databáze Meteonorm (2010). Na obr. 9 je příklad klimatických dat v podobě teploty pro oblast Šerák a Holešov.



Obr. 9: Porovnání referenčních roků pro Šerák a Holešov (Kočí a kol., 2014c)

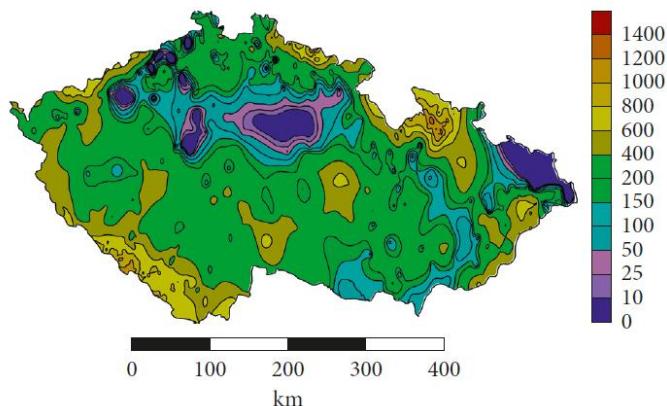
4.2 Degradace povrchových vrstev budov vlivem mrazu

Prvním příkladem použití je analýza vlivu klimatických jevů na degradaci povrchových vrstev budov vlivem mrazu (Kočí a kol., 2018b). Počítačové simulace tepelně-vlhkostního chování byly provedeny na jedenácti charakteristických typech obvodových plášťů budov včetně obvodové stěny z cihelného bloku s dutinami vyplněnými vzduchem. V tomto příkladu byly použity materiálové charakteristiky získané na základě dvojstupňové homogenizace. Vnější okrajové podmínky výpočtového modelu byly definovány souborem 64 referenčních roků z meteorologických stanic napříč územím, který charakterizuje variantní klimatického zatížení v České republice. Na základě tepelně-vlhkostních simulací byly výsledky vyhodnoceny s využitím funkcí poškození *TOF*, *ASW* a *IFTC*. Hodnotící funkce poškození jsou navrženy k relativnímu posouzení různých klimatických zatížení. Nezobrazují konkrétní míru poškození, ale lze je použít v rámci komparativní analýzy, pro porovnání vlivu klimatického zatížení v různých lokalitách nebo různých časových intervalech.

Například *TOF* vyjadřuje dobu (nejčastěji vyjádřenou v hodinách) během sledovaného období, kdy jsou splněny podmínky pro mrznutí vody v pórech stavebních materiálů. Za tímto účelem je sledována teplota a obsah vlhkosti v předepsaném místě ve zdivu. V případě jednoho roku nabývá funkce *TOF* hodnot 0 až 8760 a může být zapsána jako

$$TOF = \sum_0^{8760} [T_i < T_L \wedge w_i > w_L], \quad (36)$$

kde T_i ($^{\circ}\text{C}$) je teplota v konstrukci, T_L ($^{\circ}\text{C}$) je rovnovážná teplota fázové přeměny voda-led v podmínkách porézního prostoru, w_i ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) je obsah vlhkosti v konstrukci, w_L ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) je předepsaná (kritická) hodnota obsahu vlhkosti.



Obr. 10: Prostorové rozložení funkce TOF pro cihelný blok (Kočí a kol., 2018b).

Tímto způsobem jsou získány základní datové sady pro analýzu poškození mrazem. Aplikací těchto výsledků do vyvinutého korekčního postupu založeného na nadmořské výšce, umožnilo získat souvislé pokrytí geografické oblasti České republiky s využitím veřejně dostupných dat. Vykreslením izoplet předpokládaného poškození mrazem v závislosti na typu obálky byly vytvořeny mapy poškození, které mohou inženýrům pomoci zlepšit proces návrhu obálky budovy (obr. 10). Podobná simulace byla provedena také pro analýzu vlivu mezi referenčním rokem a reálnými klimatickými roky 2013 – 2015 (Kočí a kol., 2019b).

4.3 Energetická náročnost budov

Dalším příkladem použití efektivních tepelných parametrů dutinových cihel je posouzení vývoje energetické náročnosti budov v delším časovém horizontu a zhodnocení trendu budoucího vývoje nových materiálů vzhledem k probíhajícím změnám klimatu (Kočí a kol., 2019a). Cílem této analýzy bylo zjistit, jak se projevuje současný trend oteplování vzhledem k potřebám budov na vytápění a chlazení a zda jsou stávající

normové postupy pro návrh budov dostačující. Energetická analýza byla provedena na příkladu obytného domu umístěného v Praze (obr. 11).

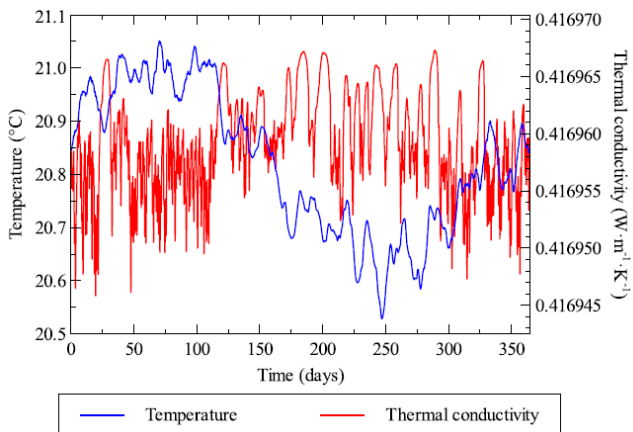


Obr. 11: Vizualizace obytného domu (Kočí a kol., 2019a)

Pro tento účel bylo vybráno osm různých sad meteorologických dat pro Prahu – referenční rok, příznivý rok a nepříznivý rok (vybraný z historických dat 20. století) a skutečná klimatická data z období 2013–2017. Metodika určení pozitivního a kritického roku byla podrobně popsána v publikaci (Kočí a kol., 2014a). Simulace byly provedeny ve dvou různých měřítkách. Nejdříve byla provedena analýza celého obytného domu s využitím programu DesignBuilder (DB, DesignBuilder, 2018).

Vzhledem k tomu, že simulace DB obsahují určitá omezení týkající se transportu vlhkosti ve stavebních materiálech, byly simulace v DB provedeny s materiálovými parametry určenými v suchém stavu. Jediným materiálovým parametrem popisující transport vlhkosti byl faktor difúzního odporu vodní páry stanovený dry-cup metodou.

Pro podporu a ověření výsledků celoplošné simulace obytného domu a odstranění nedostatků v oblasti transportu vlhkosti byla provedena 1D simulace přenosu tepla a vlhkosti stěnou budovy vystavenou vnějšímu prostředí. Příklad výstupu ze simulace pro referenční rok je na obr. 12.



Obr. 12: Průběh teploty a součinitele tepelné vodivosti na vnitřní straně nosné konstrukce zatížené referenčním rokem (Kočí a kol., 2019a)

Na základě tepelně-vlhkostního odezvy studované konstrukce bylo provedeno posouzení energetické bilance, jejíž výsledky jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7: Roční prostup tepla stěnou budovy

Meteorologická sada	Prostup tepla za rok ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$)		
	Ztráty	Zisky	Celkem
TRY	12,28	0,11	12,39
Pozitivní	10,91	0,37	11,28
Kritický	14,52	0,05	14,57
2013	12,24	0,31	12,55
2014	10,33	0,24	10,57
2015	10,43	0,54	10,97
2016	10,88	0,20	11,08
2017	10,93	0,35	11,28

Při určování energetické bilance se uvažovalo jak s tepelnými ztrátami kvůli stanovení potřeb na vytápění objektu, tak s tepelnými zisky, které by měly být kompenzovány chlazením. Výsledky simulace potvrzují trend oteplování v období 2013–2017, protože průměrné požadavky na vytápění jsou o 3,95 % nižší a průměrné požadavky na chlazení o 3,96 % vyšší ve srovnání s referenčním rokem. V extrémních letech je zjištěn 12–15% pokles energie spotřebované na vytápění a až 20% nárůst energie potřebné na chlazení. To je v souladu s předpokládaným trendem oteplování, o kterém se v posledních několika desetiletích široce diskutovalo. Na základě zjištěných výsledků se nabízí otázka, zda by nebylo vhodné revidovat stávající normové předpisy, používané pro klasifikaci budov z hlediska energetické náročnosti, a zahrnout do výpočtů také energii potřebnou na chlazení budov, jelikož existuje předpoklad, že podíl energie potřebné pro chlazení budov se bude v budoucnu zvyšovat.

5. Závěr

Cílem této práce bylo představení problematiky počítačového modelování transportních jevů ve stavebních elementech s komplexní vnitřní geometrií. Typickými představiteli takových elementů jsou dutinové cihelné bloky, které byly zvoleny pro ukázkou vybraných aplikací v oblasti stavební fyziky.

Hlavním tématem této práce bylo využití modelování pro stanovení efektivních tepelných parametrů dutinových cihel, jejichž složitá topologie značně omezuje možnosti využití standardních postupů. Tyto limity lze ale chápat jako určitou výzvu, které je nutné čelit při volbě počítačové metody a formulaci počítačového modelu.

V této práci jsou naznačeny tři vhodné metody, jakými lze přistupovat k analýze transportu tepla v dutinových cihlách, přičemž všechny metody byly validovány pomocí „semi-scale“ laboratorního experimentu.

- První přístup je založen na linearizaci efektů kondukce a radiace v dutinách pomocí „lumped“ modelu, čímž lze dosáhnout relativně rychlých a přesných výsledků bez nutnosti složité numerické integrace.
- V druhém případě je počítačové modelování použito pro kompenzaci systematických chyb experimentálního měření. Získané výsledky ukazují, že díky počítačovému modelování lze významně zpřesnit experimentální metody.
- V třetím případě je počítačové modelování využito pro aplikaci homogenizačních principů a stanovení efektivních parametrů na základě empirických postupů.

Identifikace materiálových parametrů dutinových cihel představuje jen určitý segment možného využití počítačového modelování. Širší využití lze nalézt v simulacích a predikcích tepelně-vlhkostního namáhání stavebních konstrukcí. Na tuto problematiku byla zaměřena závěrečná část práce, ve které byly představeny dvě různé analýzy obvodových plášťů na bázi dutinových cihel v reálných klimatických podmínkách.

- V prvním případě byla zkoumána degradace povrchových vrstev zdiva vlivem mrazu v různých podmínkách klimatického zatížení napříč Českou republikou. Na základě této analýzy byly vygenerovány mapy poškození, které mohou být využity při návrhu skladby obvodových plášťů budov.
- V druhém případě byl posuzován vývoj energetické náročnosti budov na základě historických klimatických dat. V rámci této analýzy byl sledován trend vývoje energetické náročnosti budov

s ohledem na vývoj klimatu a tento trend byl zhodnocen vzhledem ke stávajícím normám a požadavkům pro tepelně-technický návrh budov.

Výsledky prezentované v této práci ukazují jen malou část možného využití počítačových metod pro řešení inženýrských úloh ve stavebnictví. Z hlediska budoucího vývoje lze předpokládat, že počítačové modely zůstanou nedílnou součástí výzkumu a vývoje ve všech odvětvích stavebního průmyslu. V současné době existují některé typy úloh, které jsou natolik rozsáhlé nebo komplikované, že jejich řešení přímo závisí na využití počítačů. Proto bude v budoucnu nutné existující metody neustále zdokonalovat nebo hledat úplně nové způsoby řešení.

Literatura

1994. CSN 72 7012-2, Determination of Steady State Thermal Conductivity of Materials, Hot Plate Method, Guarded Hot Plate Method. Prague, Czech Republic: Czech Office for Standards, Metrology and Testing.
2010. Meteororm: version 6. version 6.1.0.20 [CD] ed. Switzerland.
2011. ČSN EN ISO 15927-4 Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling. Prague: Czech Office for Standards, Metrology and Testing.
- AKHTAR, A. & SARMAH, A. K. 2018. Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. *The Science of the total environment*, 616-617, 408-416.
- AL-HADHRAMI, L. M. & AHMAD, A. 2009. Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia. *Applied Thermal Engineering*, 29, 1123-1130.
- ALHAZMY, M. M. 2010. Numerical investigation on using inclined partitions to reduce natural convection inside the cavities of hollow bricks. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 2201-2210.
- AN, H. Y., JEONG, J. H., KANG, Y. H., KIM, H., KIM, Y. K. & SHON, Z. H. 2020. Numerical simulations of the impacts of land-cover change in the intertidal zone on local meteorology in western Korea. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 31, 337-349.
- ANTONIADIS, K. D., ASSAEL, M. J., TSIGLIFISI, C. A. & MYLONA, S. K. 2012. Improving the Design of Greek Hollow Clay Bricks. *International Journal of Thermophysics*, 33, 2274-2290.
- ARGUELLO-LUENGO, J., GONZALEZ-TUDELA, A., SHI, T., ZOLLER, P. & CIRAC, J. I. 2019. Analogue quantum chemistry simulation. *Nature*, 574, 215-+.
- BABAEVA, N. Y. & NAIDIS, G. V. 2018. Modeling of Plasmas for Biomedicine. *Trends in Biotechnology*, 36, 603-614.
- BRUGGEMAN, D. A. G. 1935. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Annalen der Physik*, 416, 636-664.
- CHURCHILL, S. W. & CHU, H. H. S. 1975. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329.

- DARCY, H. 1856. Détermination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, 590-594.
- DENG, X. Y. 2016. Simulation Model for Container Logistics System of Waterway Transportation. Joint Conference of the 16th Asia Simulation Conference / SCS International Autumn Simulation Multi-Conference (AsiaSim/SCS AutumnSim), Oct 08-11 2016 Beijing, PEOPLES R CHINA. 308-315.
- DESIGNBUILDER 2018. DesignBuilder Software Ltd – Software. (<http://www.designbuilder.co.uk/software/>).
- ŘURANA, K., MADĚRA, J., 2013, Databáze klimatických dat verze 1.03. <<http://tpm.fsv.cvut.cz/Naki/klimdb/>>
- FIALA, L. 2012. *Application of Homogenization Principles in the Analysis of Dielectric and Thermal Properties of Porous Materials*. Ph.D. thesis, CTU in Prague.
- HASHIN, Z. & SHTRIKMAN, S. 1963. Conductivity of Polycrystals. *Physical Review*, 130, 129-&.
- HEALY, J. J., DE GROOT, J. J. & KESTIN, J. 1976. The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity. *Physica B+C*, 82, 392-408.
- KALČÍK, J. & SÝKORA, K. 1973. *Technická termodynamika*, Praha, Academia Praha.
- KIECKHAFFER, K., QUANTE, G., MULLER, C., SPENGLER, T. S., LOSSAU, M. & JONAS, W. 2018. Simulation-Based Analysis of the Potential of Alternative Fuels towards Reducing CO2 Emissions from Aviation. *Energies*, 11.
- KIESSL, K. 1983. *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen*, Universität Essen.
- KOČÍ, J., KOČÍ, V., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2010. *Physical and mathematical models of coupled heat and moisture transport: A comparative analysis*.
- KOČÍ, J., KOČÍ, V., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2019a. Effect of applied weather data sets in simulation of building energy demands: Comparison of design years with recent weather data. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 100, 22-32.
- KOČÍ, J., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2013a. A Verification of the Genetic Programming Method in the Inverse Analysis of Moisture Transport in Building Materials. In: SIMOS, T., PSIHOYIOS, G. & TSITOURAS, C. (eds.) *11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2013, Pts 1 and 2*.

- KOČÍ, J., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2014a. Generation of a critical weather year for hygrothermal simulations using partial weather data sets. *Building and Environment*, 76, 54-61.
- KOČÍ, J., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2015a. A fast computational approach for the determination of thermal properties of hollow bricks in energy-related calculations. *Energy*, 83, 749-755.
- KOČÍ, J., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2019b. Effect of the Current Warming Trend on the Computational Damage Assessment of Building Materials. International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM), Sep 13-18 2018, Rhodes, GREECE.
- KOČÍ, J., MADĚRA, J., JERMAN, M. & ČERNÝ, R. 2015b. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes. *Energy and Buildings*, 99, 61-66.
- KOČÍ, J., MADĚRA, J., JERMAN, M., DOLEZELOVA, M., ČERNÝ, R. & IOP. 2018a. Computational simulation of hygrothermal processes in historical building envelopes provided with interior thermal insulation. Conference on Florence Heri-Tech - The Future of Heritage Science and Technologies, May 16-18 2018, Florence, ITALY.
- KOČÍ, J., MADĚRA, J., POMMER, V. & ČERNÝ, R. 2018b. Analysis of the Frost-Induced Damage of Building Enclosures on the Territory of the Czech Republic. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- KOČÍ, V., BAZANTOVA, Z. & ČERNÝ, R. 2014b. Computational analysis of thermal performance of a passive family house built of hollow clay bricks. *Energy and Buildings*, 76, 211-218.
- KOČÍ, V., KOČÍ, J., DURANA, K., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2013b. Determination of Moisture-Dependent Moisture Diffusivity Using Smoothed Experimental Data. In: SIMOS, T., PSIHOYIOS, G. & TSITOURAS, C. (eds.) *11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2013, Pts 1 and 2*.
- KOČÍ, V., MADĚRA, J., FORT, J., ZUMAR, J., PAVLÍKOVA, M., PAVLÍK, Z. & ČERNÝ, R. 2014c. Service Life Assessment of Historical Building Envelopes Constructed Using Different Types of Sandstone: A Computational Analysis Based on Experimental Input Data. *Scientific World Journal*.
- KOČÍ, V., MADĚRA, J., JERMAN, M., TRNIK, A. & ČERNÝ, R. 2014d. Determination of the equivalent thermal conductivity of

- complex material systems with large-scale heterogeneities. *International Journal of Thermal Sciences*, 86, 365-373.
- KRISCHER, O. 1942. *Der Wärme- und Stoffaustausch im Trocknungsgut : Die analytische und graphische Behandlung der Trocknung poriger hygroskopischer Güter*, Berlin, VDI-Verlag.
- KRISCHER, O. 1963. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Berlin, Heidelberg, Springer.
- KRUIS, J., KOUDELKA, T. & KREJCI, T. 2010. Efficient computer implementation of coupled hydro-thermo-mechanical analysis. *Mathematics and Computers in Simulation*, 80, 1578-1588.
- KUMAR, A., DHAKHWA, S. & KUMAR, M. 2021. Statistical analysis of high-resolution mesoscale meteorology derived from weather research and forecasting model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 235-245.
- KÜNZEL, H. M. 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters.
- LI, L. P., WU, Z. G., HE, Y. L., LAURIAT, G. & TAO, W. Q. 2008. Optimization of the configuration of 290 x 140 x 90 hollow clay bricks with 3-D numerical simulation by finite volume method. *Energy and Buildings*, 40, 1790-1798.
- LI, Z. J. & YU, X. M. 2020. Data mining technology for mechanical engineering computer test system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 141.
- LICHTENECKER, K. 1926. Die dielektrizitätskonstante natürlicher und künstlicher mischkörper. *Phys. Z.*, 27, 115-158.
- LITOVSKY, E., GAMBARYAN-ROISMAN, T., SHAPIRO, M. & SHAVIT, A. 1997. Heat transfer mechanisms governing thermal conductivity of porous ceramic materials. *Trends in Heat, Mass and Momentum Transfer*, 3, 147-167.
- LYKOV, A. 1954. *Javlenija perenosa v kapilljarno-poristych telach*, Moskva, Gostechizdat.
- LYKOV, A. 1972. *Teplomassoobmen*, Moskva, Energia.
- LYKOV, A. V. 1966. *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*, New York, Pergamon Press.
- MADĚRA, J., KOČÍ, J., KOČÍ, V. & KRUIS, J. 2017a. Parallel modeling of hygrothermal performance of external wall made of highly perforated bricks. *Advances in Engineering Software*, 113, 47-53.
- MADĚRA, J., KOČÍ, V., KOČÍ, J. & ČERNÝ, R. 2017. Physical and Mathematical Models of Hygrothermal Processes in Historical Building Envelopes. International Conference of Computational

- Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE), Apr 21-25 2017b Thessaloniki, GREECE. MELVILLE: Amer Inst Physics.
- MADĚRA, J., KOČÍ, V., KOČÍ, J., VYBORNÝ, J. & ČERNÝ, R. 2010. Computational prediction of hygrothermal conditions in innovated AAC-based building envelopes. *Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer Xi*, 68, 291-301.
- MADĚRA, J., JERMAN, M., ČÁCHOVÁ, M., DOLEŽELOVÁ, M. & KOČ, J. 2018. Computational modelling of degradation processes in exterior renders. *In: SIMOS, T., ed. International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2017 (ICNAAM-2017)*, 2017 Rhodos, Greece. New York: AIP Conference Proceedings.
- MADĚRA, J., KOČÍ, V. & ČERNÝ, R. 2015. Uncertainty Analysis of Computational-Experimental Approach for Determination of Equivalent Thermal Conductivity of Highly Perforated Bricks. *Advanced Materials Research*, 1126, 105--110.
- MAR, J. D., LITOVSKY, E. & KLEIMAN, J. 2008. Modeling and Database Development of Conductive and Apparent Thermal Conductivity of Moist Insulation Materials. *Journal of Building Physics*, 32, 9-31.
- MARTIN, T. D., MALAGODI, A. J., CHI, E. Y. & EVANS, D. G. 2019. Computational Study of the Driving Forces and Dynamics of Curcumin Binding to Amyloid-beta Protofibrils. *Journal of Physical Chemistry B*, 123, 551-560.
- MAXWELL GARNETT, J. C. 1904. Colours in Metal Glasses and in Metallic Films. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 203, 385-420.
- MODEST, M. F. 2003. *Radiative Heat Transfer: Second Edition*.
- MORENO-GOMEZ, A. L., GUTIERREZ-ANTONIO, C., GOMEZ-CASTRO, F. I. & HERNANDEZ, S. 2021. Modelling, simulation and intensification of the hydroprocessing of chicken fat to produce renewable aviation fuel. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 159.
- NARANJO-PEREZ, J., JIMENEZ-ALONSO, J. F., PAVIC, A. & SAEZ, A. 2021. Finite-element-model updating of civil engineering structures using a hybrid UKF-HS algorithm. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17, 620-637.
- PAVLÍK, Z., FIALA, L. & ČERNÝ, R. 2013a. Experimental Assessment of Thermal Conductivity of a Brick Block with Internal Cavities Using a Semi-scale Experiment. *International Journal of Thermophysics*, 34, 909-915.

- PAVLÍK, Z., FIALA, L., VEJMEJKOVA, E. & ČERNÝ, R. 2013b. Application of Effective Media Theory for Determination of Thermal Properties of Hollow Bricks as a Function of Moisture Content. *International Journal of Thermophysics*, 34, 894-908.
- PAVLÍK, Z., JERMAN, M., TRNIK, A., KOČÍ, V. & ČERNÝ, R. 2014. Effective thermal conductivity of hollow bricks with cavities filled by air and expanded polystyrene. *Journal of Building Physics*, 37, 436-448.
- PAVLÍK, Z., PAVLÍK, J., JIŘIČKOVÁ, M. & ČERNÝ, R. 2002. System for testing the hygrothermal performance of multi-layered building envelopes. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 25, 239-249.
- PLANES, T., DELBECQ, S., POMMIER-BUDINGER, V. & BENARD, E. 2021. Simulation and evaluation of sustainable climate trajectories for aviation. *Journal of Environmental Management*, 295.
- POLDER, D. & VANSANTEN, J. H. 1946. THE EFFECTIVE PERMEABILITY OF MIXTURES OF SOLIDS. *Physica*, 12, 257-271.
- SALA, J. M., URRESTI, A., MARTIN, K., FLORES, I. & APAOLAZA, A. 2008. Static and dynamic thermal characterisation of a hollow brick wall: Tests and numerical analysis. *Energy and Buildings*, 40, 1513-1520.
- SANJAYA, C. S., WEE, T. H. & TAMILSELVAN, T. 2011. Regression analysis estimation of thermal conductivity using guarded-hot-plate apparatus. *Applied Thermal Engineering*, 31, 1566-1575.
- SCHAAF, B., RICHTER, C., FELDMANN, M., TOUPS, E., SIMON, J., REESE, S., SEEWALD, R., SCHIEBAHN, A. & REISGEN, U. 2020. Material parameter determination for the simulation of hyperelastic bonds in civil engineering considering a novel material model. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 103.
- SHEN, Y., YU, P., LU, H., ZHANG, X. L. & ZENG, H. J. 2021. An AI-based virtual simulation experimental teaching system in space engineering education. *Computer Applications in Engineering Education*, 29, 329-338.
- SIAM, J. & ABDO, A. 2020. Effects of inquiry, computer simulation, and cooperation with intergroup competition on electrical engineering students. *Research in Science & Technological Education*, 38, 439-462.

- SUN, J. P. & FANG, L. 2009. Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5598-5607.
- SUVOROV, A., GUSEV, A., ANDREEV, M. & ASKAROV, A. 2019. The novel approach for electric power system simulation tools validation. *Electrical Engineering*, 101, 457-466.
- VOITENKO, Y. I., ZAKUSYLO, R. V., WOJEWODKA, A. T., GONTAR, P. A., GERLICH, M. M. & DRACHUK, O. G. 2019. New Functional Materials in Mechanical Engineering and Geology. *Central European Journal of Energetic Materials*, 16, 135-149.
- WANG, H. 2020. NUMERICAL SIMULATION OF ENGINE VACUUM PLUME BASED ON N-S EQUATION. *Mechatronic Systems and Control*, 48, 264-270.
- WIENER, O. 1912. Die theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Stromung i. die mittelwertsätze für kraft, polarisation und energie. *Der Abhandlungen der Mathematisch-Physischen Klasse der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, 32, 509-604.
- XU, L., YE, S., LU, G. L. & ZHANG, Z. 2011. Modeling and Simulation of the Underground Mining Transportation System. International Conference on Advanced Research on Computer Education, Simulation and Modeling, Jun 18-19 2011 Wuhan, PEOPLES R CHINA. 116-121.
- ZHANG, F., QIAN, Y. J. & TANG, J. S. 2008. Applications of Finite Element Method in Biomedicine. 1st International Conference on Modelling and Simulation, Aug 04-07 2008 Nanjing, PEOPLES R CHINA. 352-357.
- ZUKOWSKI, M. & HAESE, G. 2010. Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation. *Energy and Buildings*, 42, 1402-1408.

Poděkování

Děkuji kolegům z katedry materiálového inženýrství a chemie Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze, kteří jakýmkoliv způsobem přispěli ke vzniku této práce, zejména prof. Černému za motivující a inspirující přístup. Zvláštní poděkování za podporu patří mé ženě a celé rodině.

Životopis

doc. Ing. Jiří Maděra, Ph.D.

Datum narození: 23.5.1975

Vzdělání

- | | |
|------|--|
| 2018 | doc. v oboru Teorie stavebních materiálů a konstrukcí ČVUT v Praze, Fakulta stavební, habilitační práce na téma: Použití počítačového modelování při řešení vybraných úloh materiálového inženýrství |
| 2003 | Ph.D. v oboru Fyzikální a materiálové inženýrství ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra mechaniky, disertační práce: Počítačová analýza optimálních tepelných a vlhkostních vlastností materiálů a systémů pro vnitřní tepelnou izolaci historických budov |
| 1999 | Ing. v oboru vodní hospodářství a vodní cesty ČVUT v Praze, Fakulta stavební, diplomová práce: Optimalizace energetického využití nádrže Horka |

Zaměstnání

- | | |
|--------------|--|
| 2018 – dosud | Katedra materiálového inženýrství a chemie, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, docent |
| 2007 – 2018 | Katedra materiálového inženýrství a chemie, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, odborný asistent |
| 2003 – 2007 | Katedra mechaniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, vědecký pracovník |

Výzkumná činnost:

Výzkum v oblasti materiálového inženýrství, teoretická analýza přenosu tepla, vlhkosti, počítačové modelování a počítačová analýza vlastností, optimalizace materiálových parametrů, energetická bilance obvodových plášťů budov, numerická analýza laboratorních experimentů.

Pedagogické aktivity

- Přednášky v rámci předmětů Numerická analýza transportních procesů, Transportní procesy v materiálech II, Transport tepla a vlhkosti.

- Zavedení předmětu Numerická analýza transportních procesů do výuky.
- Vedení cvičení v rámci předmětů Transportní procesy v materiálech I, Stavební hmoty, Materiálové inženýrství.
- Školitel 1 obhájeného doktoranda
- Vedeny a obhájeny 3 diplomové práce, 2 bakalářské práce

Vědecko-výzkumné aktivity:

- Řešitel 2 projektů GA ČR
- Člen řešitelského týmu více než 20 projektů (GA ČR, MPO, MK, TA ČR, MŠMT)

Publikace:

- WoS - 133 publikací (37 článků, 96 příspěvků ve sborníku), 352 citací bez autocitací, h-index = 14
- Scopus - 143 publikací (43 článků, 100 příspěvků ve sborníku), 403 citací bez autocitací, h-index = 15
- Více než 100 příspěvků na národních a mezinárodních konferencích, 23 článků v lokálních časopisech (ČR, Slovensko)

Aplikační výstupy:

Spoluautor 23 aplikovaných výsledků typu R-software

Další:

- Člen technické normalizační komise u České agentury pro standardizaci TNK 37 – ZDĚNÉ KONSTRUKCE
- Člen akademické rady Ústavu technicko-technologického, VŠTE v Českých Budějovicích
- Recenzní posudky pro zahraniční odborné časopisy
- Oponentní posudky grantových přihlášek TAČR

- Člen vědeckého výboru mezinárodních vědeckých konferencí STREMAH 2017, 2019, 2021.

Vybrané publikace

MADĚRA, J., KOČÍ, J., KOČÍ, V. & KRUIS, J. 2017. Parallel modeling of hygrothermal performance of external wall made of highly perforated bricks. *Advances in Engineering Software*, 113, 47-53.

MADĚRA, J., KOČÍ, V., KOČÍ, J., VÝBORNÝ, J. & ČERNÝ, R. 2010. Computational prediction of hygrothermal conditions in innovated AAC-based building envelopes. *Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer Xi*, 68, 291-301.

FIALA, L., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2020. Experimental and Theoretical Approach to Determination of Heat Evolution in Electrically Conductive Aluminosilicates. *Thermal Science*, 24, 787-794.

KOČÍ, J., KOČÍ, V., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2019. Effect of applied weather data sets in simulation of building energy demands: Comparison of design years with recent weather data. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 100, 22-32.

KOČÍ, V., MADĚRA, J., TRNÍK, A. & ČERNÝ, R. 2019. Heat transport and storage processes in differential scanning calorimeter: Computational analysis and model validation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 136, 355-364.

KOČÍ, J., MADĚRA, J., POMMER, V. & ČERNÝ, R. 2018. Analysis of the Frost-Induced Damage of Building Enclosures on the Territory of the Czech Republic. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.

KOUDELKA, T., KRUIS, J. & MADĚRA, J. 2015. Coupled shrinkage and damage analysis of autoclaved aerated concrete. *Applied Mathematics and Computation*, 267, 427-435.

KORECKÝ, T., KEPPERT, M., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2015. Water transport parameters of autoclaved aerated concrete: Experimental assessment of different modeling approaches. *Journal of Building Physics*, 39, 170-188.

KOČÍ, J., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2015. A fast computational approach for the determination of thermal properties of hollow bricks in energy-related calculations. *Energy*, 83, 749-755.

KOČÍ, J., MADĚRA, J., JERMAN, M. & ČERNÝ, R. 2015. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes. *Energy and Buildings*, 99, 61-66.

KOČÍ, V., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2012. Exterior thermal insulation systems for AAC building envelopes: Computational analysis aimed at increasing service life. *Energy and Buildings*, 47, 84-90.

KOČÍ, V., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2013. Computer aided design of interior thermal insulation system suitable for autoclaved aerated concrete structures. *Applied Thermal Engineering*, 58, 165-172.

KOČÍ, J., MADĚRA, J. & ČERNÝ, R. 2014. Generation of a critical weather year for hygrothermal simulations using partial weather data sets. *Building and Environment*, 76, 54-61.

JERMAN, M., KOČÍ, V., MADĚRA, J., VÝBORNÝ, J. & ČERNÝ, R. 2010. Water and heat transport parameters of materials involved in AAC-based building envelopes. *1st Central European Symposium on Building Physics*, 39-45.

ČERNÝ, R., MADĚRA, J., KOČÍ, J. & VEJMELOVÁ, E. 2009. Heat and moisture transport in porous materials involving cyclic wetting and drying. *Computational Methods and Experimental Measurements Xiv*, 48, 3-12.

České vysoké učení technické v Praze

Název: Modelování transportních jevů v konstrukčních prvcích
se složitou vnitřní geometrií

Autor: doc. Ing. Jiří Maděra, Ph.D.

1. vydání

52 stran

Tisk: Expressprint, Botanická 606/24, 602 00 Brno

© Jiří Maděra, 2021

ISBN 978-80-01-06925-7