

Ing. Pavel KOPECKÝ,
ČVUT v Praze, FSv,
Katedra konstrukcí pozemních
staveb

Zemní výměník tepla: model a validace

Earth to Air Heat Exchanger: Model and Validation

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Zemní výměník tepla se používá pro předehřev a chlazení čerstvého vzduchu přiváděného do budovy. Příspěvek popisuje principy nově vyvinutého tepelně vlhkostního modelu pro nestacionární simulaci zemních výměníků tepla a validaci modelu oproti analytickému řešení.

Klíčová slova: zemní výměník tepla, chlazení, numerická simulace, validace

The earth-to-air heat exchanger is a device used for pre-heating and pre-cooling of fresh air. The contribution describes main principles of the newly developed numerical hygro-thermal model for transient simulation of earth-to-air heat exchangers. A validation against an analytical solution is presented.

Key words: earth-to-air heat exchanger, passive cooling, numerical simulation, validation

ÚVOD

V našem podnebném pásu je přirozené, že budovy potřebují během roku vytápět či chladit. Pro předehřev a chlazení čerstvého vzduchu přiváděného do budovy je možné využít zemní výměník tepla (ZVT). Jde o potrubí uložené v určité hloubce pod povrchem země, přes které je do budovy nasáván čerstvý venkovní vzduch. I když jde o uspořádání vyvinuté v moderní době, využívá tradičního principu relativně stálé teploty zeminy od určité hloubky pod povrchem země. V období, kdy je venkovní teplota vyšší než teplota okolní zeminy, je procházející vzduch ochlazován. V období, kdy je venkovní teplota nižší než teplota okolní zeminy, je procházející vzduch ohříván. Ve spojení s budovou pochopitelně nastávají období, kdy je výhodnější budovu větrat přímo, bez průchodu ZVT. Jde například o situace, kdy je malý rozdíl mezi teplotou vstupujícího vzduchu a teplotou v zemině.

Pro návrh dimenzí a ověření energetického přínosu ZVT se používají matematické modely, které se dají rozdělit na modely analytické, viz např. [1], numerické [2], [3] a modely kombinované. Analytické modely jsou omezené svým použitím na okrajové podmínky pro které byly odvozeny. Jejich předností je naopak rychlost výpočtu a srozumitelnost pro uživatele. Proto se používají zejména pro návrh dimenzí a koncepční úvahy v rané fázi projektování. Podrobnější numerické modely umožňují studovat situace, pro která by se analytická vyjádření nacházela jen obtížně (např. přerušovaný provoz, kondenzace a evaporace vodní páry v potrubí, složitá vícetrubková uspořádání). Jednou z možností návrhu a podrobného hodnocení provozu ZVT je níže představený matematický model.

ANALÝZA

Geometrické uspořádání použité pro vývoj matematického modelu zemního výměníku tepla je na obr. 1.

Přenos tepla

Přenos tepla v ZVT může být popsán následujícími třemi diferenciálními rovnicemi. Diferenciální rovnice (1) popisuje tepelnou bilanci proudícího vzduchu na podélném elementu tloušťky dx (obr. 2),

$$\frac{d\theta_a}{dx} + \frac{h_a 2\pi_0}{m_a c_a} \theta_a - \frac{h_s 2\pi_0}{m_a c_a} \theta_s - \frac{g_v l 2\pi_0}{m_a c_a} = 0 \quad (1)$$

kde

- θ_a – teplota vzduchu v potrubí [°C],
- θ_s – teplota vnitřního povrchu potrubí [°C],
- h_a – součinitel přestupu tepla konvekce [W/(m²K)],
- g_v – kondenzující (+) nebo vypařující se (-) množství vodní páry [kg/(m²s)],
- l – latentní teplo kondenzace [J/kg],
- m_a – hmotnostní průtok vzduchu [kg/s],
- c_a – měrná tepelná kapacita vzduchu [J/(kg.K)],
- r_0 – vnitřní poloměr potrubí.

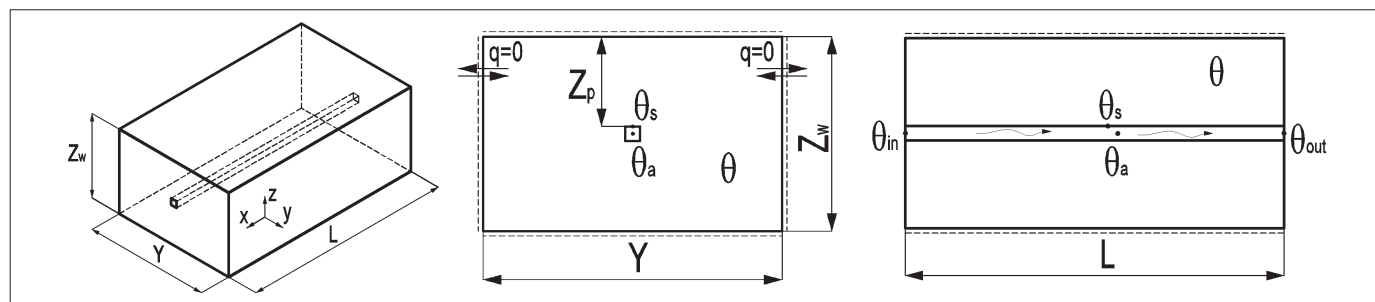
Diferenciální rovnice (2) popisuje dvojrozměrné nestacionární vedení tepla v prostoru kolem ZVT,

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

kde

- θ – teplota v zemině [°C],
- ρc_p – objemová tepelná kapacita zeminy [J/(m³.K)],
- λ – tepelná vodivost zeminy [W/(m.K)].

Podélná složka tepelného toku (rovnoběžně s osou x) byla v rovnici (2) zanedbána, poněvadž její vliv na teplotu proudící tekutiny není příliš významný, jak ukazují závěry publikované v [4]. Tyto dvě diferenciální rovnice jsou vzájemně propojeny tepelnou bilancí vnitřního povrchu potrubí.



Obr. 1 Axonometrie, příčný a podélný řez ZVT

$$h_a(\theta_a - \theta_s) = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{si} \quad (3) \quad \beta_c \text{ je součinitel přestupu vodní páry} \quad [\text{m/s}],$$

který lze počítat z Lewisova vzorce (8)

Součinitel přestupu tepla konvekcí h_a mezi proudícím vzduchem a vnitřní stěnou potrubí je možné vypočítat ze známého vztahu,

$$h_a = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{D_{char}} \quad (4) \quad \beta_c = \frac{h_a}{\rho_a c_a} \quad (8)^{1)}$$

kde
 λ_a – součinitel tepelné vodivosti vzduchu $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$,
 D_{char} – charakteristický rozměr (průměr potrubí) $[\text{m}]$,
 Nu – Nusseltovo číslo $[-]$.

Nusseltovo číslo pro vynucené turbulentní proudění v dlouhém potrubí kruhového průřezu lze počítat ze vzorce

$$Nu = 0,023 \text{ Re}^m \text{ Pr}^n \quad (5) \quad \rho_v \leq \rho_{v,sat} \quad (9)$$

kde $\rho_{v,sat}$ je parciální hustota vodní páry na mezi nasycení (funkce aktuální teploty vzduchu v ZVT θ_a).

Re – Reynoldsovo číslo $[-]$
 Pr – Prandtlovo číslo $[-]$
 exponenty $m = 0,8$ a $n = 0,4$ pro ohřev a $n = 0,3$ pro chlazení.

V [6] se uvádí, že vzorec (5) je dobrou aproximací v rozmezí $(10\,000 < \text{Re} < 120\,000)$, $(0,7 < \text{Pr} < 120)$ a $(L/D > 60)$.

Přenos vlhkosti

Přenos vlhkosti v ZVT je popsán zjednodušeně, vliv změn vlhkosti na vlastnosti zeminy a změny skupenství v obklopující zemině nejsou v modelu zahrnuty. Vycházíme z předpokladu, že se nemění parciální hustota vodní páry procházejícího vzduchu

$$\rho_v = \rho_{v,in} \quad (6)$$

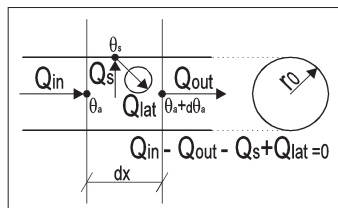
kde
 ρ_v – parciální hustota vodní páry vzduchu v ZVT $[\text{kg}/\text{m}^3]$
 $\rho_{v,in}$ – parciální hustota vodní páry vzduchu vstupujícího do ZVT $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Tento předpoklad platí pro těsné plastové potrubí, pokud nedochází ke kondenzaci anebo evaporaci vodní páry z povrchu potrubí.

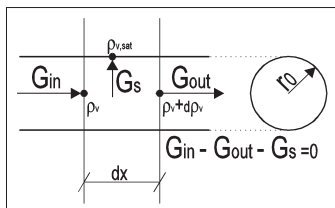
Jestliže dojde ke kondenzaci anebo evaporaci vodní páry, procházející vzduch je odvlhčován nebo vlhčen. Analogicky k tepelné bilanci (1) lze sestavit vlhkostní bilanci (7) na podélném elementu tloušťky dx (obr. 3),

$$\frac{d\rho_v}{dx} + \frac{\beta_c 2\pi r_0}{V_a} \rho_v - \frac{\beta_c 2\pi r_0}{V_a} \rho_{v,sat}^{\theta_s} = 0 \quad (7)$$

kde
 V_a je objemový průtok vzduchu $[\text{m}^3/\text{s}]$,
 $\rho_{v,sat}$ je parciální hustota vodní páry na mezi nasycení (funkce teploty vnitřního povrchu potrubí θ_s)



Obr. 2 Tepelná bilance na podélném elementu ZVT



Obr. 3 Vlhkostní bilance na podélném elementu ZVT

Kombinovaný přenos tepla a vlhkosti

Teplu spojené se změnami skupenství ovlivňuje tepelnou bilanci vzduchu proudícího v potrubí. Vliv latentního tepla je v modelu zahrnutý ekvivalentní povrchovou teplotou (viz. algoritmus). Hustotu tepelného toku vlivem kondenzace nebo evaporace q_v $[\text{W}/\text{m}^2]$ (10) lze vypočítat z kondenzujícího nebo vypařujícího se množství,

$$q_v = l \cdot g_v \quad (10)$$

ALGORITMUS

Pro popis algoritmu je zaveden následující systém indexace: i – index osy x (podél délky ZVT) a t – index časového kroku. Index $(t-1)$ označuje hodnoty předchozí (o krok zpět). V provozu ZVT mohou nastat dvě základní situace: a) ZVT je v provozu ($m_a > 0$), b) ZVT je vypnutý, dochází k přirozené⁴⁾ tepelné regeneraci zeminy ($m_a = 0$).

Fáze provozu

Algoritmus výpočtu během jednoho časového kroku je rozdělen na tři části:

1a) Explicitní výpočet nových hodnot teploty vzduchu po délce ZVT

Řešení rovnice (1) lze nalézt analyticky a psát ve tvaru

$$\theta_{a(i,t)} = \theta_{s,eqv(i,t-1)} + (\theta_{a(i-1,t)} - \theta_{s,eqv(i,t-1)}) \exp\left(-\frac{h_a 2\pi r_0}{m_a c_a} \Delta x_i\right) \quad (11)$$

$$\theta_{s,eqv(i,t-1)} = \theta_{s,mean(i,t-1)} + \frac{g_{v(i,t-1)} \cdot l}{h_a} \quad (12)$$

kde
 $\theta_{s,mean}$ je průměrná teplota vnitřního povrchu potrubí $[^\circ\text{C}]$
 $\theta_{s,eqv}$ je ekvivalentní teplota vnitřního povrchu potrubí (se zahrnutím vlivu kondenzace nebo evaporace) $[^\circ\text{C}]$.

¹⁾ Po dosažení vztahu (8) do vztahu (7) bychom obdrželi rovnici analogickou s rovnici (1).

²⁾ Významným jevem ve skutečnosti může být stálá infiltrace vlhkosti ze zeminy vlivem netěsnosti ve stěně potrubí.

³⁾ Odhadnout reálné rozložení mokrého povrchu po délce potrubí je obtížné, záleží, jakým směrem je spádováno potrubí a jak rychle se voda v potrubí dokáže vlivem spádu přemísťovat.

⁴⁾ Naproti tomu nucená regenerace zeminy může nastat například při provozu ZVT během letní noci (chlazení zeminy).

Tab. 1 Definice kondenzace a evaporace v modelu ZVT

	Kondenzace	Evaporace	Suchý povrch
Podmínka	$\rho_{v(i-1,t)} > \rho_{v,sat(i,t-1)}^{\theta_s}$	$\rho_{v(i-1,t)} < \rho_{v,sat(i,t-1)}^{\theta_s}$ a zároveň $G_{acu(i,t-1)} > 0$ *	$\rho_{v(i-1,t)} < \rho_{v,sat(i,t-1)}^{\theta_s}$ a zároveň $G_{acu(i,t-1)} = 0$
Parciální hustota vodní páry	$\rho_{v(i,t)} = \text{dle rovnice (13)}$	$\rho_{v(i,t)} = \text{dle rovnice (13)}$ $\rho_{v(i,t)} \leq \rho_{v,sat}^{\theta_a}$ $\rho_{v(i,t)} > \rho_{v,sat}^{\theta_a}$	$\rho_{v(i,t)} = \rho_{v(i-1,t)}$ $\rho_{v(i,t)} = \rho_{v(i,t)}$ $\rho_{v(i,t)} = \rho_{v,sat}^{\theta_a}$ **
Kondenzující nebo vypařující množství	$g_{v(i,t)} = \frac{(\rho_{v(i-1,t)} - \rho_{v(i,t)})V_a}{2\pi\Delta x_i}$	$g_{v(i,t)} = \frac{(\rho_{v(i-1,t)} - \rho_{v(i,t)})V_a}{2\pi\Delta x_i}$ $g_{v(i,t)} = 0$ **	$g_{v(i,t)} = 0$

* Vnitřní povrch potrubí je mokřý, G_{acu} je akumulované množství vody [kg].
 ** Procházející vzduch nemůže dosáhnout relativní vlhkosti vyšší než 100 %, při 100 % nasycení nemůže docházet k odparu (byť by potrubí bylo ještě mokřé).

1b) *Explicitní výpočet nových hodnot parciálních hustot vodní páry, kondenzujícího a vypařujícího se množství a akumulovaného množství po délce ZVT*
 Řešení rovnice (7) lze nalézt analyticky a psát ve tvaru

$$\rho_{v(i,t)} = \rho_{v,sat(i,t-1)} + (\rho_{v(i-1,t)} - \rho_{v,sat(i,t-1)}) \exp\left(-\frac{\beta_c 2\pi\Delta x_i}{V_a}\right) \quad (13)$$

Možnosti, které mohou nastat, jsou shrnuty v tab. 1.

2) Výpočet nových teplot v zemině

V jednotlivých řezech kolmých na délku ZVT (obr. 4) je spočteno 2D teplotní pole. Rovnice je řešena (2) explicitní metodou konečných diferencí, např. [7].

Konstrukce vnitřní okrajové podmínky: S využitím v prvním kroku spočítaných teplot vzduchu v potrubí je spočtena průměrná teplota vzduchu v příslušném podélném dílku

$$\theta_{a,mean(i,t)} = \frac{\theta_{a(i-1,t)} + \theta_{a(i,t)}}{2} \quad (14)$$

Průměrné teploty vzduchu společně s hodnotami konvektivního součinitele přestupu tepla tvoří vnitřní okrajovou podmínku.⁵⁾ Kruhové potrubí je nahrazeno čtvercem o stejném obvodu.

Konstrukce vnějších okrajových podmínek výpočtových řezů: Okrajová podmínka na povrchu země je nejčastěji vytvořena teplotou vnějšího vzduchu společně s globálním solárním zářením na vodorovnou plochu. Hodnotu odporu při přestupu tepla (časově proměnná hodnota, ovlivněn větrem, sněhem, rostlinným porostem) a hodnotu pohltivosti povrchu je třeba odhadovat. Pokud jsou k dispozici naměřené teploty povrchu zeminy, tak je vhodné je použít k vytvoření okrajové podmínky⁶⁾, viz. [12]. Boční okrajové podmínky výpočtových řezů jsou adiabatické a spodní okrajová podmínka výpočtových řezů může být vytvořena izotermickou hranicí, kdy bývá zadána průměrná teplota vnějšího vzduchu.

⁵⁾ Aproximace teploty vzduchu v příslušném podélném elementu průměrnou teplotou nemusí být vždy dostatečně přesná. Potíže může například způsobit teoretický případ velmi vysokého přestupu tepla, kdy takto vytvořená okrajová podmínka velmi nadhodnocuje tepelný tok přenášený přes stěnu potrubí do zeminy. Pro reálné pří-

3) Výpočet nových hodnot povrchových teplot

Teplota vnitřního povrchu potrubí se vypočte z tepelné bilance vnitřního povrchu (3).

Fáze přirozené regenerace zeminy

Vzduch v potrubí je uvažován bez proudění. Výpočet navazuje na hodnoty teplot v zemině vypočítané v posledním provozním časovém kroku. Probíhá numericky, řešením rovnice (2), obdobně jako ve fázi provozu, avšak bez vnitřního zdroje, pouze s uvažováním obvodových okrajových podmínek výpočtových řezů.

Vývojový diagram algoritmu výpočtu je zobrazen na Obr. 5. Výpočetní program byl sestaven, napsán a testován v matematickém softwaru MATLAB [8].

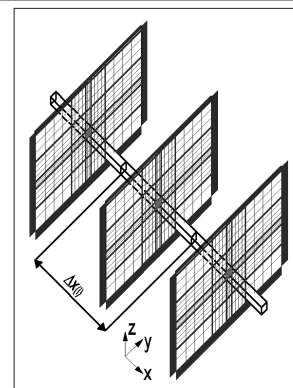
STABILITA A PŘESNOST VÝPOČTU

Použití předchozích hodnot pro výpočet hodnot nových přináší problémy se stabilitou výpočtu. Kromě možné numerické nestability explicitní metody používané pro výpočet teplot v zemině, která je však kontrolována podmínkou omezující délku časového kroku výpočtu, může nastat problém nestability v důsledku použití předchozích hodnot povrchových teplot a předchozích hodnot kondenzujícího množství (jistá daň za jednoduchost metody).

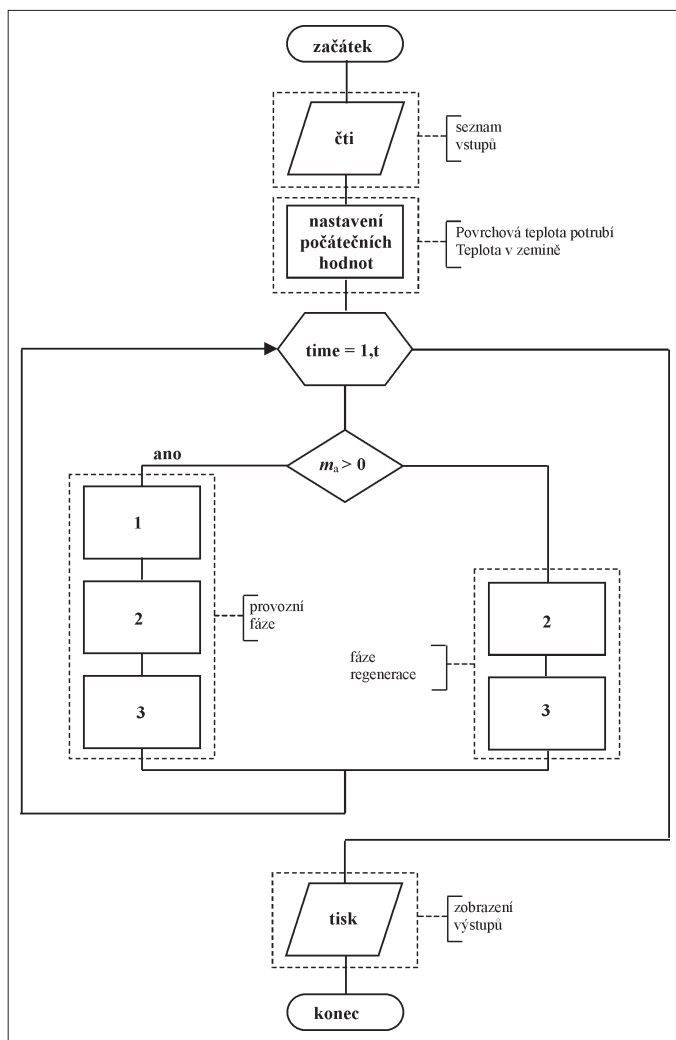
Použití předchozích hodnot povrchových teplot přináší nadhodnocení nebo podhodnocení výsledků při výpočtu v několika časových krocích pro-

pady nízkých hodnot konvektivního součinitele přestupu tepla však tato aproximace plně postačuje.

⁶⁾ Platí pouze pro simulaci ZVT, který svým provozem povrchovou teplotu sám neovlivňuje (hloubka uložení potrubí > 1,0 m)



Obr. 4 Podélné elementy potrubí se zobrazenými výpočtovými řezy



Obr. 5 Vývojový diagram algoritmu

vozní fáze po fázi regenerace. Použití minulé hodnoty kondenzujícího množství může nadhodnotit nebo podhodnotit latentní teplo kondenzace s následným dopadem na teplotu vzduchu v potrubí. Tyto oscilace lze omezit použitím výpočtu, který zopakuje základní algoritmus za jeden výpočetní krok několikrát. Tato vložená iterace vnáší do algoritmu další výpočetní operace a ovlivňuje tak rychlost výpočtu. Iteraci je proto vhodné využívat pouze v několika výpočetních krocích po „náběhu“ výpočtu z fáze regenerace do fáze provozu a také pro „letní“ výpočty chlazení.

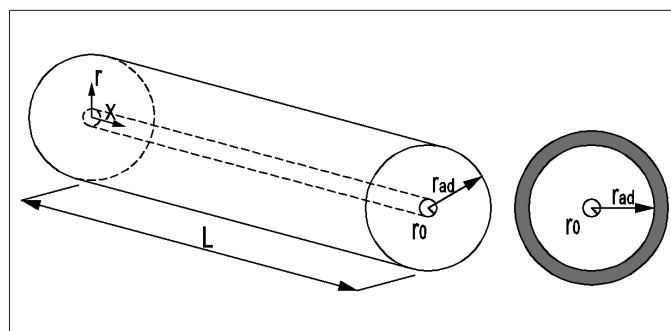
Rovněž hustota výpočetní sítě je důležitá, poněvadž ovlivňuje rychlost, přesnost a stabilitu výpočtu. Čím jemnější výpočetní síť, tím je nutný kratší (stabilní) výpočtový krok, a tím déle výpočet trvá.

Velký rozdíl mezi vlastnostmi vzduchu v potrubí (izolant bez kapacity) a zeminou (dobrý vodič s kapacitou) působí potíže se stabilitou explicitního výpočtu teplot v zemině ve fázi regenerace zeminy. Pro zajištění stability je nutný velmi krátký výpočtový krok, což je ve výsledku velmi pomalé. Řešením může být buď počítat fázi regenerace implicitní metodou (je stabilní vždy), anebo zanedbat vzduch v potrubí, nahradit ho zeminou a zachovat explicitní výpočet.⁷⁾

VALIDACE

Analytické řešení pro cylindrický výměník s adiabatickou okrajovou podmínkou na vnější straně a s harmonicky kmitající teplotou vstupního vzduchu

⁷⁾ Takto je problém řešen ve výpočetním programu.



Obr. 6 Cylindrický výměník tepla s obvodovou adiabatickou okrajovou podmínkou

chu [1] bylo použito pro srovnání s numerickým výpočtem. Byly srovnávány tři geometricky odlišné konfigurace výměníku, které vyvolávají tři druhy modulace výstupní teploty (tlumení roční amplitudy, tlumení denní amplitudy, roční posunutí fáze).

Analytické řešení pro cylindrický výměník (obr. 6) s obvodovou adiabatickou okrajovou podmínkou a harmonicky kmitající teplotou vstupního vzduchu

$$\theta_m(t) = \theta_0 \cos(\omega t) \quad (15)$$

lze vyjádřit ve tvaru

$$\theta_a(x, t) = \theta_0 \exp\left(-\frac{Sh}{m_a c_a}\right) \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v_a}\right) - \frac{Sk}{m_a c_a}\right] \quad (16)$$

kde

- S – teplosměnná plocha [m²] do vzdálenosti x od počátku,
- h – celkový koeficient tlumení [W/(m².K)],
- k – celkový koeficient posunutí [W/(m².K)],
- t – čas [s].

Výraz x/v_a je doba zdržení v ZVT.

Podrobnosti k odvození analytických vztahů a výpočtu obou koeficientů lze nalézt v [1].

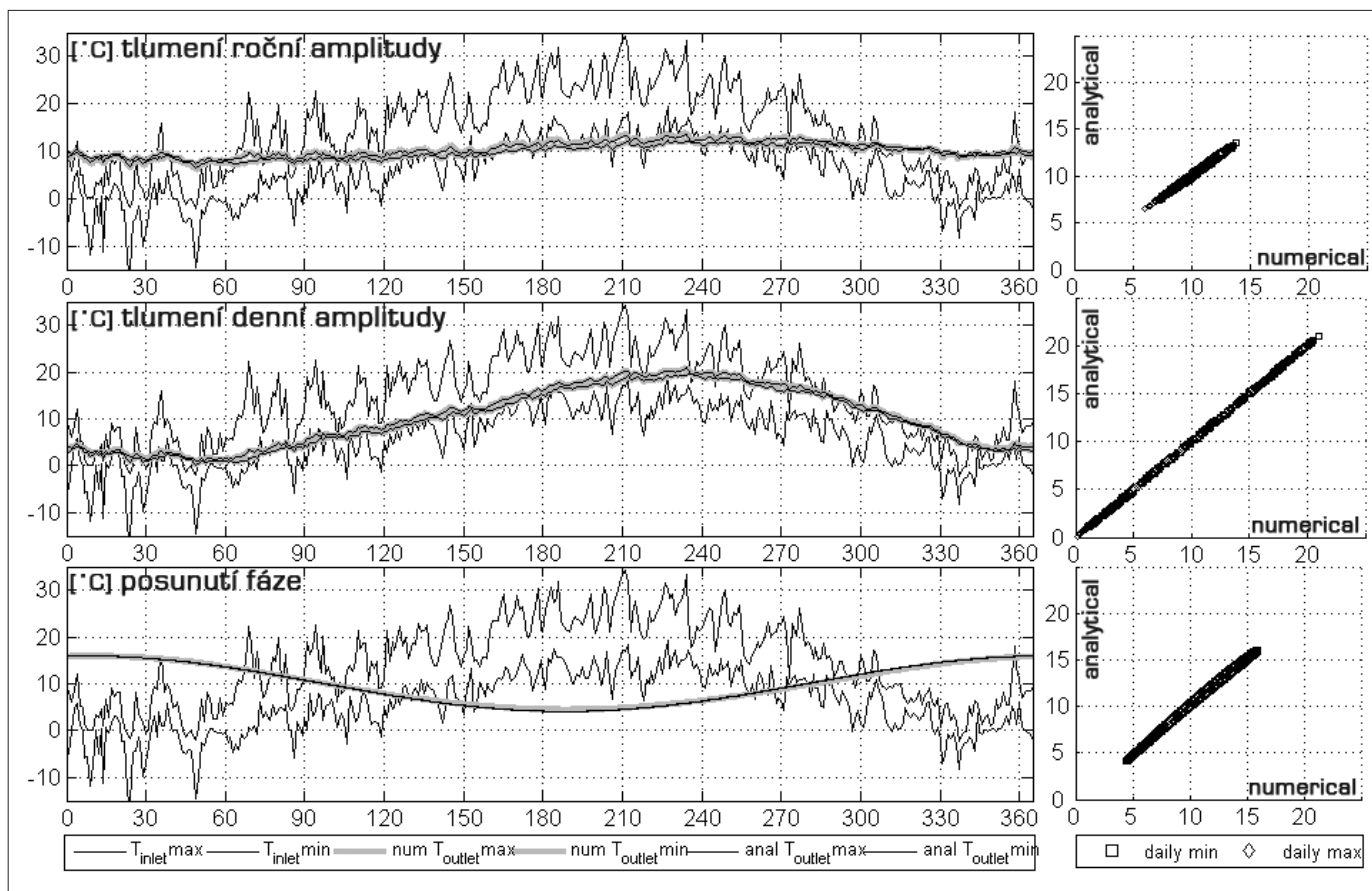
Pro účely porovnání byly definovány tři provozně-geometrické varianty cylindrického výměníku (Tab. 2). Jde o stejné konfigurace, jaké byly použity v [9] při validaci jiného numerického modelu [2]. Validace tak přináší i nepřímé srovnání s všeobecně respektovaným modelem.

Tab. 2 Provozně geometrické konfigurace cylindrického výměníku

Konfigurace	r_0 [m]	r_{ad} [m]	L [m]	Vnější hranice
Tlumení roční amplitudy	0,125	2,0	50	adiabatická
Tlumení denní amplitudy	0,125	0,6	50	adiabatická
Roční posunutí fáze	0,125	0,6	400	adiabatická

Teplota vstupního vzduchu byla dána meteorologickými daty pro město Ženeva a byla aproximována kompletní Fourierovou řadou harmonických funkcí (4380 frekvencí). Průtok byl uvažován hodnotou 162,5 m³/h (cca 200 kg/h), součinitel přestupu tepla hodnotou 4,13 W/(m².K). Vlastnosti zeminy byly uvažovány takto: $\lambda = 1,9$ W/(m.K), $\rho c_p = 1,9$ MJ/(m³.K). Velikost ekvivalentního čtverce pro vnější hranici (převod kruhu na čtverec) byla odvozena z podmínek stejných ploch.

Výpočetní síť byla zvolena tak, aby bylo možné použít výpočtový krok jedné hodiny. Výsledky porovnání analytického řešení s numerickou simulací jsou shrnuty na obr. 7.



Obr. 7 Porovnání s analytickým řešením

Vlevo – porovnání mezi numerickou simulací (šedá, silná) a analytickým řešením (černá slabá) pro různé konfigurace výměníku – denní hodnoty maximálních a minimálních vstupních a výstupních teplot; Vpravo – jiné srovnání numerický vs. analytický

Analýza vývoje odchylky numerického výpočtu od analytického ukazuje výbornou shodu i při použití nepříliš husté výpočetní sítě numerického výpočtu. Jde o potvrzení, že základní algoritmus výpočtu (bez uvažování přenosu vlhkosti) pracuje správně. Validace vlhkostních výpočtů nebude jednoduchá, srovnání snad bude možné s využitím naměřených dat.

ZÁVĚREM

Paralelně s vývojem modelu probíhají provozní měření na skutečných systémech. V současné době je model testován s použitím dat získaných z dlouhodobého monitorování provozu jednoduchého ZVT nízkoeenergetického domu W [10] a v srpnu 2005 zahájeném provozním měření cirkulačního ZVT rodinného pasivního domu v Rychnově u Jablonce nad Nisou [11]. Porovnáním simulace s provozním měřením zemního výměníku tepla domu W se zabývá příspěvek [12].

Vyvinutý matematický model, umožňuje detailní předpověď chování ZVT. Svojí povahou je model zvláště vhodný na podrobné zkoumání chování ZVT za různých okrajových podmínek, tj. jako vývojový nástroj. Může se například jednat o pozorování vlivů různých strategií řízení provozu, vlivu speciálních geometrických uspořádání; např. vícetrubkové systémy, cirkulační zemní výměník, odstínění tepelného toku z povrchu země tepelnou izolací, uložení ZVT pod budovou apod.

Poděkování:

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Kontakt na autora: pavel.kopecky@fsv.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] HOLLMULLER, P. Analytical characterization of amplitude dampening and phase-shifting in air/soil heat exchangers. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 2003.
- [2] HOLLMULLER, P., LACHAL, B. TRNSYS compatible moist air hypocaust model: description and validation. *Centre universitaire d'études des problèmes de l'énergie, Genève*, 1998.
- [3] MIHALAKAKOU, G., SANTAMOURIS, M., ASIMAKOPOULOS, D. Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. *Solar Energy* 53, 1994.
- [4] KOPECKÝ, P. Numerical modelling of the flat-plate heat exchanger. In *Sborník konference Tepelná ochrana budov 2005*, Vysoké Tatry, 2005.
- [5] ASHRAE. *Ashrae Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers, 2001.
- [6] HELLSTRÖM, G. Ground Heat Storage. *Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden*, 1991.
- [7] RODE, C. Series of lecture notes on numerical transient heat conduction. materials for DTU course Numerical Methods for Building Energy Technology, 1997.
- [8] MATHWORKS: Matlab, 2005. Pro další informace: <http://www.mathworks.com>
- [9] HOLLMULLER, P., LACHAL, B. Buried pipe systems with sensible and latent heat exchange: validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring. In *Proceedings of 9th conference of IBPSA*, Montreal, 2005.
- [10] TYWONIAK, J.; NOVÁK, J. Dům W – novostavba nízkoeenergetického rodinného domu s dřevěnou konstrukcí, *Materiály pro stavbu* 8, 2003.
- [11] JINDRÁK, M. Pasivní dům v Rychnově. *Tepelná ochrana budov* 1, 2005.
- [12] KOPECKÝ, P. Pokročilá simulace zemních výměníků tepla – srovnání simulace a experimentálních dat z měření, In *Sborník konference Tepelná ochrana budov 2006*, Praha 2006. ■