

# FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ KOMPONENT SYSTÉMU ZÁSBOVÁNÍ TEPELNOU ENERGIÍ

*Ing. Jiří Marek, CSc., Ing. Jozef Poláček, Ph.D.*

UNIS a.s. Brno, Jundrovská 33, 624 00 Brno

## **System centrálního zásobování tepelnou energií SCZT**

V souladu s růstem velkých evropských měst se rozvíjí i rozlehlé teplotenské soustavy (District Heating Systems). Ty jsou tvořeny rozšiřujícími se sítěmi tepelných rozvodů od tepelných zdrojů k odběratelům a současně propojením postupně budovaných tepelných zdrojů. V souvislosti s rozvojem technologie nabývá na významu i rozvoj informačních technologií včetně řízení dodávky energií. Dodávka energií, tj. tepla a elektřiny, spočívá v optimálním řízení výkonu tepelných zdrojů s kombinovanou výrobou a v řízení rozvodu a spotřeby tepla a energií inteligentními řídicími systémy. **Úlohou je vytvoření matematicko-fyzikálního modelu rozlehlých teplotenských horkovodních i parních sítí a výrobních zdrojů tepla pro účel vytvoření nových nekonvenčních algoritmů řízení pro komplexní řešení řízení technologického řetězce „výroba, doprava + rozvod a spotřeba tepla“ zejména rozlehlých teplotenských soustav.**

Cílem komplexního přístupu k řešení nových algoritmů inteligentních řídicích systémů je snižování nákladů na jednotku spotřebovaného tepla a zvyšování ochrany životního prostředí.

Funkcí SCZT – Rozlehlých soustav centralizovaného zásobování teplem- Extensive Heating Systems (District Heating) je trvalé zabezpečení veškerých ekonomicky zdůvodněných nároků na dodávku energie u všech spotřebitelů a to při minimálních nákladech dodané jednotky tepla a při zvyšování úrovně ekologických parametrů životního prostředí.

Nároky spotřebitelů na energii je třeba sladit s požadavkem pokud možno nejvyšší hospodárnosti práce celé soustavy SCZT při dodržování předepsaných kvalitativních ukazatelů dodávané energie.

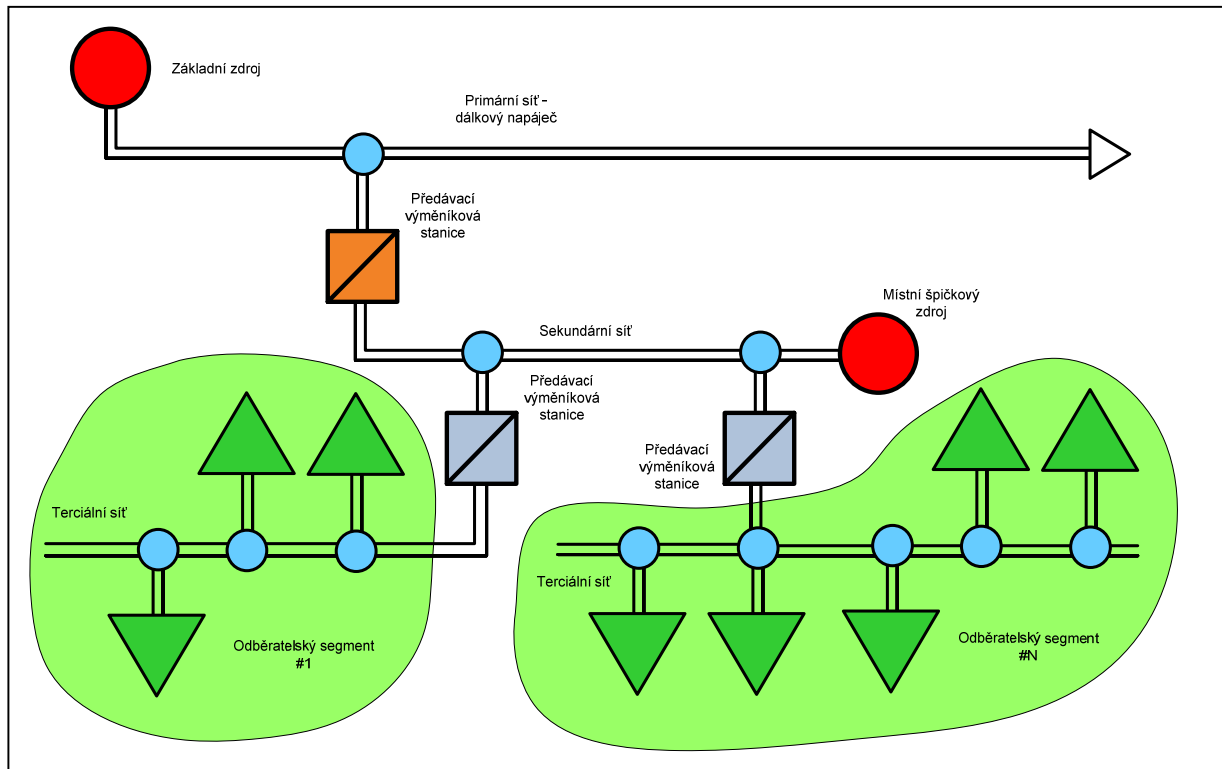
Nabízí se tedy pro řízení provozu zokruhovaných teplotenských sítí rozlehlých soustav CZT aplikace inteligentních řídicích systémů. Je zřejmé, že vyšší úroveň řízení rozlehlých soustav CZT je vyžadována jak z hlediska technologického, ekonomického tak i ekologického.

Při komplexním řízení rozlehlé teplotenské soustavy, tj. současné řízení výroby, dopravy včetně rozvodu a spotřeby tepla a elektrické energie je nutné plně respektovat nároky spotřebitelů na dodávané energie, které lze vymezit následujícími požadavky:

- zajištění dodávky zdůvodněného množství energií všem spotřebitelům podle jejich časově proměnných potřeb,
- zajištění stálosti a nepřetržitosti dodávky energií,
- trvalé zajištění dodávky energií v mezích předepsaných ukazatelů jakosti (např. teploty horké vody v horkovodech, tlaku a teploty páry v parovodech, případně kmitočtu a napětí elektrické energie při kombinované výrobě elektřiny a tepla a pod.).

Nároky spotřebitelů na energii je třeba sladit s požadavkem co nejvyšší hospodárnosti práce celé soustavy SCZT v příslušné lokalitě.

Hospodárné řízení subsystému výroby tepelné energie spočívá jednak v hospodárném rozdělování zatížení mezi jednotlivé spolupracující zdroje včetně hospodárného rozdělování mezi jednotlivé výrobní jednotky uvnitř zdrojů a dále i v určení vhodné sestavy spolupracujících zdrojů včetně určení vhodné skladby spolupracujících jednotek uvnitř zdroje, jakož i v určení vhodného ekonomicky podloženého spouštění či odstavení výrobních jednotek případně i celých zdrojů.



Obr.1. Systém centrálního zásobování tepelnou energií

Hospodárný provoz subsystému tepelných rozvodných sítí, vyžaduje různý způsob řízení tepelného výkonu v závislosti na druhu teplotonosné látky, tj. horké vody nebo páry. Obecně lze řízení tepelného výkonu uskutečnit ve všech člancích řetězce:

- řízení rozlehlého systému centralizovaného zásobování teplem (SCZT);
- řízení zdrojů tepla (na vstupu do tepelné sítě),
- řízení přenosu tepla v distribuční síti (předávací stanice),
- řízení spotřebitelské soustavy,

Na základě znalostní analýzy provozu rozlehlých soustav centralizovaného zásobování teplem byly vypsycifikovány následující Metody inteligentních řídicích systémů provozu SCZT pro zvýšení hospodárnosti a zlepšení životního prostředí.

Základní technické úlohy řízení rozlehlého systému centralizovaného zásobování teplem lze definovat v oblastech :

1. kooperace s obnovitelnými a druhotnými zdroji energie;
2. monitorování provozních stavů systému centralizovaného zásobování teplem;
3. akvizice charakteristických dat a jejich informační analýza;
4. koordinace řízení subsystémů centralizovaného zásobování teplem.

Metody inteligentních řídicích systémů provozu SCZT mají realizační stupně:

- **informační analýza, návrh a algoritmizace;**
- **simulace, ověření funkčnosti algoritmu;**
- určení konkrétní lokality pro pilotní projekt a zpracování potřebného přístrojového vybavení ve spolupráci s provozovatelem (projednání možností případných doplnění přístrojového vybavení)
- vlastní realizace návrhu v dané lokalitě pilotního projektu;
- uvedení do provozu a provozní zkoušky;
- zhodnocení a zobecnění původního návrhu pro další uživatele.

## Modelování a identifikace komponent systému SCZT

SCZT obsahuje celkem tři základní prvky (obr. 1.) :

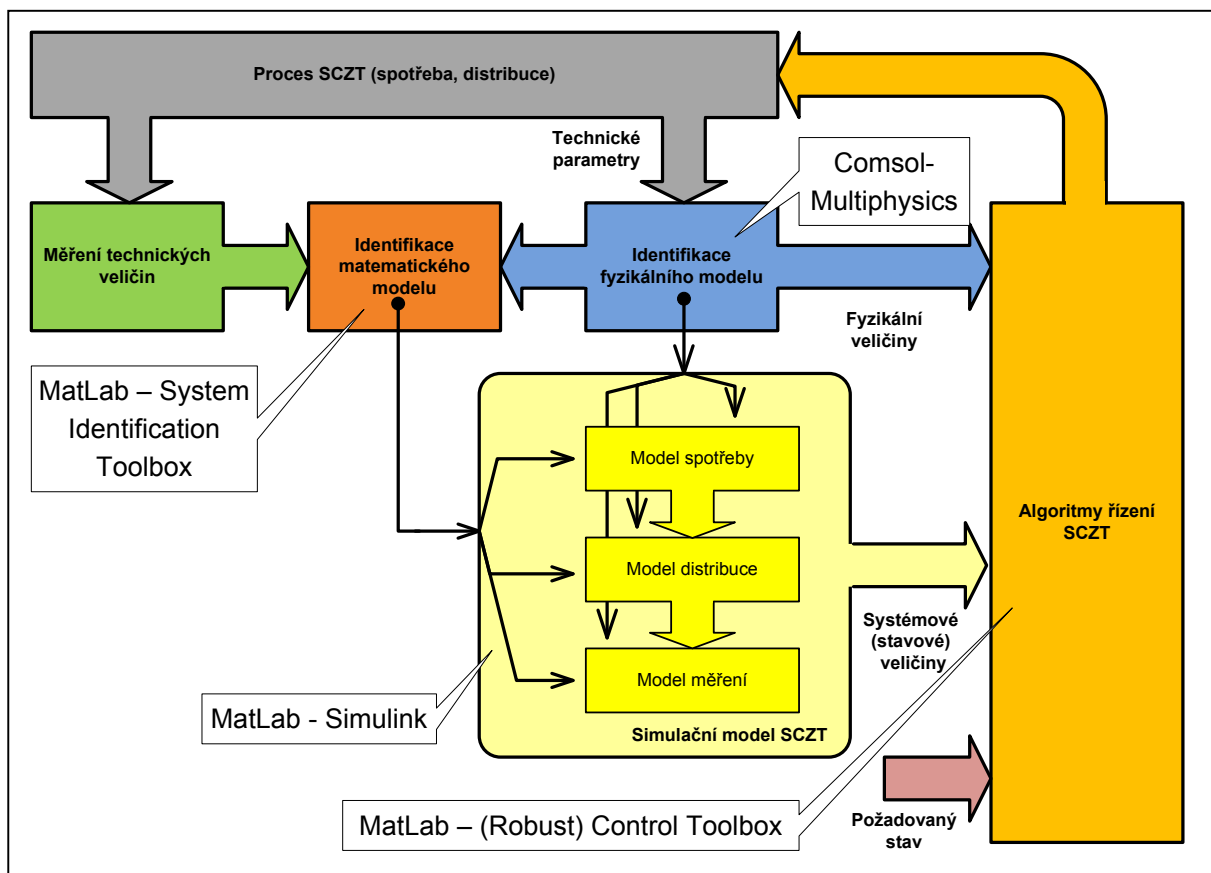
- předávací výměňková stanice;
- primární a sekundární síť;
- odběratelský segment - systém otopných těles (radiátorů).

Vlastnosti těchto základních prvků ovlivňují technologické procesy distribuce a spotřeby tepelné energie. Je potřebné ovlivňovat (řídit) stav jednotlivých prvků SCZT tak, aby bylo zabezpečeno dosažení požadovaného stavu. Z hlediska zabezpečení dosažení optimálního stavu je potřebné znát stav (parametry) jednotlivých prvků SCZT. Odhad stavu reálného technologického procesu (SCZT) představuje řešení úlohy identifikace tohoto procesu z jeho matematickým modelem.

Předmětem identifikace jsou jednotlivé základní prvky SCZT :

- tepelný výměník jako hlavní komponenta výměňkové stanice;
- potrubí;
- typické otopné těleso (radiátor ústředního topení).

Úloha identifikace se rozpadá na tři části.



Obr. 2. Struktura procesu řízení SCZT

První část představuje řešení úlohy akvizice dat. Úloha akvizice dat znamená nalézt nejen vhodnou metodu vlastního sběru dat (dostupnost měřicích míst) – dosažitelnost měření, ale také zjistit přesnost měření. Předmětem měření je obvykle množina veličin

$$d = \{ u(t), v(t), w(t), z(t) \}, \quad (1)$$

kde  $u(t)$  je vektor řídicí veličiny;

$w(t)$  je vektor vstupní poruchy do identifikované soustavy;

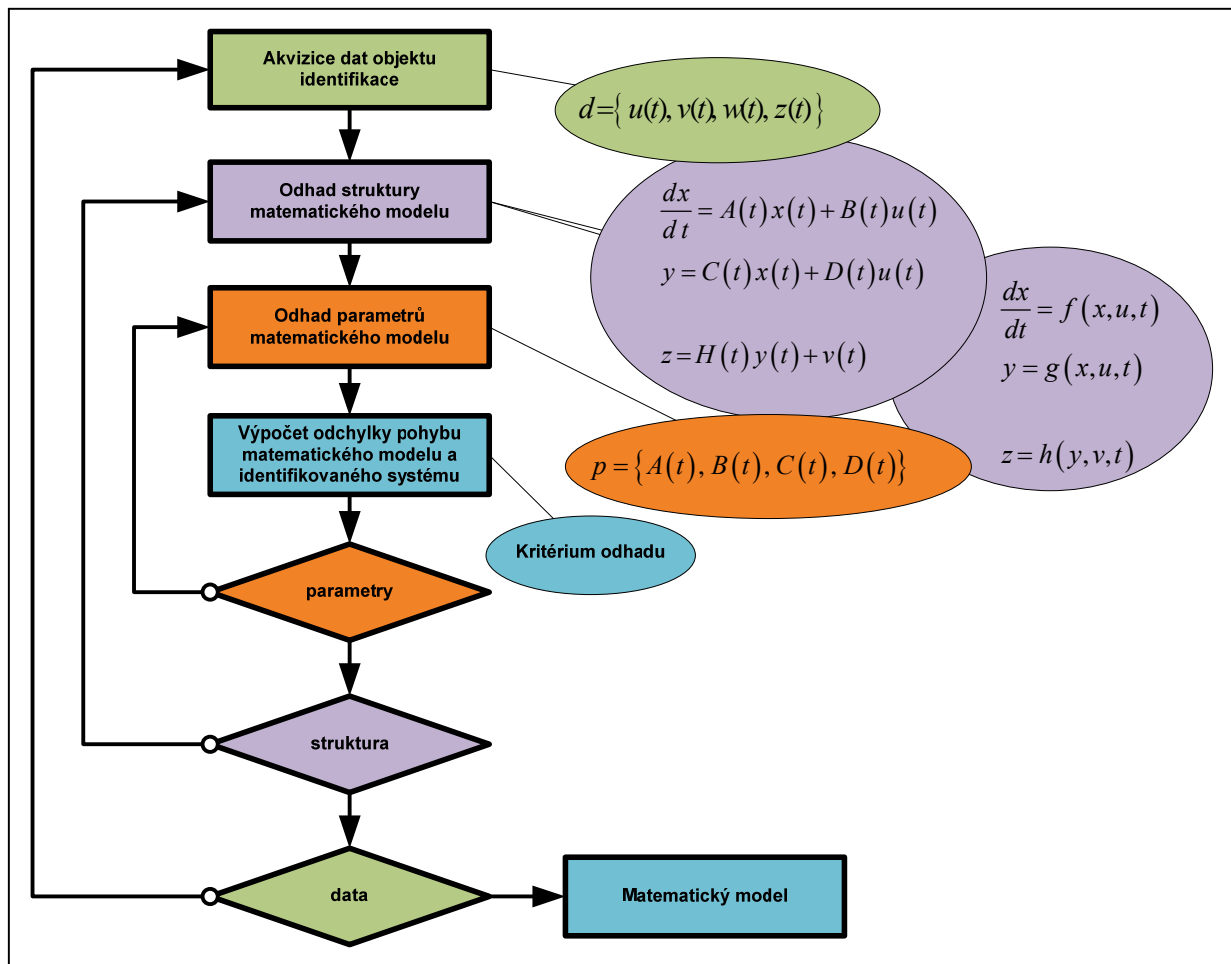
$z(t)$  je vektor výstupní veličiny z měřicího systému;

$v(t)$  je vektor chyby měření.

Z hlediska řešení úlohy identifikace rozlehlých systémů SCZT představuje způsob měření vážné potíže. Zdroje těchto potíží plynou z některých obecných vlastností systémů. Jde především o následující jevy

- dynamické vlastnosti měřicího systému;
- interakce měřicích systémů s okolím – mechanická, tepelná a elektromagnetická kompatibilita;

- nelinearita měřicího systému;
- historická závislost – měřicí systém se vyvíjí v čase.



Obr. 3. Proces identifikace (M.)

Druhým krokem je výběr struktury matematického modelu. Struktura matematického modelu je určena objektivními požadavky na identifikaci. Pokud má být výsledkem identifikace, jako součástí algoritmu řízení, pak struktura matematického modelu identifikovaného systému bude určena danou metodou řízení. Pokud má být použito některé z metod lineárního řízení, pak zřejmě struktura matematického modelu bude v podobě soustavy lineárních diferenciálních rovnic

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x(t) + B(t)u(t)$$

$$y = C(t)x(t) + D(t)u(t)$$

(2)

$$z = H(t)y(t) + v(t)$$

kde  $A(t)$  je matice dynamiky systému;

$B(t)$  je matice vstupu do systému;

$C(t)$  je matice výstupu do systému;

$D(t)$  je transformační matice vstupu na výstup;

$H(t)$  je matice měření;

$x(t)$  je vektor stavu identifikované soustavy;

$y(t)$  je vektor výstupu identifikované soustavy;

$u(t)$  je vektor vstupu identifikované soustavy;

$z(t)$  je vektor výstupní veličiny z měřicího systému;

$v(t)$  je vektor chyby měření.

Třetím krokem je vlastní odhad parametrů identifikovaného systému. Při identifikaci je cílem dosáhnout maximální shody mezi odhadem množiny parametrů  $\hat{p} = \{\hat{A}(t), \hat{B}(t), \hat{C}(t), \hat{D}(t)\}$  a skutečnou hodnotou parametru  $p = \{A(t), B(t), C(t), D(t)\}$ . Protože však rozdíl  $p - \hat{p}$  není přímo měřitelný, používají se různá kritéria, která vedou k definici algoritmů výpočtu odhadu množiny parametrů  $\hat{p}$ . Jsou to zejména

- metoda nejmenších čtverců,
- metoda maximální věrohodnosti,
- metoda maximální aposteriorní pravděpodobnosti.

Výběr metody identifikace je určen podobně jako v předchozím kroku objektivními požadavky na identifikaci, ale také kvalitou dat. Zde je nutné zohlednit vlastnosti měřicího systému (krok 1 identifikace) a také vlastní pohyb dynamické soustavy.

Vzhledem k uvedené problematice identifikace systémů v rozlehlých systému bylo přistoupeno k nepřímé metodě identifikace prostřednictvím fyzikálního modelování.

Bylo proto nutné vytvořit fyzikální modely typických prvků SCZT, kterými jsou :

- tepelný výměník;
- potrubí;
- prostor spotřebitele s radiátorem jako otopným tělesem.

## Fyzikální model výměníku tepla

Fyzikální model představuje zdroj pro výpočet parametrů matematického modelu komponent SCZT. Pro zjištění fyzikálního modelu výměníku tepla je potřebné nalézt řešení soustavy rovnic, které popisují proudění teplotního média a přenos tepla uvnitř tohoto média v prostoru a v čase.

### Rovnice přenosu tepla

$$\rho \cdot c_p \cdot \left( \frac{dT}{dt} + \text{grad}(T) \cdot \vec{V} \right) = -\text{div} \left( -\vec{k} \cdot \text{grad}(T) \right) + q_g \quad (3)$$

Fourier-Kirchhoffova rovnice (3), její jednotlivé členy reprezentují :

$T$ ... reprezentuje teplotní (skalární) pole,

$V$ ... reprezentuje rychlostní (vektorové) pole,

$\rho$ ... je hustota látky (např. teplotnosné medium nebo materiál stěny tepelného výměníku),

$q_g$ ... reprezentuje vnitřní zdroje ,

$c_p$ ... je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku,

$k$  ... je tepelná vodivost látky (obecně tenzor, jinak u homogenních látek skalár),

### Okrajové podmínky vedení tepla

Předpokládá se, že vnější plášť výměníku je ideálně izolovaný od okolí. T.j. platí skalární vztah

$$n^0 \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

Stěna oddělující primární a sekundární medium (obr.4.) vyhovuje podmínkám kontinuity vedení tepla. Tato podmínka odpovídá rovnici

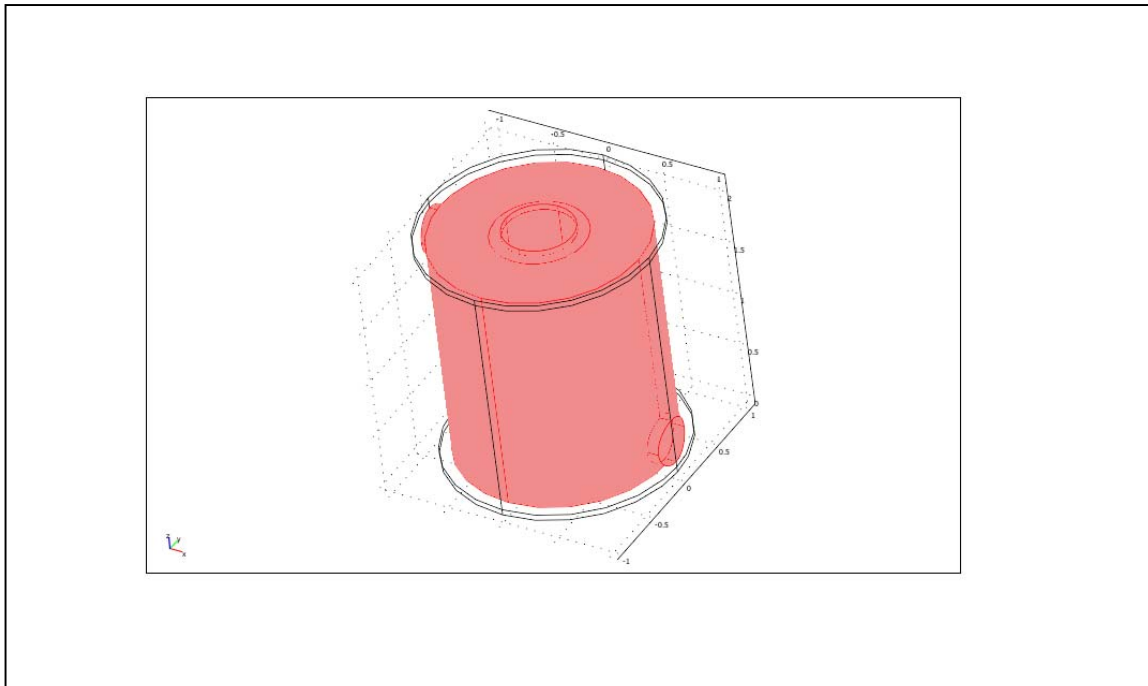
$$n_1^0 \left( k_x \frac{\partial T_1}{\partial x} + k_y \frac{\partial T_1}{\partial y} + k_z \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) - n_2^0 \left( k_x \frac{\partial T_2}{\partial x} + k_y \frac{\partial T_2}{\partial y} + k_z \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

Okrajové podmínky na vstupu primárního a sekundárního media jsou definovány

$$\begin{aligned} T(t, x, y, z) &= T_1 & T_1 &= 380,0 [K] \\ T(t, x, y, z) &= T_2 & T_2 &= 290,0 [K] \end{aligned} \quad (6)$$

Okrajové podmínky na výstupu primárního a sekundárního media odpovídají okamžité hodnotě tepelného toku v daném místě. To odpovídá rovnici

$$-n^0 \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0. \quad (7)$$



Obr. 4. Oddělení primárního a sekundárního média

### *Rovnice pro odhad proudového pole*

V procesu přenosu tepelné energie mezi primárním a sekundárním médiem v tepelném výměníku má dominantní vliv nucená konvekce. To zn., že je nutné k Fourier-Kirchhoffově rovnici (3) připojit rovnici spojitosti a rovnice popisující proudění teplosměnného média. V případě nízkorychlostních proudových polí je z ohledu na paměťovou kapacitu výpočetních prostředků přípustným kompromisem použití Navier-Stokesových rovnic ,

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \cdot \vec{V}) = 0 \quad (8)$$

... rovnice kontinuity (8),

$$\rho \cdot \left( \frac{d\vec{V}}{dt} + \text{grad}(\vec{V}) \cdot \vec{V} \right) = -\text{grad}(p) + \mu \cdot \nabla^2(\vec{V}) + \rho \cdot \vec{f}_0 \quad (9)$$

... Navier-Stokesovy rovnice (9, tuto vektorovou rovnici lze rozepsat na 3 skalární), kde  $\mu$  je dynamická viskozita teplosměnného média a vektor  $\rho \cdot \vec{f}_0$  reprezentuje objemový silový účinek (setrvačné síly a tíhová síla). Význam ostatních symbolů je stejný jako v případě (8).

### *Okrajové podmínky Navier- Stokesových rovnic*

Předpokládá se, že vnější plášť, primární a sekundární potrubí výměníku jsou dokonale těsné, teplosměnné médium nikde neuniká, tj. jeho hmotnostní tok mezi vstupem a výstupem je neměnný.

Okrajové podmínky na vstupu primárního a sekundárního média jsou definovány konstantními rychlostmi proudění tekutiny



$$\begin{aligned}
 u(t, x, y, z) &= u_1 & u_1 &= 1,0 \left[ m s^{-1} \right] \\
 u(t, x, y, z) &= u_2 & u_2 &= 2,0 \left[ m s^{-1} \right]
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

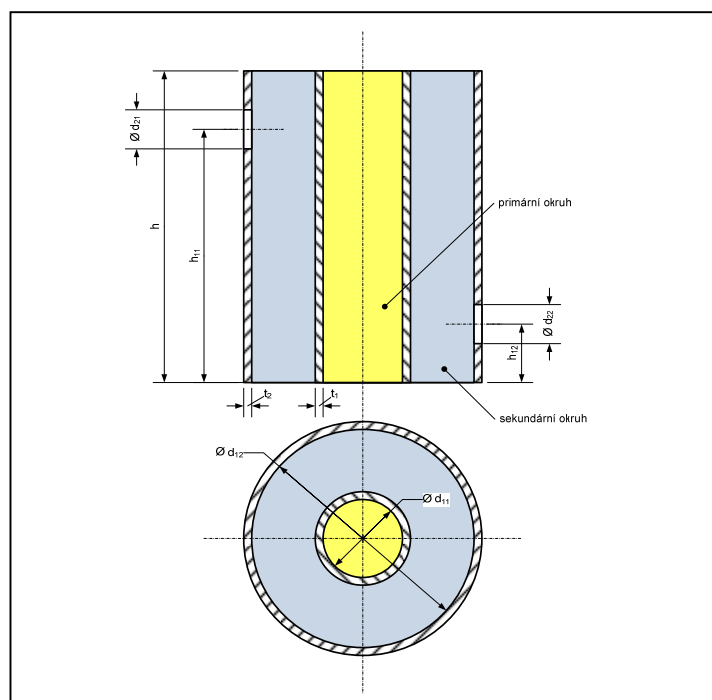
Okrajové podmínky na výstupu primárního a sekundárního media odpovídají podmínkám při konstantním tlaku při nulovém viskozním napětí tj.

$$\begin{aligned}
 p(t, x, y, z) &= p_1 & p_1 &= 2,1 \left[ MPa \right] \\
 p(t, x, y, z) &= p_2 & p_2 &= 1,0 \left[ MPa \right]
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Předmětem řešení je jednoduchý trubkový výměník (obr. 4.).

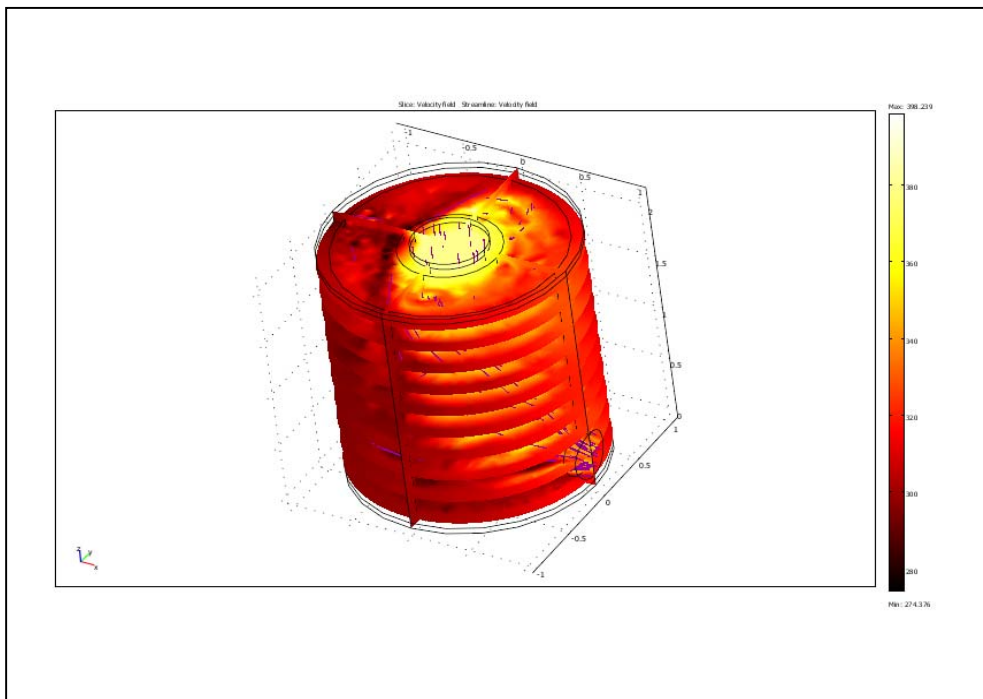
Tab. 1. Rozměry trubkového výměníku

Výška	$h$ [ m ]	2.0
Vnitřní poloměr primární části	$d_{11}$ [ m ]	0.3
Vnější poloměr sekundární části	$d_{12}$ [ m ]	0.95
Výška vstupu do sekundární části	$h_{11}$ [ m ]	0.7
Výška výstupu do sekundární části	$h_{12}$ [ m ]	0.3
Průměr vstupu - výstupu do sekundární části	$d_{12} - d_{22}$ [ m ]	0.2
Tloušťka obalu (sekundární části)	$t_2$ [ m ]	0.05
Tloušťka primární trubky	$t_1$ [ m ]	0.05

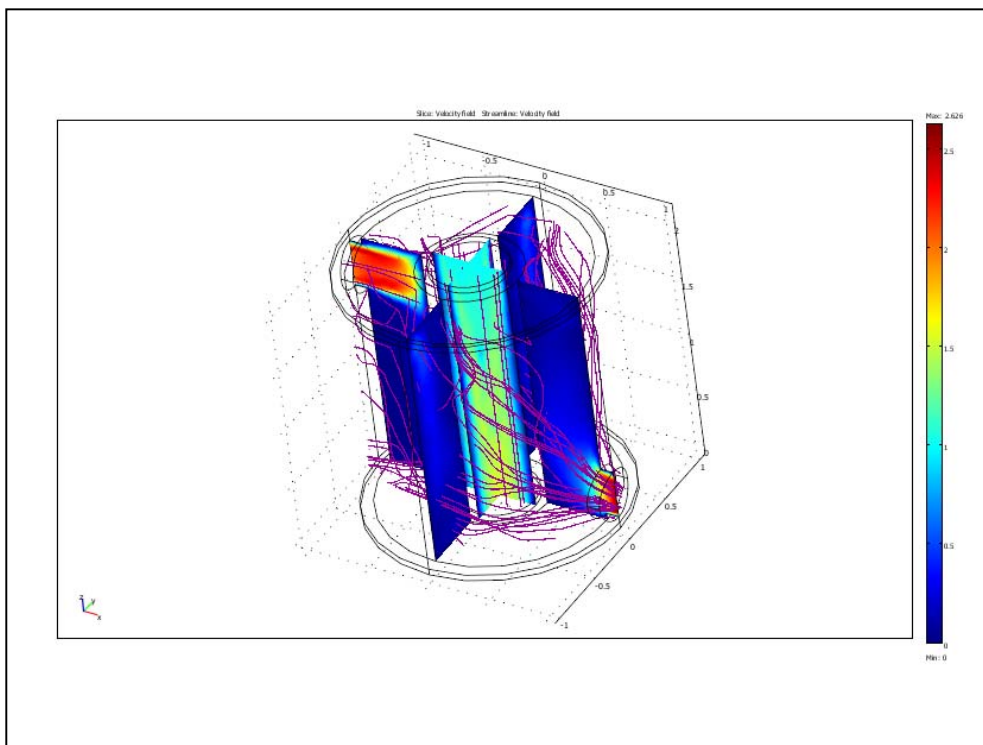


Obr. 5. Geometrie trubkového průtokového výměníku

Řešení soustavy rovnic (3) a (8) při definovaných okrajových podmínkách (4) až (7) a (9) až (11) pro rozložení teploty v čase a prostoru je uvedeno na obr. 6. Rozložení rychlostního pole je pak na obr 7.

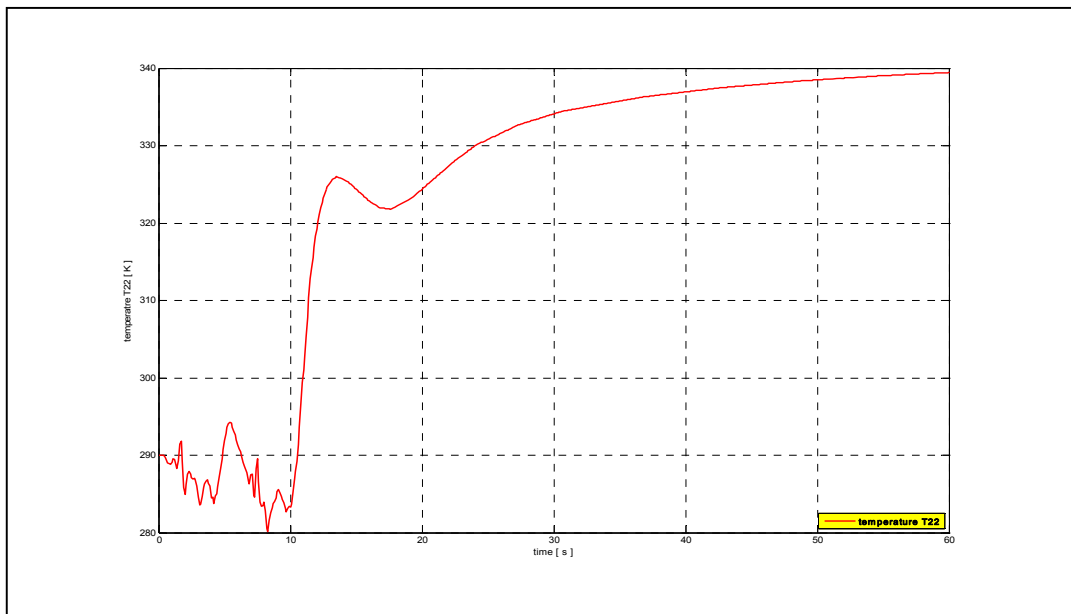


Obr. 6. Rozložení teplot

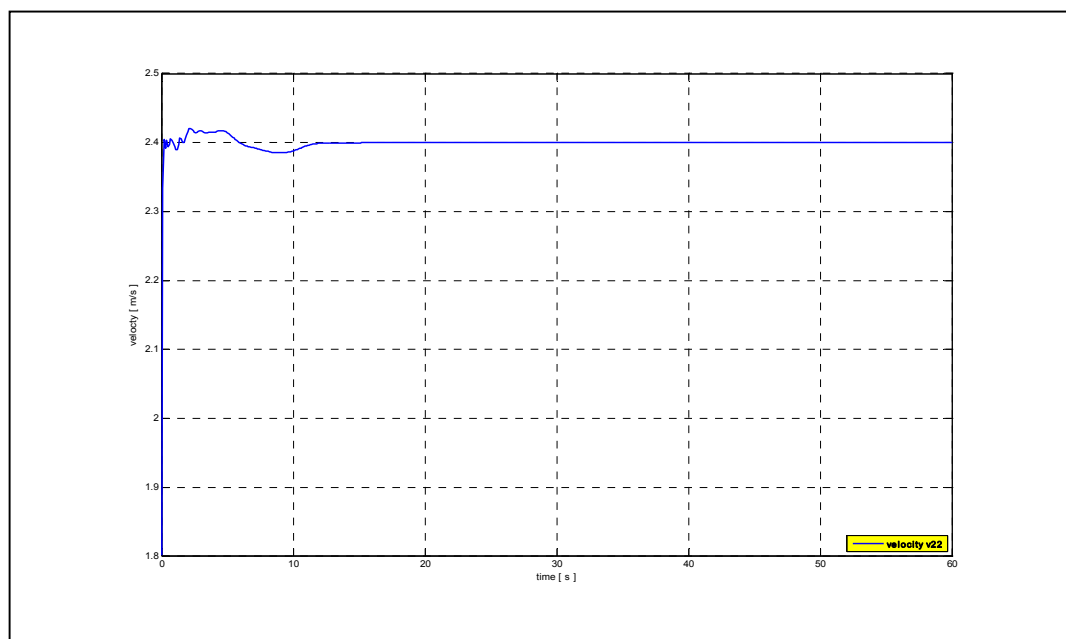


Obr. 7. Rozložení rychlosti

Průběhy fyzikálních veličin teploty a rychlosti na výstupu sekundárního okruhu jsou uvedeny na obr. 8 a obr. 9.



Obr. 8. Časový průběh teploty na výstupu sekundárního okruhu



Obr. 9. Časový průběh rychlosti média na výstupu sekundárního okruhu

## Fyzikální model vytápěné místnosti

Další ukázkou systémové aproximace problému popsaného soustavou parciálních diferenciálních rovnic (viz popis výše) je proces změny teploty ve vytápěné výstnosti při změně teploty v otopném tělese – viz. obr. 10. Jedná se o schematický model jedné místnosti 6m x 4m x 2,7m (např. garsoniéra) v rozlehlém bytovém domě, která je vybavena otopným tělesem s vodou jako teplonosným médiem (klasický plechový radiator). Místnost je vybavena jedním oknem ( s vzduchovou mezerou mezi skly). Součástí modelu je také prostor za oknem reprezentující okolní prostředí – proudící vzduch.

### *Okrajové podmínky*

Stěny místností včetně podlahy a stropu (mimo čelní zeď s oknem) mají zadanou konstantní teplotu 12[°C].

Okolní vzduch je modelován jako homogenní proud o rychlosti 0,5 [m/s] a teplotě -5[°C].

Mezi okolním vzduchem a zdí je vrstva 10 [cm] tepelné izolace.

Radiátor je modelován jako dutá plechová deska o tloušťce 10 [cm]. Voda je do radiátoru přiváděna/odváděna trubkou o průměru 2 [cm]. Voda protéká otopným tělesem konstantním průtokem 0,4 [m/s]. Teplota vody na vstupu je na počátku 60[°C], pak skokově poklesne o 20[°C].

Matematický zápis některých z těchto okrajových podmínek je v Comsolu reprezentován prostřednictvím stejných výrazů jako v případě (5), (7).

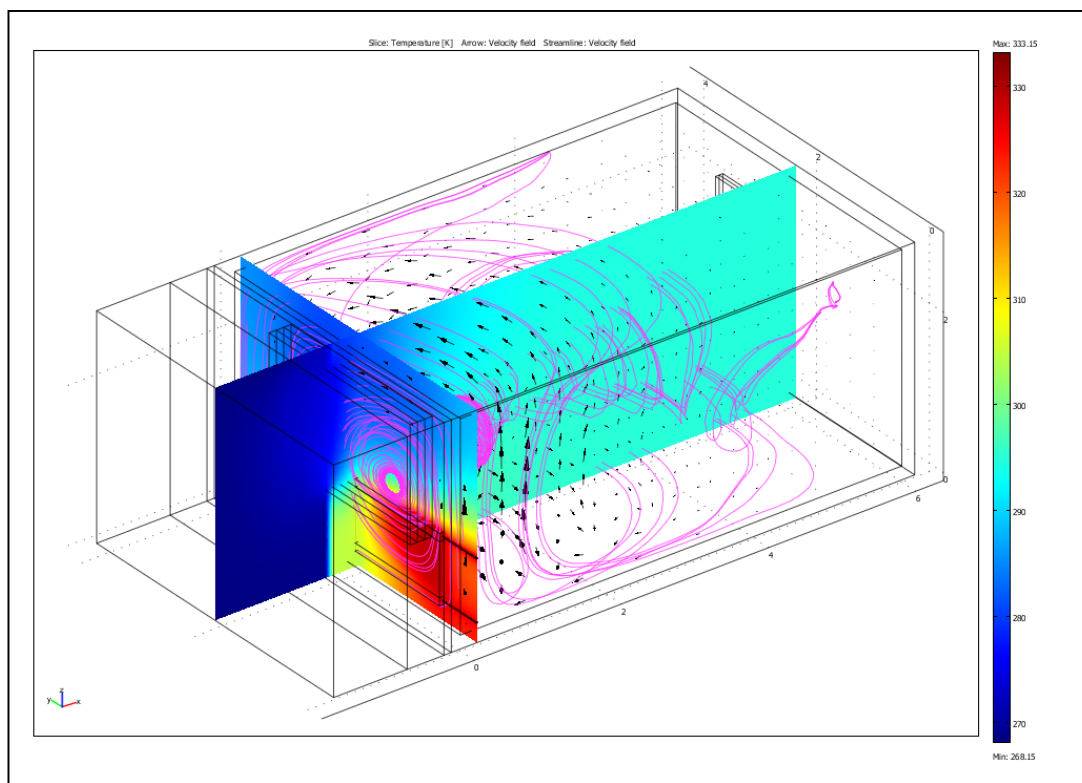
### *Vypočtená data*

Teplota vzduchu ve vybraném bodě uvnitř vytápěného prostoru (přibližně v jeho geometrickém středu) na pokles teploty vody na vstupu radiátoru reaguje rovněž poklesem, viz obr. 11. Na obr 12 je vykreslen časový průběh systémové aproximace časového průběhu teploty vzduchu ve vybraném bodě pomocí lineárního stavově prostorového modelu :

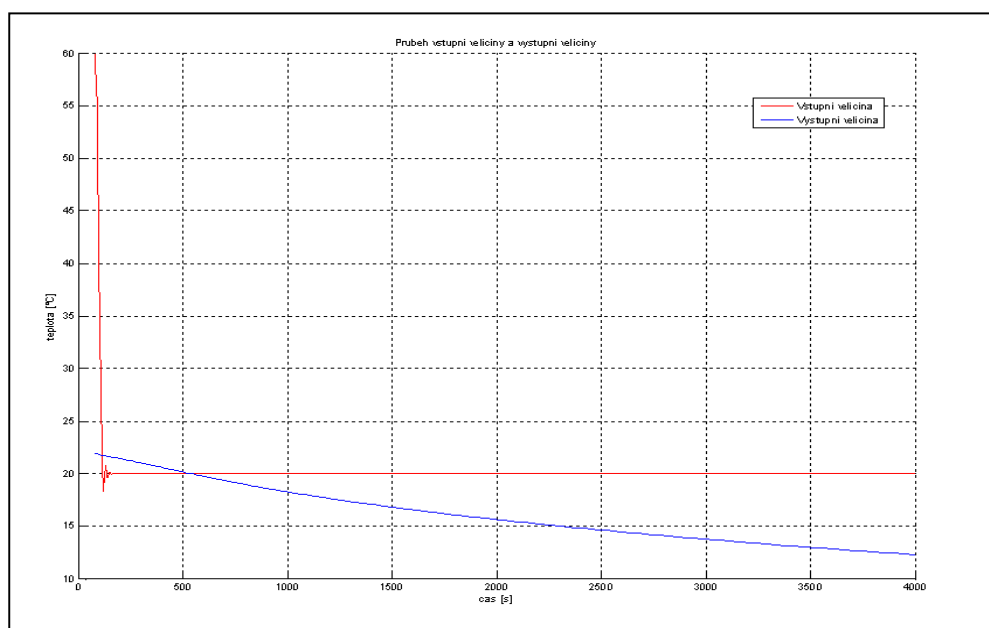
$$\begin{aligned}\dot{x} &= -0,0002911 \cdot x - 0,0004794 \cdot u \\ y &= -23,27 \cdot x\end{aligned}$$

s vlastním číslem  $\lambda = -0,0002911$ .

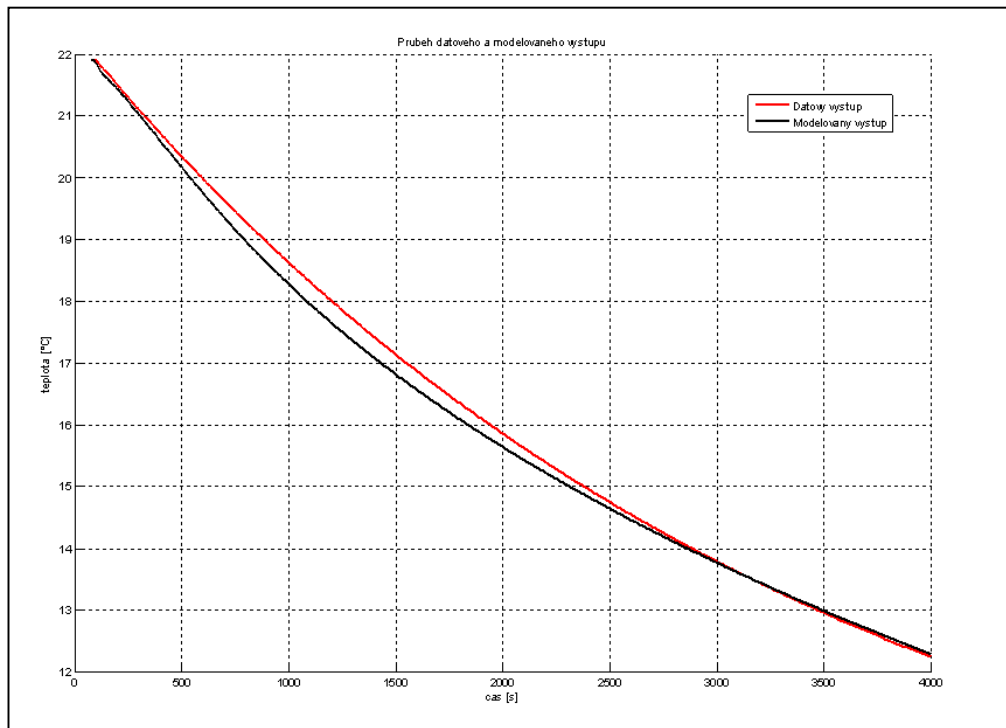




Obr. 10 : Vytápěná místnost , teplotní pole – dva navzájem kolmé barevné řezy, rychlostní pole je zvyditelněno pomocí proudnic a šipek. Za pozornost stojí vír, který vznikl v těsné blízkosti otopného tělesa.



Obr. 11 : Časový průběh vstupní a výstupní veličiny.



Obr. 12 : Systémová aproximace výstupní veličiny – lineární model.

## Literatura

- [1.] SAZIMA – KMONÍČEK - SCHNELLER : Teplo, 1989, SNTL.
- [2.] RÉDR - PŘÍHODA : Základy tepelné techniky, 1991, SNTL.
- [3.] HLOUŠEK : Termomechanika, VUT, 1992.
- [4.] KALČÍK : Technická termodynamika, ČSAV, 1963.
- [5.] F. ŠUBART : Základy sdílení tepla a přenosu hmoty, VAAZ, 1964.
- [6.] J. VRBA : Tepelné tabulky a diagramy v soustavě SI, VAAZ, 1975.
- [7.] J. ŠESTÁK – F.RIEGER : Přenos hybnosti tepla a hmoty, ČVUT, 2000.

Článek byl vypracován na základě výsledků dosažených z grantového projektu 2C06007 MSMT