

Úlohy z termiky pro fyzikální olympioniky (3)

PAVEL KABRHEL – IVO VOLF

ÚK FO, Univerzita Hradec Králové

Výuka fyziky je důležitá především proto, že představuje společně s matematikou teoretický základ techniky. Druhým úkolem je podílet se na vytváření modelového pohledu na jevy, jež jsou obsahem většiny přírodovědných předmětů, a přispět tak k uvědomělému chápání světa kolem nás. Neměli bychom také zapomínat na další, velmi důležitý zřetel, a to na výchovu k pochopení celkového kulturního dědictví minulých generací. Pomineme-li skutečnost, že oheň a tepelná úprava potravy umožnila již v pravěku lidem lepší výživu, fyzikální základy termiky začaly podstatně ovlivňovat rozvoj technických postupů a zařízení zejména od konce 18. století, kdy byl zdokonalen parní stroj. Tato skutečnost měla za následek zařazení tohoto vynálezu do výroby, do značné míry předznačila změnu manufaktur na průmyslové podniky, což ovlivnilo nejen výrobní sféru, ale také následné období dějin, nazvané jako první průmyslová revoluce.

Pojem tepla se však postupně upřesňoval – zatímco fyzikům konce 18. století, ale dokonce i *Sadi Carnotovi* (1796–1832) stačilo chápání tepla jako fluida (mimočodem, teplo přijaté a teplo odevzdané nepracuje s tímto pojmem jinak a směšovací kalorimetrická rovnice taktéž), pokusy na začátku a zejména v polovině 19. století vedly k názoru, že existuje vztah mezi vykonanou prací a „využitým“ teplem, později mezi teplem a vnitřní energií určité soustavy částic (ideální, případně reálný plyn). Ještě v 60. letech minulého století byla do výuky fyziky na střední škole zařazena laboratorní práce, během níž žáci na základě měření vykonané práce a tepla, nutného k zahřátí vody v kalorimetru, vypočítávali tzv. mechanický ekvivalent tepla a tepelný ekvivalent práce, prakticky přepočít jednotky tepla kilokalorie na jednotku práce joule a naopak

Historická odbočka nebude žákům ani učitelům určitě na škodu – co je to teplo, to je velmi obtížné přesně vymezit, zatímco řešit problémy termiky bez pojmu teplo vůbec nedovedeme. Na základě experimentů dospěl

např. německý fyzik žijící v Rusku *Georg Wilhelm Richman* (1711–1753) ke kalorimetrické rovnici pro výpočet výsledné teploty při smíchání teplé a studené vody (teplá voda předala teplo studené vodě). Richman se nakonec stal obětí výzkumu atmosférické elektřiny. Další významnou osobností byl skotský fyzik a chemik *Joseph Black* (1728–1799), který zavedl pojem latentní teplo a specifické teplo (dnes správněji měrná tepelná kapacita) a jako chemik zkoumal vlastnosti oxidu uhličitého. Výsledkem bylo zavedení kalorimetrické rovnice v tom tvaru, jak se o ní vyučuje v 8. ročníku základního vzdělávání. Termika 18. a 19. století dospívala na základě zobečňování k teoretickým závěrům, které vyvrcholily termodynamickými zákony, tedy jakýmsi principy, na nichž byla dále budována, a na druhé straně přinesla mnoho námětů pro praktické použití. Budeme-li hledat možnosti, které vedou k využití pojmů teplo a teplota, pak můžeme ukázat, že „fyzika je skutečně kolem nás“.

Co považujeme za šíření tepla

Zdroj tepla je místo, případně zařízení, kde probíhají děje, jež spojujeme se „vznikem“ tepla. To je zpravidla doprovázeno skutečností, že zdroj tepla má vyšší teplotu než jeho okolí, a tak dochází k „šíření tepla“ do míst, jejichž teplota je nižší. O tepelných zdrojích víme, že jsou přirozené (např. Slunce, nitro Země, sopky aj.) nebo umělé (oheň v krbu, elektrická kulma na vlasy nebo radiátor ústředního či etážového topení). Teplo se může šířit vedením pevnou látkou (přes kovový obal radiátoru), prouděním média (vzduchu nebo vody) nebo ve formě elektromagnetického záření. V termodynamice můžeme najít jednoduché zákonitosti pro šíření tepla vedením, případně radiací. U šíření teplé látky (média) jde většinou o turbulentní proudění, k čemuž jednoduché vztahy nemáme, a proto se ve školním prostředí raději vyhneme kvantitativním vztahům a děje popisujeme (a částečně i vysvětlujeme) kvalitativně. „Výroba“, přenos a „spotřeba“ tepla patří k lidské civilizaci, a proto bychom těmto aktivitám měli věnovat přiměřený čas. V učebnicích fyziky pro gymnázia, jež vznikaly v 80. letech minulého století, je věnován problematice šíření tepla jen krátký článek [1]. Také v Přehledu středoškolské fyziky [2] je přenosu tepla vymezen prostor asi 2 strany.

Teplo může vznikat při hoření paliva (např. pevná paliva – uhlí, kapalná paliva – benzín, plynná paliva – zemní plyn, propan-butan). Každé palivo je charakterizováno výhřevností, případně spalným teplem. Pro uhlí se zavádí tzv. měrné palivo s výhřevností 7 000 kcal/kg, tedy v soustavě SI

jde o hodnotu 29,3 MJ/kg, různé formy spalování pak ovlivňují větší, či menší efektivnost získání tepla, vyjádřenou účinností spalovacího zařízení. Tepla můžeme však získat i pomocí elektrických zářičů nebo ohřivačů.

Problém 1: Kolik tepla získáme dokonalým spálením benzínu?

Každý řidič sleduje spotřebu benzínu v motoru svého automobilu; automobily vyšších cenových skupin mají svůj počítač, který řidiči sděluje, jaká je okamžitá a jaká předpokládaná spotřeba během jízdy. Při hoření benzínu ve válci motoru vzniká teplo, projevující se zvýšením teploty a tlaku plynu, který vytváří podmínky pro vznik síly, kterou plyn působí na píst a zahajuje tak možnosti využití pohybové síly, nutné pro pohyb automobilu.

Poznámky k vytvoření modelové situace. Výhřevnost benzínu najdeme ve fyzikálních nebo technických tabulkách. K výpočtu postačí střední údaj, který je dán hodnotou 46,4 MJ/kg [3]. Zdroj [3] nám poskytne mnoho technických zajímavostí o benzínu a naftě.

Řešení. Protože spotřeba benzínu se udává v litrech, využijeme vztahu $\rho = m/V$, kde hustota benzínu je 0,71 kg/dm³ až 0,77 kg/dm³; můžeme pracovat se střední hodnotou 0,74 kg/dm³. Potom nám vychází střední hodnota výhřevnosti benzínu 34,3 MJ/litr. Při běžné jízdě automobilu po silnici stálou rychlostí 90 km/h s uvážením, že motor automobilu musí zajistit překonání odporových sil proti pohybu asi 600 N na trase 10 km a účinnost motoru a přenosu síly i pohybu odhadneme na 22 %, potom nám vychází vykonaná práce $W = Fs$, tedy 6,0 MJ, potřebné teplo $6,0/0,22 \text{ MJ} \doteq 27 \text{ MJ}$ a spotřeba necelých 0,8 litru/10 km, přepočteme na 8 litrů/100 km.

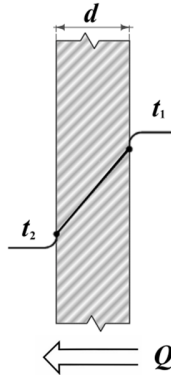
Vedení tepla pevnou stěnou

Nejjednodušší vztahy použijeme při průchodu tepla homogenní deskou všude stejné tloušťky d , plošného obsahu S , na jejichž stěnách je prostředí o teplotě t_1 , t_2 ; teplo prochází napříč deskou po dobu τ . Deska může být vyrobena z různého materiálu – některé desky vystupují jako dobré vodiče, jiné jako izolanty, což vyjádříme součinitelem tepelné vodivosti λ .

Empirický vzorec pro ustálené vedení tepla deskou je

$$Q = \frac{\lambda S \tau \Delta t}{d}. \quad (1)$$

Takto bychom mohli řešit problémy spojené s neomítnutou cihlovou stěnou.



Obr. 1. Průchod tepla z jednoho prostředí do druhého homogenní deskou

Problém 2: Kolik tepla je třeba k udržení stálé teploty v místnosti?

Předpokládejme, že se rodina musela nastěhovat na zimu do ještě nedokončeného rodinného domku. Jaký je denní únik tepla z rohové místnosti stěnami o rozměrech: délka stěn je 5,0 m a 6,0 m, výška místnosti 2,7 m. Předpokládejme stálou venkovní teplotu 5,0 °C, požadovanou stálou teplotu v místnosti 20 °C. Jaký tepelný výkon musí mít lokálně umístěný elektrický ohřívač?

Poznámky k vytvoření modelové situace. K údajům musíme ještě dodat tloušťku zdi 30 cm a součinitel tepelné vodivosti cihel (maltu mezi cihlami považujeme za materiál skoro stejných tepelných vlastností) $\lambda = (0,7 \text{ až } 1,3) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, což nacházíme například ve [4], samozřejmě součinitel tepelné vodivosti některých stavebních materiálů, například pórobetonových tvárnic, je mnohem menší. Předpokládáme dále, že zbylé stěny, strop a podlaha mají z obou stran prostředí se stejnou teplotou, takže k úniku tepla nedochází. Při prvotním odhadu úniku tepla nebudeme uvažovat s oknem.

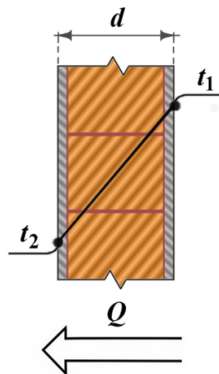
Řešení. Dosadíme do výše uvedeného vztahu (1) údaje: $S = 29,7 \text{ m}^2$, $d = 0,30 \text{ m}$, rozdíl teplot $\Delta t = 15 \text{ K}$, doba úniku tepla $\tau = 24,0 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$ a $\lambda = (0,7 \text{ až } 1,3) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Dosadíme nejprve dolní a potom horní mez, takže únik tepla představuje necelých 90 MJ až skoro 170 MJ. Tepelný výkon elektrického nebo plynového přímotopu musí být 1 000 W

až 2 000 W, což není daleko od hodnoty, kterou bychom byli schopni třeba i odhadnout.

Problém 3: Jak zlepšit tepelnou izolaci stěn?

Neomítnutá stěna (zvenku i zevnitř) nevzbuzuje estetický dojem a také špatně brání únikům tepla z místnosti. Proto ji do příští zimy opatříme omítkou. Stanovte, jak se změní průchod tepla stěnou.

Poznámky k vytvoření modelové situace. Pro zjednodušení budeme předpokládat, že tloušťka omítky zevnitř i zvenku bude stejná 1,5 cm, součinitel tepelné vodivosti omítky je 0,10 W/(m · K) a další údaje ponecháme z minulého problému. Rozdíl teplot bude dán stálou venkovní teplotou 5,0 °C a požadovanou vnitřní teplotou 20 °C, teplotní rozdíl je tedy 15 °C. Vedení tepla budeme považovat za ustálené, takže platí výše uvedený vztah (1) pro každou vrstvu, kterou teplo prochází.



Obr. 2. Průchod tepla z jednoho prostředí do druhého omítnutou stěnou

Řešení. Označíme vyšší teplotu uvnitř t_1 , nižší teplotu venku t_2 a na rozhraní omítky a zdi jsou teploty t'_1 a t'_2 . Při ustáleném vedení tepla je výraz $Q/S\tau$ roven hustotě tepelného toku, kterou lze označit q a vyjádříme ji v jednotkách W/m². Poté $q = \lambda\Delta t/d$. Pro ustálenou hustotu tepelného toku je $q = \text{konst.}$, odtud určíme jednotlivé rozdíly teplot $\Delta t = qd/\lambda$ pro všechny tři vrstvy — vnitřní omítku, cihlovou stěnu a vnější omítku, které brání úniku tepla. Zjistíme, že celkový teplotní rozdíl lze potom vyjádřit $\Delta t = q(d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + d_3/\lambda_3)$, ale protože vnější a vnitřní omítky jsou stejné, jsou parametry první a třetí vrstvy stejné. Pro hustotu tepelného

toku potom platí

$$q = \frac{\Delta t}{2\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}}. \quad (2)$$

Následně pro únik tepla platí

$$Q = S\tau q = s\tau \frac{\Delta t}{2\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}}. \quad (3)$$

Dosadíme dané a vyhledané hodnoty a určíme denní únik tepla v námi sledované místnosti; pro srovnání s předchozím případem zjišťujeme, že únik tepla během 24 hodin se zmenšil na hodnotu 50 MJ až 80 MJ.

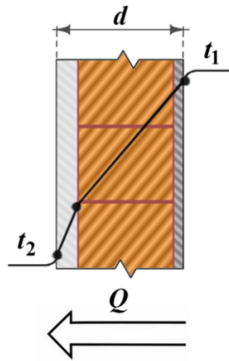
Problém 4: Zateplování rodinných domků

Snižování úniku tepla se projeví menší spotřebou dodávek tepla (v rámci lokálního topení menší spotřebou paliva), a s tím se snižuje i úhrada za dodané teplo, kterou fakturují teplárny či elektrárny (snížení výdajů domácnosti). Jedním ze způsobů je zateplení pomocí polystyrénových desek, které se nalepí na vnější stěny a jejich povrch se esteticky upraví. Jak se změní únik tepla v tomto případě?

Poznámky k vytvoření modelové situace. Protože se jedná o stejnou situaci, ponecháme údaje $S = 29,7 \text{ m}^2$, $d = 0,30 \text{ m}$, rozdíl teplot $\Delta t = 15 \text{ K}$, a doba úniku tepla $\tau = 24,0 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$. Polystyrén je tepelný izolant, takže součinitel tepelné vodivosti bude nižší, tedy $\lambda = 0,038 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, ale tloušťka desky je jen 4,0 cm. Tloušťka vnitřní omítky je 1,5 cm a $\lambda = 0,10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Opět budeme uvažovat tři vrstvy (omítku, zeď a polystyrén, povrchovou úpravu polystyrénu zanedbáme), celkový teplotní rozdíl se bude vytvářet v jednotlivých vrstvách, kdy budeme opět předpokládat stálou hustotu tepelného toku.

Řešení. Vyjdeme z výše odvozených vztahů pro průchod tepla několika vrstvami, avšak musíme změnit údaje podle vstupních informací. Pro zapamatování si uvědomíme analogii: Rozdíl teplot odpovídá rozdílu elektrických potenciálů v elektrickém obvodu, procházející teplo odpovídá elektrickému proudu a zbylá část ve vzorci připomíná elektrický odpor; lze tedy provést analogii mezi zákonitostmi pro vedení tepla i vedení elektrického náboje. Tři vrstvy připomínají sériové zapojení tří rezistorů.

Po dosazení získáváme pro denní hodnotu úniku tepla dvěma stěnami necelých 24 MJ až 27 MJ, což ve srovnání s původními neomítnutými stěnami představuje značnou úsporu.



Obr. 3. Průchod tepla z jednoho prostředí do druhého omítnutou a zateplenou stěnou

Problém 5: Proč je stěna vnější zdi v pokoji chladnější než vzduch v místnosti?

Když v teplé místnosti položíme ruku na venkovní stěnu, zdá se být chladnější, než je teplota vzduchu v místnosti; zvenku pak pozorujeme rozdíl opačný – teplota stěny je vyšší. To se vysvětluje tak, že těsně u svislé stěny proudí slabá vrstvička vzduchu (nahoru nebo dolů) a protože vzduch je dobrý izolant, je tepelný odpor této vrstvičky značný a podílí se na odporu proti přestupu tepla. Odhadněte, jak tato skutečnost ovlivňuje přestup tepla z místnosti směrem ven.

Poznámky k vytvoření modelové situace. Úlohu doplníme o další zpřesnění, tak se nám náš model stává sice složitější, ale lépe vyjadřuje realitu. K předchozím výpočtům musíme přidat vztah pro přestup tepla z ovzduší do stěny, $Q = \alpha S \tau \Delta t$, kde α je součinitel přestupu tepla ze vzduchu do stěny, respektive ze stěny naopak do vzduchu.

Řešení.

$$q = \alpha_1(t_1 - t'_1) = \frac{\lambda}{\delta}(t'_1 - t'_2) = \alpha(t'_2 - t_2), \quad (4)$$

kde δ je šířka stěny.

Tyto rovnice (4) je možné upravit do tvaru

$$t_1 - t'_1 = \frac{q}{\alpha_1} \quad (5)$$

$$t'_1 - t'_2 = \frac{q\delta}{\lambda} \quad (6)$$

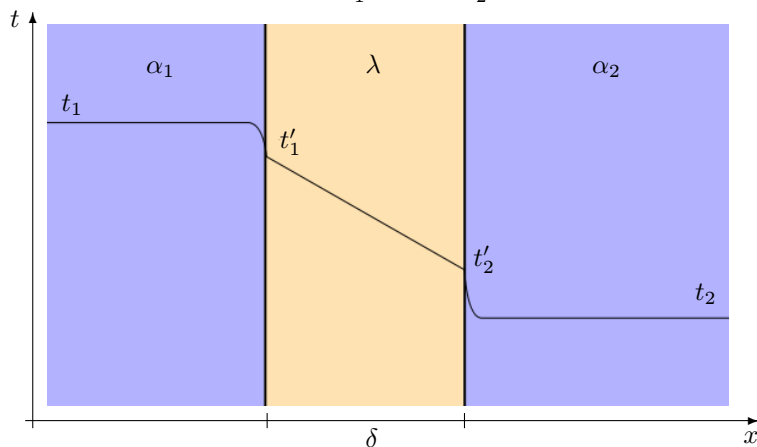
$$t'_2 - t_2 = \frac{q}{\alpha_2} \quad (7)$$

Sečtením rovnic (5), (6) a (7) dostaneme

$$t_1 - t_2 = q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = \frac{q}{k},$$

kde k představuje celkovou tepelnou vodivost, respektive koeficient (součinitel) pronikání (přechodu) tepla, pro nějž platí

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}.$$



Obr. 4. Průchod tepla stěnou [5]

Vezmeme v úvahu všechny nám známé údaje, které jsme použili při řešení minulých problémů a doplníme ještě o součinitel přestupu tepla ze vzduchu do stěny nebo ze stěny naopak do vzduchu. Můžeme pro oba případy uvažovat $\alpha = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [7, 8, 9, 10]. Vypočteme součinitel přechodu tepla pro zateplenou stěnu, $k = (0,58 \text{ až } 0,65) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, Pro denní únik tepla vychází hodnoty 22 MJ až 25 MJ.

Problém 6: Jak je to v místnosti s jednoduchým oknem?

Místnost bez oken se možná hodí pro vytvoření školní laboratoře pro pokusy v optice, ale není to tak obvyklé. Proto opatříme místnost alespoň jedním oknem o rozměrech: šířka 2,0 m, výška 1,5 m. Pevný rám dokonale utěsníme a do něj umístíme jedno sklo o tloušťce 2 mm a rozměrech 1,90 m a 1,40 m, tedy o obsahu 2,66 m². Odhadněte, jak se změní únik tepla oproti situaci, kdy v daném prostoru byla omítnutá zeď.

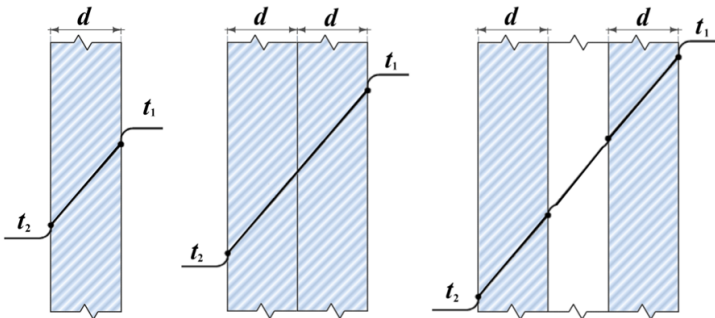
Poznámky k vytvoření modelové situace. Úlohu doplníme o další zpřesnění. Součinitel tepelné vodivosti pro okenní sklo je $\lambda = (0,6 \text{ až } 1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$, součinitel přestupu tepla ze vzduchu do skla a opačně můžeme opět uvažovat $\alpha = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Řešení. Porovnáme součinitel přechodu tepla $k = (0,58 \text{ až } 0,65) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ pro případ zateplené cihlové stěny téhož obsahu jako je sklo se součinitel přechodu tepla jednoduchého skla $k' = (9,7 \text{ až } 9,8) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Pro denní únik tepla stěnou vychází hodnoty 2,0 MJ až 2,2 MJ, pro sklo 33 MJ.

Problém 7: Je dvojité sklo pro únik tepla lepší než jednoduché?

Dvojité sklo je vzhledem k úniku tepla oknem výhodnější, neboť představuje zvýšení odporu proti průchodu tepla z teplejší místnosti směrem ven z domu. Přesvědčíme se o tom výpočtem, když místo tloušťky d dosadíme do vztahu pro teplo hodnotu $2d$. Je tento přístup ke stanovení úniku tepla správný?

Poznámky k vytvoření modelové situace. Pro vytvoření správné modelové situace nakreslíme vhodný náčrtek (průchod tepla jedním sklem, dvěma skly položenými přímo na sebe, dvěma skly se vzduchovou mezerou).



Obr. 5. Průchod tepla z jednoho prostředí do druhého oknem

Řešení. Uvážíme-li přestup tepla v případě dvojitého skla se vzduchovou mezerou, přibude nejen sklo, ale také přestup ze skla do vzduchu a ze vzduchu do skla. Prostor mezi oběma skly je v případě dvojitých oken užívaných v novostavbách nebo rekonstrukcích určitým uzavřeným prostorem, v němž pobíhá v zimě přenos tepla z vnitřku budovy ven a v létě naopak zvenčí do místnosti. To je možno pozorovat při mytí staršího rozšroubovaného okna na jaře nebo na podzim, když sledujeme, které ze skel je uvnitř zaprášené. Technicky lze účinek zvýšit, když se sníží tlak (i hustota) vzduchu v prostoru mezi skly.

Problematika vedení tepla se v podstatě týká nás všech – buď v rámci tepelné pohody nebo při kontrole stavu financí v peněženke či na bankovním účtu. Na tomto případě lze žákům názorně ukázat, že teoretické poznatky mají přímý odraz v životě a fyzika je vskutku všude kolem nás. Zaujala-li vás daná problematika, můžete se s ní podrobněji seznámit na stránkách Fyzikální olympiády [7, 11].

Literatura

- [1] *Svoboda, E.*: Fyzika pro II. ročník gymnázií. 1. vyd., SPN, Praha, 1985.
- [2] *Svoboda, E.*: Přehled středoškolské fyziky. 3. vyd., Prometheus, Praha, 1998.
- [3] Benzín. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Benz%C3%ADn#Energetick.C3.BD_obsah...28v.C3.BDh.C5.99evnost.29
- [4] Tepelná ochrana. VAPIS stavební hmoty. [online]. Dostupné z: <http://www.vapis-sh.cz/pro-projektanty/stavebne-fyzikalni-vlastnosti/tepelna-ochrana-akumulace/soucinitel-tepelne-vodivosti/soucinitel-tepelne-vodivosti.html>
- [5] Prostup tepla.svg. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Prostup-tepla.svg>
- [6] Stavební konstrukce – tepelný odpor a součinitel prostupu tepla, teorie. EkoWATT [online]. 2011. Dostupné z: <http://ekowatt.cz/uspory/ztratyshtml>
- [7] Přenos tepla. Fyzikální olympiáda. [online]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [8] Heat Transfer Coefficient. Thermopedia. [online]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/841/>
- [9] Wärmeübergangskoeffizient. Formel-sammlung.de [online]. 2004. Dostupné z: http://www.formel-sammlung.de/physik/wertetabellen/waermeleitfaehigkeit_waermeuebergangs_waermedurchgangskoeffizient.htm
- [10] Wärmeübergangskoeffizienten. Schweizer-fn.de [online]. Dostupné z: http://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/wuebergang_gase.php
- [11] Studijní texty. Fyzikální olympiáda [online]. 2002–2014. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada>