Přenos tepla

55. PŘENOS TEPLA VEDENÍM A PROUDĚNÍM

55,0 **Způsoby přenosu tepla** rozlišujeme podle fyzikální podstaty dějů, jimiž jsou realizovány. V podstatě existují tři druhy přenosu tepla, a to *vedením v látkách* neboli *kondukcí*, *prouděním látek* čili *konvekcí* a posléze *zářením*, tj. *radiací*.

Přenos tepla vedením probíhá ve spojitém látkovém prostředí. Molekuly či jiné stavební částice látky si navzájem předávají kinetickou energii neuspořádaných tepelných pohybů, která se tím přenáší z míst vyšší teploty do míst o nižší teplotě látky. Vedení tepla probíhá v látkách pevných, kapalných i plynných.

Přenos tepla prouděním látky je druhým způsobem přenosu a jeho předpokladem je rovněž spojité látkové prostředí. Probíhá ovšem jen v tekutinách, tj. v kapalinách a plynech. Ohřátá kapalina nebo plyn může proudit samovolně nebo nuceně a tak teplo přenášet. Samovolné proudění je vyvoláno tím, že se ohříváním v důsledku roztažnosti zmenšuje hustota látek. Vznikne-li mezi místem ohřevu a místem ochlazení v tekutině teplotní rozdíl, ohřívaná a tedy lehčí část tekutiny stoupá, při vytlačování ochlazené těžší části. Tím vzniká v tekutině proudění, kterého se využívá k přenosu např. v ústředním topení. V kapalinách a zvláště v plynech přenos tepla prouděním převažuje nad přenosem tepla vedením.

Přenos tepla zářením, o němž jako třetím způsobu přenosu pojednává čl. 56, nevyžaduje látkové prostředí. V tomto případě se teplo přenáší elektromagnetickým zářením, i když prostor, v němž přenos probíhá, není vyplněn látkou. Tak se dostává teplo např. ze Slunce na Zemi. Přenosu tepla zářením se užívá též k vytápění, zvláště prostorů, v nichž nelze zamezit výměně vzduchu. Pokud je takový přenos zprostředkován zcela nebo převážně infračerveným zářením, nazývá se též *přenosem tepla sáláním*.

Kontrolní otázky

1. Jmenujte tři druhy přenosu tepla a vysvětlete, jak se vzájemně liší po fyzikální stránce.
2. Pro který z uvedených tří druhů přenosu tepla je podmínkou přítomnost látkového prostředí a jakým způsobem se látka na přenosu tepla účastní?
3. Uveďte, kterými způsoby se přenáší teplo v pevných látkách, kterými v tekutinách a kterými ve vakuu a zdůvodněte svoje tvrzení.

55,1 **Vedení tepla.** Při přenosu tepla vedením předávají částice prostředí s vyšší kinetickou energií část energie částicím s nižší energií, dochází k přenosu tepla. Rychlost přenosu tepla vyjadřujeme veličinou zvanou *tepelný tok* nebo *tepelný výkon* a definovanou vztahem

$$I_Q = \frac{dQ}{d\tau}, \tag{1}$$

kde Q značí množství přenášeného tepla a τ příslušný čas. Plošná hustota tepelného toku J_Q je pak definována vztahy

$$J_Q = \frac{dI_Q}{dS_n}$$

nebo vektorově

$$dI_Q = J_Q \cdot dS\,. \tag{2}$$

Hnací silou vedení tepla je teplotní spád vyjádřený gradientem teploty. Fourier (r. 1811) nalezl na základě experimentů lineární závislost mezi hustotou tepelného toku a gradientem teploty

$$J_Q = -\lambda \operatorname{grad} T\,. \tag{3}$$

Fenomenologický koeficient λ, tzv. **součinitel tepelné vodivosti**, vyjadřuje schopnost látky vést teplo a má číselnou hodnotu jako hustota tepelného toku při gradientu teploty 1 K m^{-1} v dané látce.

Přenos tepla vedením se v pevných látkách uskutečňuje přenosem kinetické energie částic. Je prostředkován buď volnými elektrony, nebo přenosem kmitů krystalové mřížky látky vlněním podobným akustickému. Přitom energie, kterou si částice (atomy nebo molekuly) předávají, se nemůže přenášet plynule, ale jen po kvantech energie hf podobných těm, která přenášejí v elektromagnetickém vlnění fotony. Přenos kvant energie kmitů krystalické mřížky proto připisujeme částicím zvaným fonony a šířícím se látkou rychlostí zvuku.

Na přenosu tepla se tedy mohou podílet jak volné elektrony, tak i fonony a výsledný součinitel tepelné vodivosti fononové a elektronové je pak

$$\lambda = \lambda_f + \lambda_e\,.$$

Dobré vodiče elektřiny obsahují dostatek volných elektronů a u nich je $\lambda \approx \lambda_e$, u materiálů se špatnou elektrickou vodivostí jsou zastoupeny obě složky, u elektrických izolantů převládá vodivost fononová, takže $\lambda \approx \lambda_f$.

Kontrolní otázky

1. Co znamená a jak je definován tepelný tok a jak hustota tepelného toku?
2. Co je obecnou hnací silou v případě přenosu tepla vedením?
3. Jak zní Fourierův zákon o přenosu tepla vedením?
4. Co zprostředkovává přenos tepla v kovech a v izolantech?
5. Co je to fonon?

55,2 Tepelná vodivost různých látek. Kovy se vyznačují vysokou tepelnou vodivostí, uskutečňovanou převážně valenčními elektrony, které jsou v krystalické mřížce kovů v pevné fázi volně pohyblivé. Fononová vodivost má u dobrých vodičů zcela zanedbatelný vliv na hodnotu součinitele tepelné vodivosti. V kovovém tělese, na jehož protilehlých stěnách je udržován teplotní rozdíl, vznikne teplotní pole. Volné elektrony v oblastech vyšší teploty mají vyšší kinetickou energii a tím větší rychlost tepelných pohybů a snáze pronikají do chladnějších míst. Tak přenášejí tepelnou energii z míst vyšší teploty na místa s nižší teplotou. Protože volné elektrony uskutečňují rovněž vedení elektrického proudu, tepelná a elektrická vodivost spolu úzce souvisí. Podle **zákona Wiedemannova-Franzova** je vztah mezi součiniteli

tepelné vodivosti λ a elektrické vodivosti γ dán rovnicí

$$\frac{\lambda}{\gamma} = T \cdot 2{,}45 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{V^2\,K^{-2}}\,.$$

Při stejné teplotě vykazují tedy nejrůznější kovy přibližně stejné hodnoty podílu λ/γ. Součinitel tepelné vodivosti se při změně teploty prakticky nemění, součinitel elektrické vodivosti je však teplotě v širokých mezích nepřímo úměrný. Malé odchylky od tohoto zákona mají příčinu v tom, že kromě elektronové vodivosti se některé kovy vyznačují ne zcela zanedbatelnou vodivostí fononovou.

V souladu s uvedeným zákonem se nepodařilo nalézt kov, který by byl dobrým vodičem elektrického proudu a špatným vodičem tepla. Úměrnost tepelné a elektrické vodivosti se projevuje i v tom, že obě se pronikavě zmenšují účinkem příměsí v kovech a nejnižších hodnot dosahují u slitin, jak ukazuje porovnání hodnot λ pro

čistou měď	měď se stopami arsenu	konstantan 60% Cu, 40% Ni
402 W m^{-1} K^{-1}	142 W m^{-1} K^{-1}	21 W m^{-1} K^{-1}

Izolanty se vyznačují tepelnou vodivostí převážně fononovou, protože v dobrých izolantech je velmi málo volně pohyblivých elektronů. Je-li těleso z izolantu v teplotním poli, v teplejších místech konají jeho stavební částice rychlejší tepelné pohyby než částice v chladnějších místech. Koncentrace fononů je tedy v teplejších místech větší. Nestejná koncentrace má za následek pronikaní fononů z míst jejich vyšší hustoty na místa s nižší hustotou a tím dochází k přenosu tepla.

Kdyby se fonony pohybovaly volně, nezávisle na sobě, látka by nekladla vedení tepla žádný odpor. Ve skutečnosti je tepelný odpor a tím i součinitel tepelné vodivosti ovlivněn vzájemným působením fononů. Tyto interakce fononů jsou vyvolány jednak nelinearitou vazeb mezi atomy mřížky, jednak růzností částic uvnitř krystalů. Tato různost je u prvků způsobená existencí izotopů, u slitin s atomy různých prvků hraje roli nahodilost. Interakce fononů způsobuje disperzi vln, takže součinitel tepelné vodivosti nabývá konečných hodnot. Se stoupající teplotou rostou kmity krystalických mřížek, mění se vazební síly mezi atomy, tím se vyvolává změna v interakcích fononů a nastává změna tepelné vodivosti. Šíření tepla v pevných látkách se podobá šíření akustických vln s velmi malou vlnovou délkou (hyperzvuk). Popsané jevy se nepodařilo dosud kvantitativně vyjádřit. Proto se součinitel tepelné vodivosti určuje výhradně měřením.

Kapaliny vedou teplo podobně jako pevné látky, pokud nedojde při přenosu tepla k jejich proudění. Součinitel tepelné vodivosti vody je např. $\lambda = 0{,}56$ W m^{-1} K^{-1}.

Plyny jsou ve srovnání s kapalinami a pevnými látkami horší vodiče tepla. U ideálních plynů se vedení tepla uskutečňuje předáváním kinetické energie molekul, podobně jako při šíření zvuku. Dochází k předávání energie při interakcích molekul, takže součinitel tepelné vodivosti závisí na četnosti srážek a tím na střední volné dráze molekul. I u plynu, pokud je v dost velkém prostoru, dochází většinou k proudění.

Na tlaku plynu tepelná vodivost příliš nezávisí. Pouze v případě velmi nízkých tlaků je vztah mezi tepelnou vodivostí a tlakem lineární, tj.

$$\lambda = \text{konst}\ p\,.$$

Kontrolní otázky

1. Uveďte hlavní nositele energie při přenosu tepla vedením v kovech a v izolantech.
2. Jak a proč souvisí tepelná a elektrická vodivost kovů?
3. Jak se uskutečňuje vedení tepla v kapalinách a jak v plynech?

55,3 Diferenciální rovnice vedení tepla. Hustota tepelného toku přenášeného vedením je určena podle Fourierova zákona rov. 3. Abychom ji mohli řešit, musíme znát rozložení a průběh teplot ve sledovaném objemu, tedy znát pro daný případ funkční závislost teploty na souřadnicích a čase τ, tj:

$$T = T(x, y, z, \tau)\,.$$

Předpokládejme, že určitému tělesu se přivádí teplo, prochází jím tepelný tok a těleso se přitom ohřívá. Element $\mathrm{d}m$ tělesa ohřátý o ΔT přijme a zadrží teplo $\mathrm{d}Q = \mathrm{d}m\, c\, \Delta T$. Objemová hustota přijatého tepla $\mathrm{d}Q/\mathrm{d}V = \varrho c\, \Delta T$, přičemž ϱ je hustota látky tělesa. Mohutnost zadržování energie je rovna divergenci hustoty tepelného toku, tedy

$$-\operatorname{div} \boldsymbol{J}_Q = \frac{\partial}{\partial \tau}(\varrho c\, \Delta T) = \varrho c \frac{\partial T}{\partial \tau}\,.$$

Dosadíme-li za $\boldsymbol{J}_Q$ z rov. 3, dostaneme

$$\lambda \operatorname{div} \operatorname{grad} T = \varrho c \frac{\partial T}{\partial \tau}\,. \qquad (4)$$

Po dělení této rovnice členem ϱc a rozepsání operace div grad pro kartézské souřadnice obdržíme

$$\frac{\lambda}{\varrho c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \frac{\partial T}{\partial \tau}\,. \qquad (4a)$$

Je-li v prostředí, kterým se šíří teplo, další tepelný zdroj o objemové hustotě tepelného výkonu $P_V = \mathrm{d}P/\mathrm{d}V$, je nutno výkon zdroje připočítat k přenášenému toku tepla.

Rovnice 4a se pak změní na tvar

$$\frac{P_V}{\varrho c} + \frac{\lambda}{\varrho c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \frac{\partial T}{\partial \tau}\,, \qquad (5)$$

nebo obecně

$$\frac{P_V}{\varrho c} + \frac{\lambda}{\varrho c}\nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial \tau}\,, \qquad (6)$$

kde ∇^2 je Laplaceův operátor (pro kartézskou soustavu souřadnic je rozepsán v rov. 5). Pokud se podaří tuto rovnici řešit, jejím řešením je hledaná funkční závislost $T = T(x, y, z, \tau)$. Poměr $a = \lambda/(\varrho c)$ v rov. 4, 5, 6 je součinitel teplotní vodivosti látky. Určuje rychlost vyrovnávání teplot v tělese a je důležitou materiálovou konstantou v tepelné technice. Diferenciální rovnice vedení tepla má tedy obecný tvar

$$\frac{P_V}{\varrho c} + a\,\nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial \tau}\,. \qquad (7)$$

Jestliže při vedení tepla nenastává ustálený stav, mění se teplota nejen s polohou, ale i s časem. Při řešení takových případů musíme nejprve nalézt závislost teploty na poloze a na čase a potom určit hustoty tepelného toku rov. 3. K řešení rov. 7 je ovšem třeba znát počáteční a okrajové podmínky a celý případ je obvykle značně matematicky složitý, je-li vůbec analyticky řešitelný. Podstatné zjednodušení však nastává při ustáleném vedení tepla, o němž pojednává další krok.

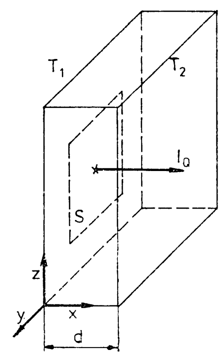
Kontrolní otázky

1. Odvoďte diferenciální rovnici vedení tepla.
2. Co je součinitel teplotní vodivosti látky?
3. Jakým způsobem se počítá množství přenášeného tepla v neustáleném stavu?

55,4 Ustálené vedení tepla. Prochází-li teplo prostorem tak, že se teplota v kterémkoli místě s časem nemění, nazýváme takový přenos tepla ustáleným. Pak můžeme pro libovolné místo psát $\partial T/\partial \tau = 0$. Pro ustálené (stacionární) vedení tepla prostředím, v němž nejsou vnitřní zdroje tepla, je nulový i první člen rov. 7, která se tedy redukuje na tvar

$$\nabla^2 T = 0\,. \qquad (8)$$

Odvoďme vztah pro výpočet ustáleného tepelného toku vymezenou částí nekonečné rovinné stěny o konstantní tloušťce d, z homogenní látky o součiniteli tepelné vodivosti λ. Soustavu souřadnic zvolme tak, aby osy y a z ležely v jednom



Obr. 55,4 Ustálené vedení tepla rovinnou homogenní stěnou povrchu stěny (obr. 55,4) a osa x byla k ní kolmá. Na tomto povrchu ($x = 0$) nechť je konstantní teplota T_1 a na protilehlém povrchu ($x = d$) konstantní teplota $T_2 < T_1$. Za těchto podmínek závisí teplota ve stěně jen na souřadnici x, takže rov. 8 nabývá jednoduchý tvar

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0\,. \tag{8a}$$

Obecné řešení této diferenciální rovnice je $T(x) = c_1 x + c_2$. Z okrajových podmínek plyne, že $T = T_1$ pro $x = 0$ a $T = T_2$ pro $x = d$, takže určíme integrační konstanty $c_1 = T_1$, $c_2 = (T_2 - T_1)/d = -\Delta T/d$. Teplota v uvažované homogenní stěně klesá tedy z T_1 na T_2 úměrně se vzdáleností x podle rovnice

$$T(x) = \frac{T_2 - T_1}{d}\,x + T_1\,. \tag{9}$$

Známe-li funkční závislost $T(x)$, můžeme podle rov. 3 stanovit hustotu tepelného toku. V našem případě je grad $T = (T_2 - T_1)/d$ a hustota tepelného toku je

$$J_Q = \lambda\,\frac{T_2 - T_1}{d}\,. \tag{10}$$

Částí stěny o ploše S prochází tepelný tok

$$I_Q = \lambda\,\frac{T_2 - T_1}{d}\,S\,. \tag{11}$$

Za ustáleného stavu je tedy jak hustota tepelného toku, tak i tepelný tok danou částí stěny úměrný teplotnímu rozdílu $-\Delta T$*).

Technická praxe zavádí tzv. plošnou tepelnou vodivost Λ definovanou vztahem

$$\Lambda = \lambda/d\,. \tag{12}$$

Pro ustálený tok tepla stěnou pak platí

$$I_Q = \Lambda S(t_2 - t_1)\,. \tag{13}$$

Součin $\Lambda S = G_T$ se nazývá tepelná vodivost. Při užití tepelné vodivosti je ustálený tok tepla stěnou vyjádřen vztahem

$$I_Q = G_T(t_2 - t_1)\,. \tag{14}$$

Kontrolní otázky

1. Kdy pokládáme přenos tepla vedením v látce za ustálený?
2. Napište diferenciální rovnici ustáleného vedení tepla.
3. Odvoďte vztah pro ustálený tok jednoduchou homogenní stěnou plochy S a tloušťky d.
4. Vysvětlete, co je plošná tepelná vodivost Λ, jak souvisí se součinitelem tepelné vodivosti a tloušťkou stěny. V jakém vztahu k ní je tepelná vodivost G_T?

*) Teplotní rozdíl $\Delta T = T_1 - T_2$ se v praxi určuje ekvivalentním rozdílem $t_1 - t_2$ Celsiových teplot obou povrchů stěny.

55,5 Tepelný odpor, tepelná analogie Ohmova zákona. Při ustáleném stavu vedení tepla je tepelný proud úměrný teplotnímu rozdílu prostředí. Podle Ohmova zákona je ustálený elektrický proud v uzavřeném obvodu přímo úměrný elektrickému napětí (potenciálnímu rozdílu). Podobně jako v Ohmově zákoně definujeme i v tomto případě (tepelný) odpor jako veličinu úměrnou teplotnímu rozdílu a nepřímo úměrnou tepelnému proudu:

$$R_T = \frac{t_1 - t_2}{I_Q}\,. \tag{15}$$

Pro stěnu počítanou v kr. 55,4 bude odpor dán vztahem

$$R_T = \frac{d}{\lambda S}\,. \tag{16}$$

Zavedením tepelného odporu se zjednodušuje výpočet vedení tepla různě složenými stěnami. Platí zde tytéž zákony jako v případě ustáleného vedení proudu v elektřině. Tepelné odpory řazené za sebou se sčítají, pro paralelně řazené odpory platí, že převrácená hodnota výsledného odporu se rovná součtu převrácených hodnot jednotlivých odporů. Řeší-li se složitější případ, je výhodné překreslit tepelné odpory tak, jako by to byly elektrické odpory a získanou síť odporů zjednodušovat podle metod užívaných v elektřině.

Vztah $R_T S = R_\lambda$ nazýváme plošným tepelným odporem. Z porovnání rov. 12 a 16 snadno nahlédneme, že mezi plošným tepelným odporem a plošnou tepelnou vodivostí platí

$$R_\lambda = \frac{1}{\Lambda} = \frac{d}{\lambda} \tag{17}$$

a porovnáním rov. 14 a 15 nalezneme souvislost mezi tepelným odporem a tepelnou vodivostí

$$R_T = \frac{1}{G_T}\,. \tag{18}$$

Kontrolní otázky

1. Jak je definován tepelný odpor?
2. Jak souvisí plošná tepelná vodivost s plošným tepelným odporem?
3. Jaké pravidlo platí pro hledání výsledného odporu v případě sériového řazení tepelných odporů?
4. Jaké pravidlo platí pro hledání výsledného tepelného odporu v případě paralelního řazení tepelných odporů?

55,6 Přestup tepla a průchod rovinnou stěnou. Na styku pevné látky a tekutiny (kapaliny či plynu) nastává v důsledku teplotního rozdílu přenos tepla zvaný přestup. Je komplikován tím, že částice proudící tekutiny ulpívají na povrchu pevné stěny a tvoří tenkou mezní vrstvu. Tekutina ve vrstvě proudí rovnoběžně s povrchem stěny rychlostmi rostoucími se vzdáleností od povrchu. Napříč vrstvou vzniká teplotní spád a přenos tepla vedením. Mezní vrstvu však nelze považovat za tenkou stěnu ani pro teoretické úvahy, neboť hranice mezi ulpívajícími a volně proudícími částicemi není ostře vymezena.

Přestup tepla závisí mj. na rychlosti proudění, viskozitě tekutiny a na jakosti povrchu stěny. Není-li rozdíl teplot povrchu stěny a volně proudící tekutiny větší než několik kelvinů, lze hustotu tepelného toku počítat z empirického Newtonova vztahu

$$J_Q = h\,\Delta T\,. \tag{19}$$

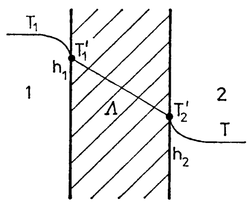
Podle něj je hustota tepelného toku při přestupu úměrná teplotnímu rozdílu, obdobně jako podle rov. 10 při vedení tepla. Zde je však činitelem úměrnosti plošná tepelná přestupnost h neboli součinitel přestupu tepla.

Z rov. 19 lze vyvodit, že h má číselnou hodnotu hustoty tepelného toku přestupujícího na daném rozhraní při jednotkovém teplotním rozdílu. Je to tedy veličina vztažená na jednotkovou plochu rozhraní obdobně jako (plošná) hustota tepelného toku. Hodnoty h se určují výhradně experimentálně. Ze všech veličin, na kterých h závisí, se uvádí zpravidla jen její závislost na rychlosti proudění, na teplotě dané tekutiny a na geometrickém tvaru, popř. orientaci rozhraní. Převrácená hodnota plošné tepelné přestupnosti je plošný tepelný odpor přestupu

$$R_h = 1/h\,, \tag{20}$$

který má obdobný význam jako plošný tepelný odpor R_λ při vedení tepla.

Průchod tepla stěnou zahrnuje tři děje, a to přestup z tekutiny 1 na stěnu, vedení stěnou a přestup ze stěny do tekutiny 2 (obr. 55,6). Podobně jako při vedení



Obr. 55,6 Průběh tepla při přestupu tepla stěnou

tepla vrstvenou stěnou se sčítají plošné tepelné odpory, a to odpor prvního přestupu $R_{h1} = 1/h_1$, odpor vedení ve stěně $R_\lambda = 1/\Lambda$ a odpor druhého přestupu $R_{h2} = 1/h_2$. Výsledný tepelný odpor průchodu

$$R_k = R_{h1} + R_\lambda + R_{h2} \tag{21}$$

a jeho převrácená hodnota, tzv. plošná tepelná průchodnost k neboli součinitel prostupu tepla se určuje ekvivalentním vztahem

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_2}\,. \tag{22}$$

Při průchodu tepla stěnou o ploše S je tedy hustota tepelného toku

$$J_Q = \frac{\Delta T}{R_k} = k\,\Delta T \tag{23}$$

a tepelný tok

$$I_Q = J_Q S = k\,\Delta T S\,. \tag{24}$$

ΔT zde ovšem znamená rozdíl mezi teplotami T_1 a T_2 volně proudících tekutin 1 a 2, nikoli mezi povrchy pevné stěny na stycích s tekutými prostředími.

Plošný tepelný odpor průchodu a jeho převrácená hodnota plošná tepelná průchodnost se určují nejčastěji výpočtem podle rov. 21 a 22 z experimentálně zjištěných (tabelovaných) hodnot plošné tepelné přestupnosti h a z vypočtených plošných tepelných vodivostí Λ podle rov. 12.

Kontrolní otázky

1. Popište děje uskutečňující přestup tepla z tekutiny na pevnou stěnu.
2. Co vyjadřuje plošná tepelná přestupnost a v jakém vztahu je konstantou úměrnosti?
3. Znázorněte graficky teplotní spády při průchodu tepla rovinnou stěnou, a to jak v tekutině, tak i ve stěně.
4. Jak se určuje plošný tepelný odpor průchodu a plošná tepelná průchodnost?
5. Napište rovnici popisující ustálený průchod tepla rovinnou stěnou a vysvětlete význam použitých veličin.

55,7 Difúze vodních par porézním prostředím. Vzhledem k tepelné vodivosti vody a jiným jejím nepříznivým vlastnostem a účinkům v kapilárně porézních materiálech je s problémem tepelné izolace budov spojena též otázka odolnosti konstrukce proti vlhkosti a stálosti jejich tepelných vlastností. Zvláště důležité je, aby nedocházelo ke kondenzaci vodních par uvnitř konstrukce. Ve vzduchu vždy obsažené vodní páry pronikají porézními materiály z míst vyššího do míst nižšího parciálního tlaku. Hnací silou přenosu vodní páry látkou je gradient parciálního tlaku grad p, jemuž je hustota hmotnostního toku J_m vodní páry úměrná podle vztahu

$$J_m = -\delta\,\mathrm{grad}\,p\,. \tag{25}$$

Konstantou úměrnosti je součinitel difúzní vodivosti δ, který vyjadřuje schopnost látky vést (propouštět) vodní páru difúzí. Má číselnou hodnotu shodnou s hustotou toku páry danou látkou při jednotkovém gradientu 1 Pa m^{-1} parciálního tlaku páry.

Rovnice 25 má týž tvar jako rov. 3 pro vedení tepla. Obdobou ustáleného vedení tepla (kr. 55,4) je ustálený stav difúze vodní páry, při němž se parciální tlaky v libovolném místě prostředí s časem nemění. V homogenní rovinné stěně o tloušťce d je tedy spád tlaku grad $p = \Delta p/d$, takže rov. 25 nabývá tvar

$$J_m = \frac{\delta}{d}\,\Delta p = \frac{\Delta p}{R_d}\,. \tag{26}$$

Plošný difúzní odpor $R_d = d/\delta$ je obdobou plošného tepelného odporu R_λ včetně jeho určení pro vrstvenou stěnu součtem odporů vrstev.

Ve stěně vzniká zpravidla sdružený proces přenosu látky (vlhkosti) a přenosu tepla. Hlavní hnací silou difúze vodní páry stěnou je tlakový rozdíl Δp a přenosu tepla vedením je teplotní rozdíl ΔT. Za předpokladu izochorického děje je tlak úměrný teplotě, $p = V_m^{-1} R_m T = cT$, odkud pro jejich přírůstky plyne

$$\Delta p = c\,\Delta T\,. \tag{27}$$

Pro difúzi páry a vedení tepla stěnou platí vztahy

$$\Delta p = J_m R_d\,, \quad \Delta T = J_Q R_\lambda\,,$$

z nichž lze s použitím rov. 26 odvodit, že hustota difúzního toku

$$J_m = \frac{\Delta p}{R_d} = c\,\frac{\Delta T}{R_d} = C\,\frac{R_\lambda}{R_d}\,. \tag{28}$$

Při ustáleném vedení tepla je J_Q konstantní, tedy i $C = cJ_Q =$ konst. Poslední výraz rov. 28 dává řešení k zábraně kondenzace difundující páry ve stěně.

Za poklesu teploty při vnějším povrchu stěny, např. v zimě, může vodní pára dosáhnout stavu nasycenosti a kondenzovat. Aby byla hustota toku par J_m minimální, je třeba vnitřní povrchy stěn vlhkých místností osadit vrstvou s velkým difúzním a malým tepelným plošným odporem, zatímco vnější stranu stěny je vhodné osadit vrstvou s malým difúzním odporem (aby pára ze stěny snadno odcházela) a s velkým tepelným odporem (v zájmu tepelné izolace).

Kontrolní otázky

1. Vysvětlete, co je hnací silou difúze vodní páry v kapilárně porézních látkách (např. stavebninách).
2. Uveďte rovnici, v níž je součinitel difúzní vodivosti konstantou úměrnosti a vysvětlete jeho fyzikální význam.
3. Co je difúzní plošný odpor stěny?
4. Čemu je úměrná hustota difúzního hmotnostního toku páry při současném ustáleném vedení tepla stěnou?
5. Vysvětlete opatření proti kondenzaci při difúzi par stěnami vlhkých místností.

Číslo	Veličina — její značka a název
Hlavní jednotka název, značka, rozměr	

Definice a vysvětlivky

550 Φ, P, I_Q **tepelný tok, tepelný výkon**

watt,
W = $m^2\,kg\,s^{-3}$

Tepelný tok znamená výkon přenášený při přenosu tepla vedením (kondukcí) nebo prouděním prostředí (konvekcí). Je definován podílem přenášeného tepla a příslušného času,

$$I_Q = \frac{dQ}{d\tau}\,.$$

551 φ, q, J_Q **hustota tepelného toku** (výkonu)

watt na metr čtverečný
$W\,m^{-2} = kg\,s^{-3}$

Hustota tepelného toku vyjadřuje tepelný tok připadající na metr čtverečný plochy průtoku tepla. Je definována podílem tepelného toku a plochy, jíž tento tok kolmo prochází,

$$J_Q = \frac{dI_Q}{dS}\,.$$

552 λ **součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná vodivost**

watt na metr a kelvin, $W\,m^{-1}\,K^{-1} = m\,kg\,s^{-3}\,K^{-1}$

Součinitel tepelné vodivosti je mírou schopnosti látky přenášet teplo vedením, tj. předávat kinetickou energii tepelných pohybů mezi molekulami bez proudění látky. Je určen jako součinitel úměrnosti gradientu teploty a hustoty tepelného toku v látce,

$$\lambda\,\mathrm{grad}\,T = -J_Q\,.$$

553 Λ **plošná tepelná vodivost**

watt na metr čtverečný a kelvin, $W\,m^{-2}\,K^{-1} = kg\,s^{-3}\,K^{-1}$

Plošná tepelná vodivost vyjadřuje schopnost jednoho čtverečního metru stěny přenášet teplo vedením. Je definována podílem hustoty tepelného toku a rozdílu teplot mezi protilehlými povrchy stěny,

$$\Lambda = \frac{J_Q}{\Delta T}\,.$$

U rovinné stěny nebo vrstvy o tloušťce d souvisí Λ se součinitelem tepelné vodivosti vztahem

$$\Lambda = \lambda/d\,.$$

554 G_T **tepelná vodivost**

watt na kelvin, $W\,K^{-1} = m^2\,kg\,s^{-3}\,K^{-1}$

Tepelná vodivost je mírou schopnosti tělesa (konstrukčního prvku, obvodového pláště budovy) přenášet teplo vedením. Je definována podílem tepelného toku a rozdílu teplot.

$$G_T = \frac{I_Q}{\Delta T}.$$

Převrácená hodnota tepelné vodivosti je tepelný odpor $R_T = 1/G_T$.

---

555 h, α **plošná tepelná přestupnost, součinitel přestupu tepla**

watt na metr čteverečný a kelvin, $W\,m^{-2}\,K^{-1} = kg\,s^{-3}\,K^{-1}$

Plošná tepelná přestupnost vyjadřuje schopnost jednoho čtverečního metru rozhraní pevné látky a kapaliny nebo plynu přenášet teplo. Je definována podílem hustoty tepelného toku pronikajícího rozhraním a teplotního rozdílu mezi povrchem pevné látky a okolní tekutinou,

$$h = \frac{J_Q}{\Delta T}.$$

---

556 k **plošná tepelná průchodnost, součinitel prostupu tepla**

watt na metr čtverečný a kelvin, $W\,m^{-2}\,K^{-1} = kg\,s^{-3}\,K^{-1}$

Plošná tepelná průchodnost vyjadřuje schopnost soustavy, tvořené dvěma plynnými nebo kapalnými prostředími a jedním čtverečním metrem stěny mezi nimi, přenášet teplo. Je definována podílem hustoty tepelného toku a rozdílem teplot prostředí obklopujících stěnu,

$$k = \frac{J_Q}{\Delta T}.$$

Průchodnost rovinné stěny souvisí s její plošnou tepelnou vodivostí a přestupností na obou stranách stěny vztahem

$$1/k = 1/h_1 + 1/\Lambda + 1/h_2.$$

---

557 R **plošný tepelný odpor**
R_λ **p.t.o. vedení;** R_h **p.t.o. přestupu;** R_k **p.t.o. průchodu**

kelvin metr čtverečný na watt, $K\,m^2\,W^{-1} = kg\,s^{-3}\,K$

Plošný tepelný odpor je mírou schopnosti jednoho čtverečního metru stěny bránit průchodu tepla. Je definován podílem teplotního rozdílu a hustoty tepelného toku

$$R = \frac{\Delta T}{J_Q}.$$

P.t.o. vedení je převrácená hodnota plošné tepelné vodivosti

$$R_\lambda = 1/\Lambda,$$

p.t.o. přestupu je převrácená hodnota plošné tepelné přestupnosti

$$R_h = 1/h$$

a *p.t.o. průchodu* je převrácená hodnota plošné tepelné průchodnosti

$$R_k = 1/k = R_{h1} + R_\lambda + R_{h2}.$$

---

558 δ **součinitel difúzní vodivosti** (při tlakovém spádu)

sekunda, s

Součinitel difúzní vodivosti vyjadřuje schopnost látky přenášet vlhkost difúzí při tlakovém spádu. Je činitelem úměrnosti gradientu parciálního tlaku vodní páry a jejího hmotnostního toku

$$\delta \operatorname{grad} p_i = -J_m, \quad [\delta] = \frac{kg\,s^{-1}}{Pa\,m^{-1}} = s.$$

---

559 R_d **plošný difúzní odpor**

reciproký metr sekunda, $m^{-1}\,s^{-1}$

Plošný difúzní odpor je mírou schopnosti jednoho čtverečního metru stěny bránit průchodu difundující vlhkosti. Je definován podílem rozdílu parciálních tlaků a hmotnostního toku vodní páry

$$R_d = \frac{p_i}{J_m}, \quad [R_d] = \frac{Pa}{kg\,s^{-1}} = m^{-1}\,s^{-1}.$$

---

56. PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM

56,0 Teplotní vyzařování. Látkové objekty všech skupenství jsou obecně již od nízkých teplot zdroji elektromagnetického záření, a to v důsledku fluktuací nabitých částic působených tepelným pohybem v látce. Protože vysílané záření závisí všeobecně svou intenzitou i jinými vlastnostmi na teplotě zářiče, označujeme ho názvem teplotní záření a příslušný děj nazýváme teplotní vyzařování.

Zákonitosti tohoto děje objasnil Planck r. 1900 vyzařovacím zákonem v souvislosti s kvantovou teorií záření. O Planckově vyzařovacím zákoně podrobněji pojednává kr. 71,4, v souvislosti se spektrálním složením teplotního záření, hlavně jeho viditelné částí — světla. V termice — ve výkladu přenosu tepla zářením — vyjdeme ze dvou zákonů objevených v 19. století. Je to zákon Kirchhoffův a Stefanův-Boltzmannův, které byly Planckovými objevy potvrzeny.

56,1 Kirchhoffův zákon. Schopnost těles vysílat teplotní záření souvisí z hlediska termodynamiky úzce s jejich schopností toto záření pohlcovat. Přesvědčuje o tom následující rozbor.

Přenos zářivé energie W_e kvantitativně vyjadřujeme veličinou zvanou zářivý tok (výkon) $\Phi = dW_e/d\tau$, popř. hustotou zářivého toku $\varphi = d\Phi/dS$. Stejnou definicí jsou určeny intenzita vyzařování M na povrchu zářiče a intenzita záření E na povrchu tělesa, na něž záření dopadá. Z dopadajícího zářivého toku Φ se tělesem odráží (reflektuje) část Φ_r, pohlcuje (absorbuje) Φ_a a propouští (transmituje) Φ_t. Toto rozdělení vyjadřují poměrné veličiny

$$\begin{array}{ccc} \text{odrazivost} & \text{pohltivost} & \text{propustnost} \\ R = \Phi_r/\Phi\,, & A = \Phi_a/\Phi\,, & T = \Phi_t/\Phi\,. \end{array} \tag{1}$$

Obecně je $R + A + T = 1$; ovšem v tělese, které dané záření nepropouští ($T = 0$), se všechno neodražené záření pohltí, takže platí

$$R + A = 1\,. \tag{2}$$

Předpokládejme těleso s uzavřenou dutinou, v níž je vakuum a jejíž stěny nepropouštějí teplotní záření. Ustálením teploty se těleso s dutinou dostanou do stavu termodynamické rovnováhy. Všesměrové teplotní záření v dutině lze pokládat za fotonový plyn a podle nultého termodynamického zákona mu v rovnováze přisoudit stejnou teplotu T, jakou mají stěny. Toto záření je izotropní a na stěnách vyvolává všude stejnou intenzitu ozáření $E(T)$, závislou na teplotě rovnovážného stavu. Z intenzity ozáření se část $A\,E(T)$ stěnami pohlcuje a část $R\,E(T)$ odráží. V rovnovážném stavu musí ovšem stěny do dutiny vracet ekvivalentní záření se stejnou intenzitou $E(T)$, s jakou jsou ozařovány. Stěny tedy vysílají vlastní teplotní záření takovou intenzitou M, která spolu s intenzitou odraženého záření $R\,E(T) = (1 - A)\,E(T)$ splňuje rovnost $M + (1 - A)\,E(T) = E(T)$. Po úpravě plyne odtud Kirchhoffův zákon

$$\frac{M}{A} = E(T)\,, \tag{3}$$

vyjádřený slovy: Podíl intenzity vyzařování a pohltivosti je pouze funkcí teploty a nezávisí na vlastnostech stěn obklopujících dutinu.

Kirchhoffův zákon vyjadřuje v teplotním vyzařování základní poznatek, že tělesa, která záření nejvíce pohlcují, také nejvíce vyzařují a obráceně: tělesa např. lesklá, která nejvíce odrážejí, a tedy pohlcují nejméně, též nejméně vyzařují.

Kontrolní otázky

1. Definujte veličiny, které vyjadřují schopnosti těles odrážet, pohlcovat a propouštět světlo a příbuzná elektromagnetická záření a uveďte vztah, jímž tyto veličiny navzájem souvisí.
2. Vysvětlete, jak se udržuje termodynamická rovnováha mezi stěnami dutého tělesa a teplotním zářením v dutině s vakuem.
3. Formulujte Kirchhoffův zákon a vysvětlete z něj plynoucí poznatky.

56,2 Stefanův-Boltzmannův zákon a Wienův zákon posuvu. Skutečná tělesa, i když se při osvětlení jeví sytě černá, nejsou dokonalými pohlcovači ani pro světlo a zpravidla ani pro příbuzné záření infračervené, obsažené v teplotním záření. Nejsou-li dokonalými pohlcovači, nejsou tedy ani dokonalými zdroji teplotního záření. Dokonale černé těleso s povrchem o pohltivosti $A = 1$, mající podle rov. 3 při dané teplotě maximální možnou intenzitu vyzařování

$$M_b = E(T)\,, \tag{4}$$

ve skutečnosti neexistuje. Takový dokonalý pohlcovač a zároveň dokonalý zářič, zvaný stručně černý zářič, lze však experimentálně realizovat podle poznatků z Kirchhoffova zákona.

K realizaci černého zářiče použijeme tělesa s dutinou tvaru štíhlého kužele, která má vysoce pohltivé stěny, např. začerněné sazemi. Záření vstupující do ní otvorem ve směru osy se po opakovaných odrazech téměř dokonale pohltí. Jestliže dutina dosahuje takto pohltivosti $A = 1$, dosahuje i maximální intenzity vyzařování M_b podle rov. 4 a představuje černý zářič. Podle této rovnice lze z Kirchhoffova zákona vyvodit stručný závěr, že intenzita vyzařování černého zářiče závisí jen na jeho teplotě.

Zmíněnou závislost experimentálně určil Stefan (r. 1879) pomocí popsané realizace černého zářiče a teoreticky odvodil Boltzmann. Výsledkem byl Stefanův-Boltzmannův zákon

$$M_b = \sigma T^4\,, \quad \text{kde} \quad \sigma = 5{,}67\,.\,10^{-8}\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}} \tag{5}$$

je Stefanova-Boltzmannova konstanta. Tento zákon představuje základ nejrůznějších výpočtů přenosu tepla zářením.

Neméně významný poznatek o teplotním záření objevil Wien (r. 1896), když teoreticky odvodil a experimentálně ověřil vztah zvaný Wienův zákon posuvu

$$\lambda_{max} T = b = 2{,}899\,.\,10^{-3}\ \mathrm{m\,K}\,. \tag{6}$$

Z něj plyne, že vlnová délka λ_{max} záření, které je ve spektru černého zářiče s teplotou T nejvíce zastoupeno, je nepřímo úměrná teplotě zářiče. S tím souvisí známý poznatek, že teplotní záření zahřívaných těles, omezené zpočátku téměř jen na infračervenou oblast, vykazuje asi od 800 K znatelnou část v oblasti světla. Počínaje touto teplotou má záření nejdříve temně rudé zabarvení a se stoupající teplotou přechází od červeného přes žluté až do bílého světla. Viditelné části teplotního záření při 1500 K odpovídá přibližně světlo plamene svíčky, při 3000 K světlo wolframového vlákna žárovky.

Pro vědecké i technické aplikace má Wienův zákon posuvu zvláštní význam. Umožňuje určit teplotu zářiče z experimentálně zjištěné vlnové délky λ_{max} příslušící maximu intenzity ve spektru daného teplotního záření. Pro Slunce, v jehož záření je $\lambda_{max} \doteq 500$ nm, byla podle tohoto zákona přibližně určena teplota povrchu

$$T = \frac{b}{\lambda_{max}} \doteq 5800\ \mathrm{K}\,. \tag{7}$$

Také měření vysokých teplot optickým pyrometrem (viz čl. 50) je principiálně založeno na závislosti barevného tónu teplotního záření měřeného předmětu.

Kontrolní otázky

1. Vysvětlete, co znamená černý zářič a jak jej lze laboratorně realizovat.
2. Formulujte Stefanův-Boltzmannův zákon.
3. Vysvětlete, co je obsahem Wienova zákona posuvu a vyjádřete jej matematicky.

56,3 Výměna tepla zářením. Stefanův-Boltzmannův zákon vyjádřený rov. 5 platí pro ideální černý zářič s maximální pohltivostí $A = 1$. Žádné skutečné těleso však této pohltivosti nedosahuje a menší či větší část dopadajícího teplotního záření odráží nebo propouští. Téměř dokonalou propustnost $T \doteq 1$, a tedy pohltivost $A \doteq 0$, jeví např. suchý vzduch, z pevných látek pak kamenná sůl. Takové látky nazýváme průteplivé. Vlhký vzduch a některé jiné plyny (např. CO_2), kapaliny, voda a průhledné pevné látky (např. sklo) pohlcují záření jistých vlnových délek, hlavně v infračervené části spektra. Jsou to selektivní pohlcovače a také selektivní zářiče. Pevná tělesa pohlcují zpravidla část dopadajícího teplotního záření všech vlnových délek a odrážejí je; označují se proto názvem šedá tělesa, popř. šedé zářiče.

Pro přenos tepla zářením pokládáme zúčastněná tělesa za šedé zářiče s pohltivostmi $A < 1$. Vycházíme z Kirchhoffova zákona, kde do rov. 3 za $E(T)$ dosadíme z rov. 5 výraz σT^4. Tím dostaneme modifikovaný Stefanův-Boltzmannův zákon pro šedé zářiče

$$M = A\sigma T^4 . \tag{8}$$

Hodnota Stefanovy-Boltzmannovy konstanty σ je velmi malá (řádově 10^{-8}) a naopak teploty ve stovkách nebo tisících kelvinů vedou po umocnění na čtvrtou k hodnotám velkým. V technických výpočtech se proto uvádí modifikovaný Stefanův-Boltzmannův zákon ve tvaru

$$M = AC_b(T/100)^4 = C(T/100)^4 , \tag{9}$$

kde uvedená sálavost černého zářiče $C_b = 10^8\sigma = 5{,}67\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}$, přičemž sálavost šedého zářiče $C = AC_b$.

Protože každé těleso je teplotním zářičem, představuje tedy vzájemné ozařování např. dvou těles nikoli jednostranný přenos, nýbrž výměnu tepla zářením.

Řešme tuto výměnu mezi dvěma šedými tělesy, která jsou k sobě obrácena stejně velkými rovnoběžnými rovinnými povrchy o pohltivostech A_1, A_2 a teplotách T_1, T_2. Mezi přivrácenými povrchy 1 a 2 nechť je vakuum nebo průteplivé prostředí v mezeře o tloušťce řádově menší než rozměry povrchů. Intenzity vyzařování M_1, M_2 těchto povrchů určíme podle rov. 9. Záření vysílané povrchem 1 prochází mezerou a beze ztrát dopadá na povrch 2, na němž se jistá část pohltí a zbytek odrazí k povrchu 1. To platí též obráceně o záření vysílaném povrchem 2. Intenzita ozáření E_1 povrchu 1 je tedy rovna intenzitě vyzařování M_2 povrchu 2 zvětšené o odraženou část $(1 - A_2)E_2$ jeho intenzity ozáření E_2. Obdobně je určena též hodnota E_2 povrchu 2, takže

$$E_1 = M_2 + (1 - A_2)E_2 , \quad E_2 = M_1 + (1 - A_1)E_1 . \tag{10}$$

Vypočtené E_1 a E_2 určují hustoty zářivých toků $\varphi_1 = E_1$, $\varphi_2 = E_2$, které v mezeře směřují proti sobě k povrchům 1 a 2. Jimi se uskutečňuje výměna tepla zářením mezi oběma tělesy.

Při teplotách $T_1 > T_2$ jsou hustoty zářivých toků $\varphi_1 > \varphi_2$, takže při výměně převažuje záření z tělesa 1 na těleso 2. Přenos tepla zářením mezi danými tělesy je určen hustotou tepelného toku

$$J_Q = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_2M_1 - A_1M_2}{A_1 + A_2 - A_1A_2} . \tag{11}$$

S použitím modifikovaného Stefanova-Boltzmannova zákona podle rov. 9 a po úpravách dostaneme, že mezi dvěma šedými tělesy s rovnoběžnými rovinnými povrchy o ploše S se zářením přenáší tepelný tok

$$I_Q = J_QS = C_{12}S[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] . \tag{12}$$

Vzájemná sálavost C_{12} závisí na sálavostech C_1 a C_2 daných těles podle vztahu

$$\frac{1}{C_{12}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_b} . \tag{12a}$$

Podobně lze řešit i jiný případ, a to výměnu tepla zářením mezi tělesy o površích S_1 a S_2, z nichž těleso 2 zcela obklopuje těleso 1. Pak o vzájemné sálavosti platí vztah

$$\frac{1}{C_{12}} = \frac{1}{C_1} + \frac{S_1}{S_2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_b}\right) \tag{13}$$

a pro $S_1 \ll S_2$ je $S_1/S_2 \doteq 0$, takže $C_{12} \approx C_1$
a tepelný tok

$$I_Q = C_1S_1[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] . \tag{14}$$

Rovnice 12 a 14 podávají řešení dvou zvláštních případů přenosu tepla zářením mezi dvěma tělesy. Jejich použitelnost pro skutečné případy je omezena tím, do jaké míry se skutečnost blíží předpokládaným podmínkám. Odlišné případy je nutno řešit na teoretickém základě individuálně.

Kontrolní otázky

1. Objasněte, čím se vyznačují šedé zářiče, selektivní zářiče a průteplivé látky.
2. Napište Stefanův-Boltzmannův zákon v modifikovaném tvaru užívaném pro technické výpočty.
3. Vysvětlete pojmy sálavost a vzájemná sálavost a ukažte, jak se uplatňují ve vztazích určujících přenos tepla zářením.

56,4 Témata k opakování a příklady aplikace

1. Válcové potrubí, jímž se vede pára, je obklopeno azbestovým tepelně izolujícím obalem. Vnější povrch obalu má teplotu $t_2 = 50\,°C$, vnitřní povrch (přiléhající k potrubí) má teplotu $t_1 = 120\,°C$. Potrubí je dlouhé $l = 65$ m, vnější poloměr azbestového obalu $r_2 = 6{,}5$ cm, vnitřní poloměr $r_1 = 3{,}5$ cm. Vypočtěte ztráty vedením tepla do okolí za $\tau = 24$ h. Koeficient tepelné vodivosti obalu $\lambda = 0{,}21\ \mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$.

Návod řešení:

Hustota tepelného toku je $J_Q = -\lambda\, dt/dr$. Množství tepla Q, které projde za dobu τ povrchem válce o poloměru r a délce l, je $Q = 2\pi\, rlJ_Q\tau = -2\pi\, rl\tau\lambda\, dt/dr$, a tedy $Q\, dr/r = -2\pi\, l\tau\lambda\, dt$. Integrací

$$Q = \frac{2\pi l\tau(t_2 - t_1)}{\ln(r_1/r_2)} = 840\,000\,(\mathrm{J})\,.$$

2. Určete ztrátové teplo jednotkové plochy cihlové obezdívky pece a obě povrchové teploty obezdívky. Teplota v peci je 610 °C, teplota okolí 40 °C, tloušťka obezdívky $d = 25$ cm a koeficient tepelné vodivosti cihel $\lambda = 0{,}5\ \mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$. Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně pece $\alpha_1 = 21{,}4\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$ a na vnější straně $\alpha_2 = 9{,}63\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$.

$$\left[I_Q = k(t_1 - t_2) = \frac{1}{1/\alpha_1 + d/\lambda + 1/\alpha_2}(t_1 - t_2) = 1240\ \mathrm{W\,m^{-2}}\,,\right.$$

$$\left. t_1' = 557\ ^\circ\mathrm{C}\,,\quad t_2' = 168\ ^\circ\mathrm{C}\,.\right]$$

3. Jaký je teplotní rozdíl mezi vnitřním a vnějším povrchem trubky délky $l = 1{,}5$ m, je-li vnější poloměr 6 cm, vnitřní poloměr 5 cm, součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 45\ \mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$. Vnějším povrchem trubky proudí teplo 4500 W.

$$\left[t_2 - t_1 = \frac{Q(\ln r_2 - \ln r_1)}{l\tau\, 2\pi\lambda} = 1{,}94\,(\mathrm{K})\,.\right]$$

4. Měděná tyč délky 0,18 m a průřezu $4 \,.\, 10^{-4}\ \mathrm{m^2}$ zasahuje jedním koncem do parní lázně, druhým koncem do směsi vody a tajícího ledu. Válcový povrch tyče je tepelně izolován. Určete tepelný tok protékající tyčí. Jaká je teplota v místě 40 mm vzdáleném od chladnějšího konce? Tepelná vodivost mědi je $\lambda = 385\ \mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$. [$I_Q = 85{,}85$ W, $t = 22{,}22$ °C.]

5. Ocelovou trubkou, jejíž vnitřní průměr je 30 mm a vnější 50 mm, protéká voda o konstantní teplotě 81,3 °C. Vypočtěte teplotu na vnějším povrchu trubky, jejíž plocha je rovna 0,8 $\mathrm{m^2}$, projde-li jí každou minutu 5 MJ tepla. ($t = 60$ °C)

6. Kolik tepla propustí za 1 h cihlová stěna tloušťky $d = 20$ cm a plochy $S = 30\ \mathrm{m^2}$, je-li teplota venkovní strany -20 °C. Tepelná vodivost materiálu stěny $\lambda = 0{,}544\ \mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$ a teplota vnitřní strany je 15 °C.

$$\left[Q = \frac{(t_2 - t_1)\, S\tau\lambda}{d} = 1{,}03 \,.\, 10^7\,(\mathrm{J})\,.\right]$$

7. Určete množství tepla, které předá povrch kamen okolnímu vzduchu za 24 h. Teplota kamen je 120 °C, teplota vzduchu 20 °C, povrch kamen 3 $\mathrm{m^2}$. Součinitel přestupu tepla pro povrch kamen závisí na teplotě podle vztahu

$$\alpha = A + Bt\,,\quad \text{kde}\quad A = 9{,}8\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}\quad \text{a}\quad B = 0{,}07\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-2}}\,.$$

$$[\alpha = 18{,}2\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}\,,\quad Q = \alpha\,\Delta t S\tau = 4{,}717 \,.\, 10^8\,(\mathrm{J})\,.]$$