

Termodynamika nevratných procesů

1 Nevratný proces

2 Přenosové jevy

2.1 Sdílení tepla

2.1.1 Tepelný tok

Hustota tepleného toku

Celkový tepelný tok

2.2 Sdílení tepla vedením

3 Tepelná vodivost

3.1 Wiedemannův-Franzův zákon

4 Tepelný odpor

5 Sdílení tepla prouděním

6 Sdílení tepla zářením

7 Přestup tepla

8 Prostup tepla

Součinitel prostupu tepla

9 Absorpce tepla

10 Difuze

Samodifuze

Tepelná difuze

10.1 Fickovy zákony

První Fickův zákon

Druhý Fickův zákon

Difuzní součinitel

10.2 Transfuze

10.3 Osmóza

Osmotický tlak

T0 Termodynamika nevratných procesů

Procesy, které probíhají přirozeně, nemohou nikdy samy od sebe proběhnout opačným směrem. Takové procesy nazýváme nevratné procesy.

Příklad: Nevratné procesy začínají nějakým vnějším zásahem, který poruší rovnováhu. Například ohřejeme kousek kovu v plameni. Potom začne probíhat samovolný nevratný proces, při kterém kousek kovu bude chladnout tak dlouho, dokud jeho teplota neklesne na teplotu okolí čili dokud nebude dosaženo rovnovážného stavu.

Při pomalých procesech lze nerovnovážnou soustavu rozdělit na rovnovážné makroskopické části, které jsou v daném okamžiku charakterizovány konstantní termodynamickou teplotou, hustotou apod. Mezi těmito částmi existuje v každém okamžiku nenulový gradient teploty, hustoty apod. S těmito gradienty je spojen přenos hmotnosti, energie apod. v průběhu nevratného procesu. Při každém nevratném procesu roste entropie termodynamické soustavy.

Makroskopické proudy (tepelný tok, hmotnostní tok, elektrický proud), které vznikají jako následek gradientů, lze při nepříliš velkých gradientech vyjádřit jako lineární funkce těchto gradientů. Mezi nevratné procesy, kterým budeme věnovat pozornost, patří

- tepelná vodivost,
- difuze,
- elektrická vodivost.

T1 Nevratný proces

Nevratný proces, též **nevratný děj (ireverzibilní děj)**, probíhá po narušení stavu **termodynamické rovnováhy soustavy** vnějším zásahem v tom případě, kdy proces nemůžeme považovat za **kvazistatický děj**. Mezi nevratné patří všechny procesy probíhající v přírodě a v živých organismech.

Dojde-li k narušení stavu termodynamické rovnováhy soustavy proběhnou v ní nevratné procesy nazývané též **relaxační procesy**, během kterých soustava přejde do **rovnovážného stavu**. Relaxační procesy nejsou kvazistatickými ději. Srovnej s **vratným procesem**.

V průběhu těchto procesů dochází v soustavě k vyrovnání hustoty, koncentrací, **termodynamické teploty** apod. Všechny tyto **relaxační procesy jsou spojeny s určitými makroskopickými proudy uvnitř soustavy**:

- s hmotnostním tokem,
- s tepelným tokem,
- s tokem elektrického náboje, tj. s elektrickým proudem apod.

Při **pomalých procesech** lze nerovnovážnou soustavu rozdělit na rovnovážné makroskopické části, které jsou v daném okamžiku charakterizovány konstantní termodynamickou teplotou, hustotou, koncentracemi jednotlivých **složek** apod. Mezi těmito částmi existuje v každém okamžiku nenulový **gradient koncentrace**, teploty, elektrického potenciálu aj. **S těmito gradienty je spojen přenos hmotnosti, energie a elektrického náboje v průběhu procesu**.

Makroskopické proudy (jsou charakterizovány veličinami **tepelný tok**, **hmotnostní tok**, **elektrický proud**) vznikají jako následek **gradientů**; při nepříliš velkých gradientech je lze vyjádřit jako lineární funkce těchto gradientů. Příkladem je **Fourierův zákon** pro **tepelnou vodivost**, **Fickův zákon** pro **difuzi** a **Ohmův zákon** pro **elektrickou vodivost**.

Obvykle dochází k superpozici jednotlivých procesů, např. **teplotní gradient** vyvolá nejen **tepelný tok**, ale i hmotnostní tok (**tepelnou difuzi**) a **elektrický proud (termoelektrické jevy)**. Každý z proudů, tj. hmotnostní tok, elektrický proud apod., lze vyjádřit jako lineární funkci gradientů jednotlivých makroskopických veličin, tj. konkrétně gradientu koncentrace, gradientu elektrického potenciálu, gradientu termodynamické teploty atd.

Fenomenologická teorie nevratných procesů se zabývá nalezením obecných vztahů mezi jednotlivými proudy. Základní vztah, tzv. **relaci reciprocity této teorie**, odvodil L. **Onsager (1931)**.

Viz též **entropie**.

T2 Přenosové jevy

Přenosové jevy, též **transportní jevy**, jsou **nevratnými procesy**. Název transportní je odvozen z toho, že při nich dochází k přenosu (transportu) hmotnosti, hybnosti energie, elektrického náboje apod.

Mezi přenosové jevy patří např.:

- [viskozita](#) tekutin,
- [tepelná vodivost](#),
- [difuze](#),
- [elektrická vodivost](#).

T2.1 Sdílení tepla

Sdílení tepla, též **přenos vnitřní energie (přenos tepla)**, je samovolný **nevratný proces** šíření tepla v prostoru s nehomogenním teplotním polem. Dříve byl používán pojem *přenos tepla*.

Sdílení tepla se uskutečňuje:

- vedením neboli kondukcí (viz [sdílení tepla vedením](#)),
- prouděním neboli konvekcí (viz [sdílení tepla prouděním](#)),
- zářením neboli radiací (viz [sdílení tepla zářením](#)).

V praxi se sdílení tepla vedením a prouděním nevyskytují samostatně vůbec anebo jen zřídka. Většinou je jeden způsob sdílení tepla doprovázen způsobem dalším.

Viz též [tepelná vodivost](#).

T2.1.1 Tepelný tok

Tepelný tok, značka Φ , vyjadřuje rychlost průchodu tepla danou plochou nebo také **výkon** přenášený při průchodu tepla danou plochou:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt},$$

kde dQ je teplo, které projde zvolenou plochou za čas dt . Dříve byla používána pro tepelný tok značka q .

Tepelný tok je tedy číselně roven teplu, které projde danou plochou za jednotku času. Jednotkou SI tepelného toku je [watt](#), značka W.

Ztrátový tepelný tok Φ_z je tepelný výkon, který uniká z nějakého zařízení do okolí a není využit pro účel, jemuž zařízení slouží. Termín **tepelné ztráty**, dosud často používaný pro ztrátový tepelný tok, není vhodný.

Hustota tepelného toku

Hustota tepelného toku, též **plošná hustota tepelného toku**, značka \vec{q} nebo $\vec{\varphi}$, v daném místě je vektor, jehož velikost q se rovná podílu tepelného toku $d\Phi$ procházejícího v daném okamžiku zvolenou elementární plochou kolmou ke směru průchodu tepla a plošného obsahu dS_n této plochy:

$$q = \frac{d\Phi}{dS_n}$$

Směr vektoru \vec{q} je určen směrem **sdílení tepla**, proto je kolmý k ploše dS_n .

Velikost hustoty tepelného toku je rovna tepelnému toku, který prochází jednotkovou plochou kolmou na směr přenosu tepla. Jednotkou SI hustoty tepelného toku je W/m^2 .

Hustota tepelného toku je takto definována lokálně (bodově).

Celkový tepelný tok

Celkový tepelný tok Φ procházející orientovanou plochou o **plošném obsahu S** je určen vztahem:

$$\Phi = \int_S \vec{q} \cdot \vec{e}_n dS,$$

kde $\vec{e}_n dS$ je vektorový element této plochy, jehož velikost je rovna jeho plošnému obsahu dS , a \vec{e}_n je jednotkový vektor ve směru normály k ploše v místě, kde je její element určen.

T2.2 Sdílení tepla vedením

Sdílení tepla vedením, též **sdílení tepla kondukcí**, je způsob sdílení tepla z teplejších míst pevné látky nebo klidné tekutiny k chladnějším místům předáváním energie z částice (molekuly, iontu, atomu apod.) na jinou částici, aniž jsou v pohybu makroskopické části látky.

Pro sdílení tepla vedením v **homogenním prostředí** platí **Fourierův zákon**, podle něhož **hustota tepelného toku \vec{q}** je úměrná **teplotnímu gradientu**

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } T,$$

kde $\text{grad } T$ je **gradient termodynamické teploty T** (viz **gradient**) v témže místě látky a λ je součinitel tepelné vodivosti.

Záporné znaménko ve vztahu vyjadřuje, že **tepelný tok** má opačný směr než růst teploty (**teplotní gradient**).

Při jednorozměrném sdílení tepla vedením ve směru osy x je

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}.$$

Podíl dT/dx je **teplotní gradient** ve směru osy x , značka $\text{grad } T$. Konstanta úměrnosti λ je **součinitel tepelné vodivosti**.

Součinitel tepelné vodivosti λ je roven podílu hustoty tepelného toku q a teplotního gradientu $\text{grad } T$:

$$\lambda = \frac{q}{\text{grad } T}.$$

Charakterizuje schopnost dané látky sdílet teplo vedením (viz [tepelná vodivost](#)). Jednotkou SI součinitele tepelné vodivosti λ je $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Obecně součinitel tepelné vodivosti závisí na termodynamické teplotě, tlaku a složení látky a určuje se zpravidla měřením hustoty tepelného toku, gradientu teploty a výpočtem z Fourierova zákona.

Je-li v daném místě termodynamická teplota T v čase konstantní, ale v jiných místech je rozdílná (teplota je funkcí polohy, ale ne funkcí času), je **sdílení tepla vedením ustálené (stacionární)**.

Mění-li se teplota T při vyrovnávání teplotních rozdílů v tělese, je **sdílení tepla vedením neustálené (nestacionární)**. Jedná se o změny teploty v daném místě s časem, tj. termodynamická teplota T daného místa homogenního prostředí je v tomto případě funkcí souřadnic a času:

$$T = T(x, y, z; t).$$

Nejsou-li v daném místě zdroje tepla, potom neustálené sdílení tepla vedením v homogenním prostředí v trojrozměrném případě popisuje **Fourierova rovnice vedení tepla**:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

kde t je čas, x, y, z **kartézské souřadnice** a a součinitel teplotní vodivosti látky.

Součinitel teplotní vodivosti je definován vztahem

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p},$$

kde λ je [součinitel tepelné vodivosti](#), ρ **hustota** a c_p [měrná tepelná kapacita](#) při stálém tlaku. Jednotkou SI součinitele teplotní vodivosti je čtverečný metr za sekundu, značka m^2/s .

Je-li v daném místě zdroj tepla charakterizován tepelným výkonem, pak **Fourierova rovnice**, tzv. **obecná rovnice vedení tepla** v homogenním prostředí, má tvar:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c_p \rho} q_0,$$

kde q_0 je výkon, s jakým je teplo generováno v látce o jednotkovém objemu (za 1 s).

T3 Tepelná vodivost

1. **Tepelná vodivost** je vlastnost látky projevující se tím, že se jí může sdílet teplo vedením.

2. **Tepelná vodivost** je fyzikální veličina, značka G . Celková tepelná vodivost G je převrácenou hodnotou celkového tepelného odporu (tepelného odporu tělesa) R ,

$$G = \frac{1}{R}.$$

Jednotkou SI tepelné vodivosti je watt na kelvin, značka W/K.

Plošná tepelná vodivost

Plošná tepelná vodivost (*tepelná propustnost*) Λ je převrácenou hodnotou plošného tepelného odporu při vedení tepla (tepelné insulance) R_λ ,

$$\Lambda = \frac{1}{R_\lambda}.$$

Plošná tepelná vodivost je jednoznačně definována, stejně jako veličina tepelná insulance R_λ , pouze tehdy, je-li hustota tepelného toku v daném tělese nebo jeho části konstantní (viz tepelný odpor). Jednotkou SI plošné tepelné vodivosti je $W/(m^2 \cdot K)$.

Vodič tepla

Vodič tepla, též **tepelný vodič**, je látka s nezanedbatelným součinitelem tepelné vodivosti λ (viz sdílení tepla vedením).

- Látky s velkým součinitelem tepelné vodivosti jsou **dobrymi vodiči tepla**. Patří mezi ně **kovy**, zvláště čisté kovy, např. stříbro, měď, neboť u nich vedení tepla uskutečňují hlavně **volné elektrony** (viz Wiedemannův-Franzův zákon).
- Ostatní pevné látky kromě tuhy mají podstatně menší součinitel tepelné vodivosti než kovy.
- Nejmenší součinitel tepelné vodivosti mají **plyny**. Proto také **pevné látky, v nichž je velký počet malých mezer nebo dutin (pórů)** obsahujících vzduch, vedou teplo velmi špatně. Používají se jako dobré **tepelné izolanty**, například skelná nebo čedičová vlna, korek apod. Tepelná vodivost takových látek však značně závisí na jejich vlhkosti. Rozlišuje se u nich proto **součinitel tepelné vodivosti suché látky** λ_s a **součinitel tepelné vodivosti vlhké látky** λ_v .

Součinitel tepelné vodivosti závisí sice obecně na teplotě, ale obvykle se mění jen málo, takže při většině praktických výpočtů se pokládá v malých teplotních intervalech za konstantní.

Plošná tepelná vodivost uzavřené vzduchové vrstvy viz tepelný odpor.

Tepelný odpor

Tepelný odpor, značka R , je podíl teplotního rozdílu a tepelného toku.

Obecně je to odpor, který klade objekt (těleso, pevná přepážka mezi dvěma tekutinami, rozhraní dvou látek, uzavřená vzduchová vrstva apod.) [sdílení tepla](#) (srovnej [tepelná vodivost](#), [sdílení tepla](#)).

Kvantitativně je tepelný odpor vyjádřen veličinami definovanými různými způsoby podle toho, k jakému objektu se vztahují.

Celkový tepelný odpor

Celkový tepelný odpor, též **tepelná rezistance** (**tepelný odpor tělesa**) R je podíl teplotního rozdílu ΔT mezi dvěma izotermickými plochami (plochami konstantní teploty) a [tepelného toku](#) Φ procházejícího od jedné z nich ke druhé,

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

Jednotkou SI tepelného odporu je kelvin na watt, značka K/W.

Plošný tepelný odpor

Veličina **plošný tepelný odpor** (**tepelná insulance**) R_λ vyjadřuje tepelný odpor plošné jednotky daného objektu

$$R_\lambda = \frac{\Delta T}{q},$$

kde ΔT je teplotní rozdíl mezi dvěma rovnoběžnými izotermickými rovinami a q je [hustota tepelného toku](#) mezi nimi. Pro veličinu plošný tepelný odpor byl dříve používán nevhodný termín [měrný tepelný odpor](#).

Pro rovinnou homogenní vrstvu, kterou prochází ustálený tepelný tok mezi jejími povrchy vzdálenými o tloušťku vrstvy d , platí

$$R_\lambda = \frac{d}{\lambda},$$

kde λ je [součinitel tepelné vodivosti](#) látky tvořící tuto vrstvu.

Je-li **rovinná stěna tvořena n rovnoběžnými rovinnými vrstvami**, z nichž každá je vytvořena [homogenní látkou](#), potom plošný tepelný odpor pro vedení tepla R_λ ve směru kolmém k vrstvám (tzv. sériové zapojení vrstev) pro celou tuto stěnu je roven součtu plošných tepelných odporů vedení tepla všech jednotlivých vrstev.

Pro **plošný tepelný odpor pro vedení tepla R_λ** ve směru kolmém k vrstvám platí vztah:

$$R_{\lambda} = \sum_{i=1}^n R_{\lambda i},$$

kde $R_{\lambda i} = \frac{d_i}{\lambda_i}$ je plošný tepelný odpor pro i -tou vrstvu, d_i její tloušťka a λ_i součinitel tepelné vodivosti látky tvořící tuto vrstvu.

Plošný tepelný odpor při přestupu tepla

Plošný tepelný odpor R_{α} při přestupu tepla vyjadřuje tepelný odpor plošné jednotky rozhraní dvou látek různého skupenství,

$$R_{\alpha} = \frac{\Delta T}{q},$$

kde ΔT je rozdíl termodynamických teplot těchto látek a q je hustota tepelného toku procházejícího rozhraním.

Převrácená hodnota plošného tepelného odporu při přestupu tepla R_{α} se nazývá součinitel přestupu tepla ($\alpha = 1/R_{\alpha}$). Viz též přestup tepla.

Plošný tepelný odpor při prostupu tepla

Plošný tepelný odpor R_K při prostupu tepla vyjadřuje tepelný odpor plošné jednotky přepážky (vrstvy) a obou rozhraní této přepážky s tekutinami, které odděluje, při sdílení tepla mezi dvěma tekutinami oddělenými od sebe homogenní pevnou přepážkou ve tvaru desky, například stěnou. Platí

$$R_K = R_e + R_{\lambda} + R_i,$$

kde R_e a R_i jsou plošné tepelné odpory přestupu tepla na vnější a na vnitřní straně přepážky (stěny) a R_{λ} je plošný tepelný odpor přestupu tepla přepážkou.

Převrácená hodnota plošného tepelného odporu při prostupu tepla R_K se nazývá součinitel prostupu tepla ($K = 1/R_K$). Ve stavebnictví se tato veličina nazývá tepelná prostupnost a značí se U . Jednotkou SI je $W/(m^2 \cdot K)$.

Plošný tepelný odpor uzavřené vzduchové vrstvy

Veličina plošný tepelný odpor uzavřené vzduchové vrstvy R_{vv} se používá při určování sdílení tepla mezi dvěma rovnoběžnými rovinnými povrchy stěn, mezi nimiž je uzavřena vzduchová vrstva.

Vyjadřuje tepelný odpor plošné jednotky vzduchové vrstvy a povrchů stěn.

Vztah pro tepelný odpor plošné jednotky vzduchové vrstvy a povrchů stěn:

$$R_{vv} = \frac{\Delta T}{q_{vv}},$$

kde ΔT je rozdíl [termodynamických teplot](#) povrchů stěn a q_{vv} je hustota ustáleného tepelného toku procházejícího vzduchovou vrstvou od povrchu jedné stěny ke druhé a zahrnujícího [sdílení tepla vedením](#), [sdílení tepla prouděním](#) i [sdílení tepla sáláním](#) (viz [sdílení tepla](#)).

Jednotkou SI veličin R_{λ} , R_{α} , R_K , R_{vv} je $\text{m}^2 \cdot \text{K}$. Veličiny R_{λ} a R_K jsou jednoznačně definovány pouze tehdy, je-li [hustota tepelného toku](#) mezi oběma izotermickými rovinami nebo v prostoru mezi oběma tekutinami konstantní.

Viz též [tepelná vodivost](#).

Sdílení tepla prouděním

Sdílení tepla prouděním, též **sdílení tepla konvekcí**, je sdílení tepla tekutinou při jejím proudění. Vzniká

- rozdílem hustoty v tekutině, například při jejím zahřívání zdola, tzv. **volné nebo přirozené proudění**,
- vlivem vnějších účinků nezávislých na sdílení tepla (čerpadlem, ventilátorem apod.), tzv. **nucené proudění** (obvykle **turbulentní proudění**), využívané k zesílení sdílení tepla prouděním a k rychlejšímu vyrovnání [termodynamických teplot](#) T v tekutině.

Sdílení tepla prouděním se uplatňuje při přechodu tepla z tekutiny do pevného tělesa nebo obráceně. Přitom vznikne vždy podél pevné stěny ve směru proudu tekutiny tenká vrstva zvaná tepelná **mezní vrstva**, ve které se teplota proudu mění od teploty stěny T_p do hodnoty velmi blízké teplotě neovlivněného proudu T_{∞} . Mezní vrstva se vytváří **adhezí**, tj. přilnavostí molekul tekutiny k povrchu pevného tělesa. V praxi se předpokládá, že tloušťka této vrstvy je taková vzdálenost od povrchu, kde platí $T = 0,99T_{\infty}$. Sdílení tepla v této vrstvě je v podstatě jen vedením. Pro malou tepelnou vodivost tekutin tvoří mezní vrstva hlavní **tepelný odpor** pro **přestup tepla** a vzniká v ní význačný **teplotní gradient**. Vliv sdílení tepla prouděním i vedením, zejména v mezní vrstvě, bývá zahrnut v **součiniteli přestupu tepla** α , takže při teplotním rozdílu ΔT mezi tekutinou a stěnou **hustota tepelného toku** $q = \alpha \Delta T$.

Sdílení tepla zářením

Sdílení tepla zářením, též **sdílení tepla sáláním**, je způsob sdílení tepla uskutečňovaný **elektromagnetickým zářením**.

Tělesa při teplotách nižších než asi $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyzařují elektromagnetické záření v oblasti dlouhovlnné (infračervené), takže je toto záření neviditelné. Toto záření se často nazývá **tepelné záření**. Je stejné povahy jako **světlo**, čili patří do elektromagnetického záření. Proto ke sdílení tepla zářením není nutné hmotné prostředí, může probíhat i ve vakuu, například Slunce tímto způsobem ohřívá Zemi.

Viz [Planckův zákon vyzařování](#), [sdílení tepla](#), [Stefanův-Boltzmannův zákon vyzařování](#).

Přestup tepla

Přestup tepla je [sdílení tepla](#) rozhraním dvou látek různého [skupenství](#), např. pevné látky a kapaliny, plynu a kapaliny apod.

Součinitel přestupu tepla, značka h , též α , veličina používaná při určování [přestupu tepla](#) rozhraním dvou látek různého skupenství, je rovna podílu [hustoty tepelného toku](#) q procházejícího rozhraním a rozdílu [termodynamických teplot](#) ΔT (resp. [Celsiových teplot](#) Δt) obou látek,

$$h = \frac{q}{\Delta T} = \frac{1}{R_\alpha},$$

kde R_α je [plošný tepelný odpor](#) přestupu tepla rozhraním (viz [tepelný odpor](#)).

Součinitel přestupu tepla lze podle poslední normy ČSN ISO 31-4 zavést vztahem

$$q = h(T_s - T_r),$$

kde T_s je teplota povrchu a T_r je referenční teplotní charakteristika vnějšího okolí.

Součinitel přestupu tepla je velmi složitá funkce řady veličin, které přestup tepla ovlivňují. Při teoretických výpočtech součinitele přestupu tepla se používá teorie podobnosti.

Součinitel přestupu tepla je obecně součtem součinitele přestupu tepla při proudění h_p a součinitele přestupu tepla při záření h_r , $h = h_p + h_r$. Jednotkou SI součinitele přestupu tepla je watt na čtverečný metr a kelvin, značka $W/(m^2 \cdot K)$.

Porovnejte se [součinitelem prostupu tepla](#), viz též [tepelný odpor](#).

Prostup tepla

Prostup tepla je kombinovaný případ [sdílení tepla](#) mezi dvěma tekutinami (plyn, pára, kapalina) oddělenými vrstvou (stěnou), viz obrázek *Prostup tepla*.

Obr. (F_5_14_8_1_a1_1.tif)
Prostup tepla
;obrázek ve Slovníku 5:28 na str. 260

Z teplejší tekutiny o [termodynamické teplotě](#) T_1 do pevné stěny přechází teplo konvekcí, kondukcí a zářením (viz [sdílení tepla vedením](#), [sdílení tepla prouděním](#), [sdílení tepla zářením](#)). Pevnou stěnou prostupuje teplo kondukcí a do chladnější tekutiny o teplotě T_2 opět konvekcí, kondukcí a sáláním. Povrchové teploty stěny se neshodují s teplotami tekutin (viz [mezí vrstva](#)). Teplota stěny na straně teplejší tekutiny je $T_1' < T_1$ a na straně chladnější tekutiny $T_2' > T_2$. Bez teplotního gradientu by sdílení tepla mezi tekutinami a stěnou nebylo možné.

[Tepelný tok](#) Φ , který prostoupí rovinnou stěnou z tekutiny o vyšší [termodynamické teplotě](#) T_1 do tekutiny o nižší teplotě T_2 při ustáleném tepelném toku, závisí na plošném obsahu S teplosměnné plochy, na rozdílu termodynamických teplot obou prostředí a na [součiniteli prostupu tepla](#) K . Platí

$$\Phi = KS(T_1 - T_2).$$

Viz též [tepelná vodivost](#), [součinitel přestupu tepla](#).

Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla, značka K , je veličina používaná při určování sdílení tepla mezi dvěma tekutinami oddělenými od sebe pevnou přepážkou z [homogenní látky](#) ve tvaru desky, například stěnou (viz [prostup tepla](#)).

Součinitel prostupu tepla je dán podílem [hustoty tepelného toku](#) a [teplotního gradientu](#). Můžeme jej vypočítat z převrácené hodnoty [plošného tepelného odporu](#) R_K [prostupu tepla](#) přepážkou z jedné tekutiny do druhé, $K = 1/R_K$.

Přitom

$$R_K = R_e + R_\lambda + R_i,$$

kde $R_e = 1/h_e$ a $R_i = 1/h_i$ je plošný tepelný odpor prostupu tepla na vnější a na vnitřní straně přepážky (stěny), h_e a h_i je [součinitel přestupu tepla](#) na její vnější a její vnitřní straně a R_λ je plošný tepelný odpor přepážky (viz [tepelný odpor](#)).

Součinitel prostupu tepla je jednoznačně definován, stejně jako plošný tepelný odpor R_K , pouze tehdy, je-li hustota tepelného toku v prostoru mezi oběma tekutinami konstantní.

Jednotkou SI součinitele prostupu tepla je watt na čtverečný metr a kelvin, značka $W/(m^2 \cdot K)$.

Absorpce tepla

Absorpce tepla, též **absorpce tepelného záření (pohlcování tepelného záření)**, se řídí **Kirchhoffovým zákonem vyzařování**, podle něhož u libovolného tělesa vydávajícího **tepelné záření** je podíl **intenzity vyzařování** H_e a **pohltivosti** α funkcí pouze **termodynamické teploty** T tělesa,

$$\frac{H_e}{\alpha} = f(T),$$

a podíl **spektrální hustoty intenzity vyzařování** H_λ a **monochromatické pohltivosti** α_λ je funkcí jen termodynamické teploty a příslušné vlnové délky λ ,

$$\frac{H_\lambda}{\alpha_\lambda} = F(\lambda, T),$$

přičemž funkce f a F jsou stejné pro všechna tělesa, tedy i pro **černé těleso**. Tvar funkce f udává **Stefanův-Boltzmannův zákon vyzařování** a tvar funkce F **Planckův zákon vyzařování**.

Difuze

Difuze je samovolné pronikání **molekul (atomů, iontů aj.)** z oblasti vyšší koncentrace do oblasti nižší koncentrace vlivem **tepelného pohybu** částic (atomů, molekul, skupin molekul) a jejich srážek. Jedná se o přenos látky ve směru proti **gradientu koncentrace**.

Difuzí se uskutečňují všechny mezifázové procesy (viz **fáze**), například vznik **roztoků**, **absorpce plynů** atd.

Difuze probíhá ve všech třech skupenstvích, nejrychleji v plynném a nejpomaleji v pevném. Rychlost difuze se řídí **Fickovými zákony**, její mírou je **difuzní součinitel**.

Difuze je typický **nevratný proces** spojený se vzrůstem **entropie**. V metalurgii je difuze jedním z nejdůležitějších dějů při tuhnutí kovů a **slitin** a při jejich tepelném a tepelně chemickém zpracování.

Difuze v kovech probíhá tak, že atomy difundujícího prvku vnikají do porušené mřížky jiného kovu, buď do polohy mimo mřížku, nebo do vzniklého volného místa. Možnost vniknutí atomu nového prvku do struktury jiného kovu závisí hlavně na jeho rozměrech. Prvek s malým poloměrem atomu difunduje do mřížky kovu s větším poloměrem atomu snadněji. Příkladem je difuze uhlíku a dusíku do železa.

Difuze v mikroelektronice je technologický proces, kterým se dosahuje v **polovodiči** vytvoření funkčních oblastí s požadovanými vlastnostmi. Difuzí se dostávají do krystalové mřížky materiálu vhodné **příměsi**, jako antimon, fosfor, arzen, gallium, bor, které vytvářejí oblasti s požadovaným typem vodivosti. Difuzí lze vytvářet všechny druhy funkčních prvků **obvodů** v pevné fázi.

Samodifuze

Termín *samodifuze* se používá ve dvou významech:

1. Samodifuze je difuze molekul (atomů, iontů, apod.) téhož druhu v čistém jednosložkovém plynu, který obsahuje molekuly s označenými atomy.
2. Samodifuze je difuze atomů téhož druhu v **krystalové mřížce**. Podstatou této samodifuze je vyrovnávání kinetických energií **tepelného pohybu** jednotlivých atomů. Samodifuze ovlivňuje růst krystalů nové modifikace, který pokračuje přesuny atomů tak dlouho, až se původní fáze zcela spotřebuje. Samodifuzí také rostou zrna při ohřevu kovu.

Viz též **tepelná difuze**, **Grahamův zákon**.

Tepelná difuze

Tepelná difuze, též **termodifuze**, je **difuze**, která nastává v **homogenní směsi** dvou **tekutin**, jestliže **termodynamická teplota** není ve všech místech stejná. Je-li v takové směsi **teplotní gradient**, pak molekuly lehčí složky difundují ve směru gradientu (ve směru rostoucí teploty) a molekuly těžší složky směsi naopak, tj. ve směru klesající teploty. Tím se složení směsi mění, až dosáhne určitého **rovnovážného stavu**. Takto se dělí např. plynné **izotopy**.

V ustáleném stavu dvousložkové **směsi**, v níž dochází k tepelné difuzi, platí vztah

$$\text{grad } x_B = -\frac{k_T}{T} \text{grad } T,$$

kde x_B je **molární zlomek** těžší látky B (látky o větší hustotě), k_T je **poměr tepelné difuze** (bezrozměrová veličina) a T místní termodynamická teplota.

Tepelnou difuzi dvousložkové směsi v ustáleném stavu charakterizuje **činitel tepelné difuze**

$$\alpha_T = \frac{k_T}{x_A x_B},$$

kde k_T je poměr tepelné difuze, x_A a x_B jsou místní molární zlomky obou látek. Jednotkou činitele tepelné difuze je jedna.

Pro veličinu **součinitel tepelné difuze** platí vztah

$$D_T = k_T D,$$

kde D je **difuzní součinitel** a k_T **poměr tepelné difuze**. Jednotkou součinitele tepelné difuze je m^2/s .

Fickovy zákony

Fickovy zákony jsou základními zákony difuze kapalných a plynných látek.

První Fickův zákon

První Fickův zákon: Látkové množství rozpuštěné látky, která projde za časovou jednotku jednotkovým průřezem (plocha průřezu je kolmá ke gradientu koncentrace), dn/dt , je přímo úměrné gradientu koncentrace látkového množství rozpuštěné látky $(\partial c/\partial x)_t$,

$$\frac{dn}{dt} = -D \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_t,$$

čili hustota difuzního toku v daném místě a v daném okamžiku je přímo úměrná gradientu koncentrace látkového množství rozpuštěné látky. Konstanta úměrnosti je difuzní součinitel D .

Existuje také jiné vyjádření tohoto zákona.

Pro hmotnostní tok rozpuštěné látky lze první Fickův zákon matematicky vyjádřit také takto:

$$Q_m = -DS \frac{d\rho}{dx},$$

kde Q_m je hmotnostní tok difundující látky ($Q_m = dm/dt$), S plošný obsah, $d\rho/dx$ gradient hmotnostní koncentrace (ρ je hmotnostní koncentrace rozpuštěné látky).

Druhý Fickův zákon

Druhý Fickův zákon vyjadřuje změnu gradientu koncentrace s časem.

Mění-li se koncentrace s časem, potom je časová změna koncentrace určena vztahem

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right)$$

pro $D = konst.$, čili časová změna koncentrace ve zvolené vrstvě je úměrná změně gradientu koncentrace v této vrstvě.

Druhý Fickův zákon umožňuje určit rozložení koncentrace v závislosti na čase a na vzdálenosti x od dané vztažné roviny.

Předpokládáme, že koncentrace $c = f(x, t)$. Potom vyjádříme časovou změnu hmotnostní koncentrace vztahem:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \right).$$

Difuzní součinitel

Difuzní součinitel, též *difuzivita*, značka D , je veličina charakterizující rychlost difuze. Dříve byl používán termín *difuzní koeficient*.

Difuzní součinitel je zaveden rovnicí

$$C_B \langle v_B \rangle = -D \text{grad } C_B,$$

kde C_B je místní molekulová koncentrace látky B ve směsi a $\langle v_B \rangle$ je místní sřední rychlost molekul látky B.

Difuzní součinitel představuje vlastně látkové množství rozpuštěné látky, která projde za časovou jednotku jednotkovým průřezem při jednotkovém koncentračním gradientu.

Jednotkou SI difuzního součinitele je metr na druhou za sekundu, značka m^2/s , obvykle se však difuzní součinitelé udávají v cm^2/s .

Difuzní součinitel je obecně funkcí teploty, tlaku a složení směsi. Pro odhad difuzního součinitele D existuje řada empirických a semiempirických vztahů. Například pro difuzi ve zředěných roztocích koloidních částic nebo polymerů se používá Stokesovy-Einsteinovy rovnice

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta_2 r_1},$$

kde k je Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota, η_2 je viskozita disperzního prostředí, r_1 je poloměr disperzní částice.

Viz též Fickovy zákony.

Transfuze

Transfuze je vzájemné pronikání molekul (atomů, iontů apod.) plynů pórovitými stěnami nebo blanami, které plyny oddělují, i když je tlak na obou stranách stěny stejný, způsobené tepelným pohybem molekul.

Rychlost transfuze se řídí přibližně **Grahamovým zákonem** (1846): Dva plyny oddělené od sebe průlničitou stěnou pronikají do sebe rychlostmi v_1 a v_2 , které jsou nepřímo úměrné druhým odmocninám z jejich hustot ρ_1 a ρ_2 nebo molárních hmotností M_1 a M_2 :

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}.$$

Plyn o menší hustotě tedy **difunduje rychleji**.

Totéž platí pro rychlost průtoku plynů úzkou trubičkou **při stejném tlaku**, ale jen tehdy, když **střední volná dráha** unikajících plynů je alespoň desetkrát větší než průměr otvoru (viz [Knudsen](#)).

Průchodu molekul plynu přes jemné pórovité přepážky se užívá k oddělení těkavých sloučenin **izotopů** téhož prvku. Na jevu transfuze jsou založeny indikátory třaskavých plynů v dolech.

Osmóza

Osmóza je samovolné pronikání kapaliny přes polopropustnou membránu, např. přes pórovitou stěnu, živočišnou blánu, umělou polopropustnou blánu apod.

Molekuly jedné kapaliny pronikají do druhé kapaliny přes polopropustnou blánu tak dlouho, až nastane **rovnovážný stav**. Speciální *polopropustná membrána* propouští jen částice **rozpuštědla**, nepropouští však částice **rozpuštěné látky**.

Osmotický tlak

Osmotický tlak, značka Π , je přetlak potřebný k udržení osmotické rovnováhy mezi roztokem a čistým rozpouštědlem odděleným polopropustnou membránou propustnou pouze pro rozpouštědlo (viz [osmóza](#)).

Pro silně zředěné **pravé roztoky** platí **van't Hoffův zákon**: **Osmotický tlak ve zředěném roztoku** je právě tak velký, jako kdyby rozpouštěná látka byla v plynném stavu a přitom měla objem a teplotu roztoku, což je vyjádřeno vztahem:

$$\Pi = c_B RT,$$

kde $c_B = n_B / V$ je **koncentrace látky** rozpuštěné B v **roztoku** o objemu V , R je **plynová konstanta**, T je **termodynamická teplota** a n_B je **látkové množství** látky B. **V uvedeném tvaru platí zákon pouze pro neelektrolytické roztoky**, tzn. pro takové, v nichž nejsou molekuly **disociovány** na ionty.

Osmotický tlak elektrolytického roztoku závisí na koncentraci disociovaných iontů, které se z hlediska **disociace** chovají jako samostatné molekuly. Proto platí vztah

$$\Pi_e = \Pi [1 + (j - 1)\alpha],$$

kde Π je osmotický tlak, který by byl v objemové jednotce roztoku, kdyby žádná z molekul nebyla disociována, j je počet iontů, na který se štěpí každá molekula, a α je **stupeň disociace**.