

E-tabulky termodynamických dat

Vladimír Babica

Bakalářská práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval/a samostatně a použitou literaturu jsem citoval/a.

Ve Zlíně, 30. 05. 2005

.....

Vladimír BABICA

ABSTRAKT

Práce obsahuje hlavně tabulky termodynamických dat, která jsou pro výuku v některých oborech na fakultě technologické nepostradatelná. V teoretické části bakalářské práce jsou uvedeny veškeré hodnoty, které lze najít v tabulkách. O některých z nich je zde podrobnější popis a jejich historické odvození. V praktické části jsou uvedeny některé z použitých výpočtových vztahů jednotlivých veličin. Tabulky jsou přístupné na školním serveru Výuka na FT v systému Moodle, kde jsou umístěny studijní materiály nejen pro studenty.

SUMMARY

The task mainly contain tables of thermodynamic data that are indispensable for education in some branch in Faculty of Technology. All values that we can found in tables are stated in text part of bachelor task. There are detailed description and their historical development about some of them. In practical part there are some used calculation figures of some values. The tables are available on school server Výuka at FT in system Moodle where study materials not only for students are placed.

OBSAH

OBSAH	4
ÚVOD.....	5
I. TEORETICKÁ ČÁST	6
1 TABULKY TERMODYNAMICKÝCH DAT	7
1.1 DYNAMICKÁ VISKOZITA	10
1.1.1 Viskozita plynů	10
1.1.2 Viskozita kapalin.....	12
1.2 VÝPARNÁ ENTALPIE	14
1.3 TEPELNÁ KAPACITA.....	16
1.3.1 Tepelná kapacita pevných látek	17
1.4 TEPELNÁ VODIVOST	18
1.4.1 Tepelná vodivost plynů	18
II. PRAKTICKÁ ČÁST	19
2 UKÁZKA VÝPOČTŮ.....	20
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	25
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	26
SEZNAM OBRÁZKŮ	29
SEZNAM PŘÍLOH.....	30

ÚVOD

S výběrem tématu mé bakalářské práce mi dopomohla zkušenost s předmětem procesní inženýrství. Už v dřívějších semestrech jsme měli předmět Procesní inženýrství I., Procesní inženýrství II., a nyní Modelování dynamických systémů, kde jsme se zabývali různými technologickými problémy. Při řešení těchto problémů bylo zapotřebí mnohá data hledat v různých tabulkách. A právě v tomto bodě byl vždy kámen úrazu.

Tabulky jako celek totiž do tohoto předmětu téměř neexistují, a když už nějaké jsou, tak tam není úplně vše, co je pro tento předmět zapotřebí. (V Procesním inženýrství I. jsme dokonce většinu hodnot hledali už jen na pár jednotlivých velmi poničených listech.)

V tabulce jsou tedy umístěna, a doufám, že všechna, důležitá data do těchto předmětů. V první řadě jsou zde hodnoty součinitele místních odporů a ekvivalentní délka potrubí. Tyto hodnoty se používají pro výpočet délky či průměru potrubí u čerpadel. Dále jsou zde uvedeny hustoty různých kapalných a plynných látek. Tyto veličiny nás doprovázely snad po celé studium na naší škole a používali jsme je i v jiných předmětech.. Neméně důležitou veličinou obsaženou v tabulkách je také dynamická viskozita. Toto je jen výčet tří veličin, které jsou podle mě nejdůležitější.

Pro ulehčení práce studentů jsou zde také uvedeny různé přepočtové vztahy jednotek z anglosaských na metrické. Tyto jednotky jsou velmi často používány v anglicky mluvících zemích a lidé, kteří používají u nás standardní metrické jednotky, mají poměrně velké potíže s převodem na jednotky sobě vlastní. Další takovou převodní pomůckou je přehled snad všech jednotek používaných dříve a dnes. Je zde také přehled zvláštních jednotek používaných ve specifických lidských činnostech. (A opět uvádím jen úzký výčet převodních tabulek.)

Neméně důležitou součástí tabulek je také zpřístupnění všech těchto dat online na internetu v prostředí Moodle. Celý dokument zde bude rozčleněn do jednotlivých příslušných kapitol jako v tištěné verzi, tzn. ve stromové struktuře, aby si student nemusel stahovat celé tabulky.

Tyto tabulky obsahují širokou škálu dat a proto jsou použitelné i pro ostatní obory. Je zde mnoho důležitých dat, které lze uplatnit v chemickém či plastikářském průmyslu a doufám, že se stanou nepostradatelnou součástí studia na technologické fakultě.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TABULKY TERMODYNAMICKÝCH DAT

Tabulky obsahují údaje o fyzikálních vlastnostech příslušných látek, které se nejčastěji používají při výpočtech, zejména v předmětu Procesní inženýrství a v Modelování dynamických systémů. Tyto hodnoty jsou často výsledkem dlouhodobého experimentálního zkoumání daných veličin za určitých podmínek (tlaku, teplotě apod.).

Vlastnosti látek se však v reálném světě projevují za odlišných tlaků a teplot různě. Tabulky se zabývají těmito změnami za izobarických podmínek, tj. za stálého, konstantního tlaku při změnách teploty. Tlaková změna totiž v reálném prostředí není až tak velká, jako teplotní změna (a technologické procesy se až na výjimky neodehrávají ve velkých nadmořských výškách). V tabulkách je také několik hodnot zabývajících se chování některých veličin při různých tlacích v uzavřených přetlakových nádobách.

Hodnoty do tabulky byly získávány z mnoha různých zdrojů. Nejdůležitějším zdrojem při jejich sestavování byl internet. Data jsem vyhledával a získával různým způsobem. Na některých stránkách se nalézaly tabulky vhodné přímo pro mé potřeby, ale ty jsem musel paradoxně nejčastěji přepisovat. Hlavně proto, že se vyskytovaly ve formátu pdf, se kterým se nedá dobře pracovat. Většinu dat jsem tedy musel vypočítat. V internetových tabulkách jsem našel vzorec pro danou veličinu, a pak jsem v aplikaci Microsoft Excel vypočítával hodnoty této veličiny pro různých teploty. Dále jsou také problémem internetových tabulek velké nedostatky ve správnosti dat a veličin, které se vůbec často se skutečností vůbec neztotožňují. Musel jsem proto čerpat z více zdrojů, díky nimž bych vyhledaná data posléze zkontroloval. Vyskytuje se zde i pár důležitých hodnot pro plastické hmoty, jako rozdílnost jejich odolnosti, používaná zkratka v několika normách, a mnoho dalšího.

V tabulce nejsou uvedeny jen hodnoty, ale také různé přepočtové a výpočetní vzorce pro usnadnění práce studentům v předmětech Procesní inženýrství a Modelování dynamických systémů. Jsou zde uvedeny takové empirické vzorce, které nelze logicky odvodit, což také pomůže studentům v případném rychlejším zvládnutí zadaného úkolu.

Jedna z velmi důležitých vlastností je dynamická viskozita. Tato veličina je důležitá při výpočtech proudící kapaliny v trubkách, kdy se bez ní nedá vypočítat délka či průřez potrubí. Pomocí této veličiny musíme počítat také čerpadlo, které je nutné k použití čerpání daného média. Dalšími důležitými použitími je pro výpočet několika různých kritérií jako je například Prandtlovo kritérium:

$$\text{Pr} = c_p \frac{\eta}{\lambda} \quad (1)$$

Kde c_p je tepelná kapacita dané tekutiny a λ je koeficient tepelné vodivosti tekutiny.

Dalším velice důležitým kritériem je Reynoldsovo kritérium:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta} \quad (2)$$

Zde je v charakteristická rychlost proudění kapaliny, ν je kinematická viskozita, l je charakteristická délka a ρ je hustota kapaliny. Mezi dynamickou a kinematickou viskozitou je převodní vztah:

$$\eta = \rho \cdot \nu \quad (3)$$

Díky tomuto kritériu můžeme odhadnout v jaké oblasti se nachází daná kapalina.

Zda jde o oblast laminární či turbulentní. Kapalina se totiž v těchto oblastech chová odlišně a pro tyto oblasti byly odvozeny empirické vztahy. Těchto kritérií a možnosti využití dynamické je mnohem více. Co přesně je veličina dynamická viskozita je uvedeno v kapitole 2. Dynamická viskozita. Uvedená je jak pro plynné tak kapalně látky. Nejsou tu uvedeny vždy všechny definice pro každé skupenství zvlášť, protože jednotlivé definice se od sebe až tak neliší.

Další uvedenou veličinou je výparná entalpie. Tato hodnota je velice důležitá při tepelných bilancích. Ve školní výuce se s ní také setkáváme celé tři semestry. Nejvíce se však používá při bilancování tepelných výměníků, kdy známe hmotnostní průtok, nebo výkon.

Podrobněji je o téhle veličině v kapitole 3. Výparná entalpie.

Jednou z důležitých vlastností látek je také tepelná vodivost. U některých látek potřebujeme, aby byla vodivost co největší a aby byly co nejmenší tepelné ztráty. Takovou vodivost vyžadujeme hlavně u tepelného vedení. Zase na druhou stranu aby byly co nejmenší tepelné ztráty tak je třeba, to pořádně zaizolovat a u těchto materiálů chceme co nejmenší tepelnou vodivost. V praxi se stejně musí volit mezi cenou a kvalitou.

Členění v příloze tabulky termodynamických dat umožňuje vytvořit základní obeznámení i s jednotlivými sloučeninami či prvky. Jsou zde uvedena různá data o kyslíku, argonu, vodíku, heliu či oxidu uhličitém. Některá data slouží hodně i pro strojný průmysl, protože i tam je třeba vědět chování jednotlivých mazadel či paliv. Proto jsou tu i tabulky na toto téma.

Jsou zde i kapitoly, které se věnují jednotlivým pevným látkám jako je třeba platina. O ní je tu uvedena alespoň její chemická odolnost. Není zde jen platina, ale minimálně jedna tabulka se věnuje kovům a jejich fyzikálním konstantám. Některé hodnoty mohou požit i stavaři ve svém oboru, protože se tu zlehka dotýkám i této oblasti. Při stavbě každého domu či bytu, či jakéhokoliv objektu je velmi důležité vědět, jakou tepelnou vodivost mají jednotlivé materiály. Některé základní jsou zde opět uvedeny.

Pro plastikáře je zde neocenitelnou součástí přehled používaných zkratk dle normy DIN 7728. O plastech je tu toho ale mnohem více. Také odolnost vůči skupině chemickým látek a nebo přímo odolnost vůči přímo některým chemikáliím. O polymerech je tu toho ale mnohem více.

V poslední kapitole, dalo by se říct pomocné kapitole, jsou mnohá výpomocná data. Tyto data by se daly říct, by se do běžných tabulek ani moc nehodila, ale pro školní účely jsou poměrně přínosná. Používání například anglosaských jednotek je v mnoha zemích zcela obvyklou záležitostí, ale je-li třeba je přepočítat na metrické, tak je hned problém. Pro studenty jistě neocenitelné budou přepočtové vztahy u teploty tlaku i další. Dokonce uvedení nemalé řady používaných vzorců může zachránit studentovi krk. Kdyby se někdy člověk setkal, s nějakými jednotkami, které mu vůbec nic neříkají a slyší o nich poprvé, tak nemusí věšet hlavu. Je zde seznam snad všech celosvětově používaných jednotek.

To by mohlo pro začátek stačit a nyní již o jednotlivých nejdůležitějších a nejpoužívanějších fyzikálních veličinách.

1.1 Dynamická viskozita

1.1.1 Viskozita plynů

Vnitřní tření v plynu závisí na střední volné dráze molekul. Toto vnitřní tření se projevuje při proudění. Toto proudění si můžeme představit jako pohyb tenkých plynných vrstev, které odpovídají svým tvarem plášti válce. Horní vrstva je v klidu a čím víc se blížíme do středu trubice, tím rychlejší je zde proudění. Tyto pomalé a rychlé vrstvy se rychlostně ovlivňují. Síly kterými se ovlivňují se nazývají vnitřní tření a právě toto nám charakterizuje dynamická viskozita, která udává jakou působí jednotková plocha vrstvy na jednotkovou plochu jiné vrstvy v jednotkové vzdálenosti při jednotkovém rychlostním spádu mezi těmito vrstvami.

Příčinou vnitřního tření mezi jednotlivými vrstvami jsou molekuly, které se prohazují mezi vrstvami, díky rozdílné hybnosti ve směru proudění závisující na vzdálenosti od stěny trubice. Molekuly prolétávají příčně na směr proudění a přenáší hybnost z jedné vrstvy na druhou. Pohyb vrstev dále od stěny je brzděn molekulami přicházejících z vrstev blíže ke stěně. K překonání tohoto brzdného účinku je třeba určité vnější síly, která by udržela plyn v proudícím stavu.

Tato síla se dá odvodit zhruba takto. Je daný plyn proudící po horizontální desce s rychlostí v_x .

$$v_x = q \cdot x \quad (4)$$

Kde $q = dv_x / dx$ je rychlostní gradient ve vertikálním směru. Vezmeme – li $\bar{l}$ jako střední hodnotu dráhy molekul, tak každá molekula o hmotnosti m , která příčně prochází na směr proudění z hladiny vzdálené $x + \bar{l}$ od desky na hladinu ve vzdálenosti x předá této hladině hybnost $m(x + \bar{l})q$. Počet molekul, které takto projdou za jednotku času jednotkovou plochou, je $1/6 \cdot {}^1N \cdot \bar{u} \cdot dt$. Všechny tyto molekuly teda přenáší na nižší hladinu hybnost :

$$\frac{1}{6} \cdot {}^1N \cdot m \cdot \bar{u} (x + \bar{l}) q \cdot dt \quad (5)$$

Zároveň ale molekuly na hladině ve vzdálenosti x hybnost ztrácejí:

$$\frac{1}{6} \cdot {}^1N \cdot m \cdot \bar{u} (x - \bar{l}) q \cdot dt \quad (6)$$

Celková hybnost, kterou získají molekuly připadající na jednotku plochy hladiny ve vzdálenosti x ve směru proudění za čas dt je dána součtem těchto výrazů:

$$\frac{1}{6} \cdot {}^1N \cdot m \cdot \bar{u} (x + \bar{l}) q \cdot dt - \frac{1}{6} \cdot {}^1N \cdot m \cdot \bar{u} (x - \bar{l}) q \cdot dt = \frac{1}{3} \cdot {}^1N \cdot m \cdot \bar{u} \cdot \bar{l} \cdot q \cdot dt \quad (7)$$

Z tohoto vzorce pro viskozitu, při časové změně hybnosti při jednotkovém gradientu, vyplývá :

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot {}^1N \cdot m \cdot \bar{u} \cdot \bar{l} = \frac{1}{3} \rho \cdot u \cdot \bar{l} \quad (8)$$

Přesnější odvození provedl S. Chapman (1916) a D. Enskog vede k rovnici:

$$\eta = 0,499 \rho \cdot v \cdot \bar{l} \quad (9)$$

Dosazením do vztahu (5) za $\bar{l}$ a $\bar{u}$ nám vznikne výraz:

$$\eta = \frac{m \cdot \bar{u}}{3\pi \cdot \rho^2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{\pi \cdot \rho^2} \sqrt{\left(\frac{m \cdot k \cdot T}{6} \right)} \quad (10)$$

k je tepelná vodivost plynu. Z tohoto vzorce vidíme, že viskozita nám nezávisí na tlaku a ani na hustotě. Jde vidět, že závisí pouze na teplotě. Ve skutečnosti je tato závislost ještě trochu komplikovanější, kterou odvodil W. Sutherland. B a C jsou kladné konstanty:

$$\eta = \frac{B\sqrt{T}}{1 + C \cdot T^{-1}} \quad (11)$$

Ve vzorcích se nám vyskytuje střední volná dráha, kterou lze vypočítat ze vztahu:

$$\bar{l} = \frac{3\eta}{{}^1N \cdot m \cdot \bar{u}} = \frac{3\eta}{\rho \cdot u} = \eta \sqrt{\left(\frac{3}{\rho \cdot p} \right)} \quad (12)$$

p je tlak a ρ je hustota.

1.1.2 Viskozita kapalin

Viskozita se udává jen u reálných kapalin. Udává nám hodnotu jak se kapalina brání proti tečení. Můžeme pozorovat, že kapaliny o větší hustotě se brání tečení mnohem více, než stejné množství řidší kapaliny. Kapaliny o větší hustotě jsou tedy viskóznější. Dalo by se říct, že zde existuje jistá analogie, mezi smykovým třením mezi pevnými tělesy. Totiž i u viskózního proudění se kinetická energie přeměňuje na teplo, tak jak je tomu i při vzájemném pohybu pevných těles za působení tření. Mezi jednotlivými vrstvami kapaliny vzniká při toku smykové napětí a jeho důsledek je právě viskozita. Tato vlastnost se vyjadřuje koeficientem dynamické viskozity η .

Pro laminární proudění platí vztah :

$$\eta = \frac{\tau}{dv/dy} \quad (13)$$

τ je smykové napětí vznikající při proudění kapaliny a dv/dy gradient rychlosti určený ve směru kolmém ke směru proudu. Jednotkou dynamické viskozity je $Pa \cdot s$. Laminárním prouděním nazýváme takové proudění, při kterém proudová vlákna probíhají souběžně a kapalina se nepromíchává.

Význam viskozity nám vyplývá i z následujícího vztahu:

$$F = \eta S \frac{dv}{dx} \quad (14)$$

F je síla, která mezi rovnoběžnými vrstvami kapaliny o stykové ploše S , které se posouvají ve stejném směru a jsou od sebe vzdáleny o dx , udržuje rozdíl rychlostí dv .

Na vnitřním tření závisí objem kapaliny V , který proteče kapilární trubicí o délce L a poloměru r za čas t při tlakovém rozdílu na koncích trubice Δp . Příslušný vztah odvodil Poiseuille z představy, že kapalina proudí trubicí v koaxiálních válcových vrstvách, kterým přibývá na rychlosti od stěny ke středu trubice. Poiseuilleova rovnice, pomocí níž lze stanovit viskozitu zní:

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \Delta p}{8VL} t \quad (15)$$

Viskozita má rovněž vliv na pohyb pevných tělísek v kapalině, na něž působí stálá síla F . Ve viskózním prostředí nevykonávají tato tělíska pohyb rovnoměrně zrychlený jako

v prázdném prostoru, ale po určité době dosahují stálé rychlosti v , při které síla působící na tělísko odpovídá právě odporu prostředí. Pro malá kulová tělíska o poloměru r odvodil G. G. Stokes důležitý zákon, který je vyjádřen vztahem:

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (16)$$

Necháme-li taková tělíska klesat ke dnu nádoby naplněné viskózní kapalinou, působí na ně gravitační síla $m \cdot g$, kde m je hmota tělíska zmenšená o hmotu jím vytlačené kapaliny. Hmotu m lze vyjádřit pomocí hustoty tělísek ρ_1 a hustoty kapaliny ρ_2 :

$$m = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 (\rho_1 - \rho_2) \quad (17)$$

Z toho vyplývá, že rychlost v s jakou tělíska padají ke dnu po ustálení pohybu platí:

$$v = \frac{m \cdot g}{6\pi \cdot \eta \cdot r} = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 (\rho_1 - \rho_2)}{9 \cdot \eta} \quad (18)$$

Viskozita kapalin se s teplotou poměrně značně mění. Na rozdíl od plynů nevzrůstá její hodnota úměrně s druhou mocninou z absolutní teploty, ale naopak klesá. To vyplývá z okolnosti, že molekuly kapaliny se při nižších teplotách shlukují, což se projevuje i mezi jednotlivými vrstvami kapaliny, čímž se zvětšuje vnitřní tření. Při zvětšování teploty tohoto jevu ubývá a viskozita kapalin klesá. Teplotní závislost viskozity kapalin lze vyjádřit vzorcem:

$$\log \eta = AT^{-1} + B \quad (19)$$

Konstanty A a B jsou pro každou kapalinu jiné. Vztah se píše i ve tvaru:

$$\varphi = C \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right) \quad (20)$$

Konstanta C je konstantou úměrnosti. Hodnotu E lze považovat za minimální energii potřebnou k překonání mezimolekulárních sil, které brzdí posun rovnoběžných vrstev při toku kapaliny. Boltzmanův faktor $\exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right)$ představuje část molekul, jejichž energie převyšuje uvažovanou hodnotu E . Růst tohoto faktoru způsobuje pokles viskozity kapalin. Viskozita kapalin klesá zhruba o 2% při zvýšení teploty o 1°C. S rostoucím tlakem roste i viskozita a při vysokých tlacích se růst viskozity ještě zvětšuje.

1.2 Výparná entalpie

Nasycená pára se liší od kapaliny, se kterou je v rovnováze, svojí vnitřní energií ΔU a entalpií ΔH . Změna entalpie, u které neuvažujeme objemovou práci za konstantního tlaku je dána:

$$\Delta H = Q_{\text{výp}} \quad (21)$$

Teplo odpovídající vnitřní změně energie se taky někdy nazývá vnitřní výparné teplo. To je rovno výparnému teplu zmenšenou o energii potřebnou na objemovou práci. Zanedbáme – li objem kapaliny ku objemu páry, pak můžeme vyjádřit z ideální stavové rovnice:

$$\Delta U = \Delta H_{\text{výp}} - n \cdot R \cdot T \quad (22)$$

Vztáhneme – li to na jeden mol:

$$\Delta u = \Delta h_{\text{výp}} - n \cdot R \cdot T \quad (23)$$

Toto vnitřní výparné teplo je spotřebováno jen na překonání přitažlivých sil mezi molekulami v kapalině. Probíhá – li děj bez vnější tepelné výpomoci, kapalina se ochlazuje a vypařování pak závisí na velikosti vnitřního výparného tepla.

U kapalin se velikost výparného tepla při jejich běžném bodu varu řídí empirickým pravidlem od F. Troutona. Podíl těchto tepel a absolutního bodu varu je přibližně konstantní a u velkého počtu kapalin se pohybuje v mezích $80 - 90 \text{ J} / \text{K} \cdot \text{mol}$. Větší odchylky od tohoto pravidla se vyskytují u asociovaných kapalin. Platnost tohoto zákona nám vysvětluje teorém korespondujících stavů, ve kterých jsou kapaliny při bodu varu. Konstanta A v Augustově rovnici zahrnuje molární výparné teplo ($A = \Delta h_{\text{výp}} / 2,303R$). Augustovu rovnici lze teda psát:

$$\ln p = -\frac{\Delta h_{\text{výp}}}{R \cdot T} + A \quad (24)$$

Derivujeme – li vztah podle teploty tak získáme Clapeyronovu rovnici:

$$\frac{d \ln p}{dT} = \frac{\Delta h_{\text{výp}}}{R \cdot T^2} \quad (25)$$

K přepočítání tence nasycené páry z jedné teploty na druhou je třeba rovnici integrovat v mezích od teploty T_0 , které odpovídá známá hodnota tence páry p_0 . K nové teplotě T odpovídá rovnovážná tence par p .

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{1}{R} \int_{T_0}^T \frac{\Delta h_{\text{vyp}}}{T^2} dt \quad (26)$$

K integraci potřebujeme znát závislost výparného tepla na teplotě, která je dána integrovanou Kirhoffovou rovnicí:

$$\Delta h_{\text{vyp}} = \Delta h_{\text{vyp},0} + \int_{T_0}^T (c_{p,g} - c_{p,l}) dT \quad (27)$$

V této rovnici je $\Delta h_{\text{vyp},0}$ výparné teplo při teplotě T_0 , $c_{p,g}$ a $c_{p,l}$ jsou molární tepelné kapacity páry a kapaliny. Dosazením a provedením integrace prvního členu získáme konečnou rovnici:

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{\Delta h_{\text{vyp},0}}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) + \frac{1}{R} \int_{T_0}^T \frac{dT}{T^2} \int_{T_0}^T (c_{p,g} - c_{p,l}) dT \quad (28)$$

1.3 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita je teplo, které je třeba dodat z okolí, aby se homogenní jednosložková soustava neměnila ani své chemické složení ani své skupenství zahřála o jeden stupeň Kelvina.

Je nutné rozlišovat střední tepelnou kapacitu a pravou tepelnou kapacitu. Střední tepelná kapacita je teplo, které způsobuje zahřátí nebo ochlazení soustavy z teploty T_1 na teplotu T_2 .

$$\bar{C} = \frac{Q}{T_1 - T_2} = \frac{Q}{\Delta T} (J/K) \quad (29)$$

Pravá tepelná kapacita se limitně blíží střední tepelné kapacitě při velmi malých změnách teploty. V našem případě se budeme zabírat izobarickou tepelnou kapacitou, to znamená že se bude měnit teplota a tlak bude konstantní. Vzorec který nám udává vztah mezi střední a pravou tepelnou kapacitou je následující:

$$\bar{C} = \frac{1}{T_1 - T_2} \int_{T_1}^{T_2} C(T) dT \quad (30)$$

Tyto veličiny jsou však extenzivní, to znamená že jsou závislé na velikosti soustavy. A proto je musíme vztáhnout na jednotku hmotnost a získáme specifickou tepelnou kapacitu:

$$c_p = \frac{C_p}{m} (J/K \cdot kg) \quad (31)$$

Nebo je můžeme vztáhnout na množství:

$$C_{p,m} = \frac{C_p}{n} (J/K \cdot mol) \quad (32)$$

Mezi těmito jednotkami existuje jednoduchý převodní vzorec:

$$c_p = \frac{C_{p,m}}{M} \quad (33)$$

M je molární hmotnost a musí být zde v jednotkách kg/mol .

1.3.1 Tepelná kapacita pevných látek

Při porovnávání tepelných kapacit jednotlivých prvků zjistili A. T. Dulong a P. L. Petit, že molární tepelné kapacity prvků jsou zhruba stejné a mají $25,96 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$. Tomuto pravidlu se říká Dulong – Petitovo a dříve pomocí tohoto pravidla byly kontrolovány a vypočítávány atomové hmotnosti. Výjimku v tomto pravidlu tvoří C, B, Be a Si.

Dalšími kteří přispěli svojí činností byli F. Neumann a H. V. Regnault. Ti zjistili, že molární tepelné kapacity uhličitánů a síranů různých dvojmocných kovů mají stálou hodnotu, která je asi $88 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$. Z těchto zákonů zjistili J. P. Joule a H. Kopp, že molární tepelná kapacita sloučeniny je dána součtem molárních tepelných kapacit prvků v ní obsažené.

Pro praktické využití se používá vyjádření závislosti tepelné kapacity na teplotě v mocninné řadě:

$$C_{p,m} = a + bT + cT^2 + c'T^{-2} \quad (34)$$

Jednotlivé koeficienty a , b , c a c' jsou tabelizované a jsou pro každou sloučeninu jiné. Tyto koeficienty nejsou závislé na teplotě. Podobný vzorec platí i u tepelných kapacit pro kapalně a plynné látky.

1.4 Tepelná vodivost

1.4.1 Tepelná vodivost plynů

Tepelná vodivost plynů je důsledek přenosu kinetické energie ve směru proti gradientu teploty, to znamená proti gradientu kinetické energie.

Koeficientem tepelné vodivosti je λ , která je definována jako tepelný tok $\dot{Q}$ vztahovaný na jednotkový teplotní gradient a na jednotkovou plochu průřezu :

$$\dot{Q} = \lambda \cdot S \frac{dT}{dx} \quad (35)$$

Tato rovnice se dá i napsat jako:

$$\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{1}{2} \left(\frac{N}{V} \right) \bar{c} \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (36)$$

kde $\frac{1}{2} \left(\frac{N}{V} \right) \bar{c}$ je počet molekul, který za jednotku času projde jednotkou stykové plochy vrstviček ve směru shora dolů a i zdola nahoru. Dále $\frac{d\varepsilon}{dx}$ je gradient střední kinetické energie ε připadající v tom kterém místě soustavy na jednu molekulu. Uvažujeme – li že:

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{d\varepsilon}{dT} \frac{dT}{dx} \quad (37)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = m \cdot c_v \quad (38)$$

Kde m je hmotnost molekuly a c_v je specifická tepelná kapacita látky, to znamená tepelná kapacita látky dělená její hmotností, pak by mělo platit:

$$\lambda = \frac{1}{2} \left(\frac{N}{V} \right) \bar{c} \cdot l \cdot m \cdot c_v = \frac{1}{2} \rho \cdot \bar{c} \cdot l \cdot c_v = \eta \cdot c_v \quad (39)$$

Tato teorie je však i pro ideální plyn pouze přibližná, protože předpokládá že se všechny molekuly pohybují se stejnou rychlostí $\bar{c}$ a že při každé srážce dojde k odevzdání celé kinetické energie molekuly.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 UKÁZKA VÝPOČTŮ

V této kapitole je praktická ukázka výpočtů některých tabulkových hodnot. Tyto vzorce jsou empirické a nejčastěji jsou to nějaké mocninné řady aby se to co nejvíce blížilo reálné hodnotě. První ukázka bude výpočet dynamické viskozity plynů. Pro dynamickou viskozitu jsou až na výjimky všechny empirické vzorce shodné, samozřejmě s odlišnými tabelizovanými konstantami. Obecný vzorec tedy je:

$$\eta = \frac{a \cdot T^{1,5}}{T + b} \quad (40)$$

Acetylen		Amoniak		Benzen		Butadien	
°C	10 ⁻⁶ Pa.s	°C	10 ⁻⁶ Pa.s	°C	10 ⁻⁶ Pa.s	°C	10 ⁻⁶ Pa.s
-20	8,921	20	9,851	105	9,828	35	10,085
-15	9,092	25	10,049	110	9,957	40	10,213
-10	9,262	30	10,247	115	10,085	45	10,341
-5	9,431	35	10,446	120	10,213	50	10,468
0	9,600	40	10,644	125	10,341		
5	9,767	45	10,842	130	10,468		
10	9,933	50	11,040	135	10,596		
15	10,099	55	11,238	140	10,724		
20	10,263	60	11,436	145	10,852		
25	10,427	65	11,634	150	10,980		
30	10,590	70	11,832	155	11,108		
35	10,751	75	12,029	160	11,236		
40	10,912	80	12,227				
45	11,072						
50	11,233						

Obr. 1. Ukázka z tabulek dynamické viskozity

V případě acetyleny se vychází ze vzorce:

$$\eta = \frac{1,06511 \cdot T^{1,5}}{T + 227,736} \cdot 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{s)} \quad (41)$$

Kde T je teplota v Kelvinech. Z tabulky je třeba vidět, že dosadíme – li teplotu 10°C tak nám dynamická viskozita vyjde $9,933 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Výpočet dynamické viskozity u vzduchu se počítá podle jiné polynomické rovnice. Je zde více konstant a výpočet by měl být přesnější. Obecná rovnice vypadá:

$$\eta = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad (42)$$

Po dosazení jednotlivých konstant dostaneme rovnici:

$$\eta = (2,75874 + 0,0598528 \cdot T - 2,626 \cdot 10^{-5} T^2 + 5,22 \cdot 10^{-9} T^3) \cdot 10^{-6} (Pa \cdot s) \quad (43)$$

Jedna z dalších získaných hodnot pomocí empirických vztahů je tepelná kapacita. Opět jsem vybral zástupce z řad plyných látek. Tento vzorec mocninné řady je velice podobný vzorci uvedenému ve čtvrté kapitole č. Výsledný vzorec je ještě rozšířen o podíl molární hmotnosti, aby jsme mohli získat požadovanou hodnotu v požadované jednotce. Obecný vzorec tedy vypadá:

$$c_p = \frac{a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3}{M} \quad (44)$$

Při zvolení některého reprezentanta, například benzen získáme následující vztah:

$$c_p = \frac{-33,92 + 0,4739 \cdot T - 3,017 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 7,13 \cdot 10^{-8} \cdot T^3}{0,07811} (J / kg \cdot K) \quad (45)$$

Při posazení teploty například 230°C nám vyjde hodnota 1756,84 J/kg·K.

Neméně důležitou hodnotou a také zjištěnou hodnotou pomocí mocninné řady je tepelná vodivost. Tady jsem zvolil reprezentanta kapalinu. Z kapalin jsem vybral vodu, protože je vidět, na kolik desetinných míst jsou známy jednotlivé konstanty do mocninné řady. Obecný vzorec je:

$$\lambda = a + b \cdot T + c \cdot T^2 \quad (46)$$

Vzorec pro vodu teda vypadá:

$$\lambda = -0,7357665475 + 0,7342209599 \cdot 10^{-2} T - 0,951673 \cdot 10^{-5} T^2 (W / m \cdot K) \quad (47)$$

Při výpočtu například hustoty kapalin se voda opět počítá rozdílným způsobem než ostatní. Zatím co u vody je použita určitá mocninná řada, kde se tentokrát nepočítá s teplotou Kelvina ale se stupněm Celsia:

$$\rho = a + b \cdot t + c \cdot t^{1,5} \quad (48)$$

$$\rho = 999,65 + 0,20438 \cdot t - 0,061744 \cdot t^{1,5} (kg / m^3) \quad (49)$$

U ostatních kapalin je použit obecný vzorec:

$$\rho = a \cdot b^{-\left(1 - \frac{T}{c}\right)^{\frac{2}{7}}} \quad (50)$$

Na ukázkou třeba hustota ethanolu:

$$\rho = 1000 \cdot 0,2567 \cdot 0,240^{-\left(1 - \frac{T}{515,8}\right)^{\frac{2}{7}}} \left(\text{kg} / \text{m}^3 \right) \quad (51)$$

Při dosazení například 20°C přepočtených samozřejmě na Kelviny získáme hodnotu 788,77 kg / m³.

ZÁVĚR

Jaký vlastně tato práce bude mít v budoucnu přínos pro studium na fakultě technologické? Jejím hlavním přínosem je to, že studenti nebudou muset jednotlivá data složitě hledat, protože budou uvedeny v jedné jediné publikaci. Nemusí tedy trávit dlouhé chvíle v knihovnách hledáním nějaké veličiny či jednotky, nebo dokonce jejím přepočtem, a budou se moci v ušetřeném čase věnovat důležitějším činnostem, jako je například studium problematiky jako takové.

Mým úkolem při zpracovávání této práce bylo z neuvěřitelně obrovského množství dat na internetu a v knihovnách vybrat ta nejdůležitější a nejfrekventovanější. Neměl jsem za úkol prostě jen vytvořit několika set stránkovou verzi tabulek, které by studentům nabízeli přehnané množství dat, ve kterých se často nedá dobře zorientovat, ale verzi toho nejdůležitějšího, co student pro daný úkol potřebuje znát.

Musel jsem společně s pomocí vedoucí diplomové práce vybrat vhodná data do tabulek. Vždy jsem se držel hlavně toho, aby studentům vybraná data byla k užtku a k občasnému užtí. Na internetu lze najít mnoho tabulek, které se věnují velice úzkému profilu dat, které ani nepotřebujeme. Nám jde o poměrně široké spektrum dat z mnoha technických oblastí. Vybíral jsem takové hodnoty, které tyto požadavky splňují. Například u stavebních materiálů není uvedena široká škála používaných cihel, které mají samozřejmě každá jiné parametry, ale jen určitý vzorek, reprezentant této oblasti. U paliv je tomu podobně. Přesný typ zde není, ale je zde uvedeno, zda jde například o běžné, či kvalitnější palivo.

Po uvážení dle tohoto kritéria (čili daná data jsou vhodná do tabulky) jsem ještě neměl zdaleka vyhráno. Téměř každá tabulka a hodnota na internetu jsou uvedeny v pdf formátu, čímž je zabráněno téměř jakémukoli šíření. Pro získání jednotlivých dat bylo zapotřebí je takřka skoro ručně opisovat, protože i když se použije program Adobe Acrobat, který umí rozdělit data na text a obrázky z tohoto formátu, nedokáže pracovat s tabulkami v něm obsaženými. Bylo zapotřebí postupně kopírovat některá data do Microsoft Excelu, kde již získala určitý formát a odtud vkládat do tabulek v Microsoft Word. Formát pdf však nebyl zdaleka jediným problémem.

Dalším vážným problémem se ukázaly uvedené výpočtové vztahy se konstantami zveřejněnými na internetu. Nachází se zde obrovské množství dat a třeba jen jejich přesun

byl velice časově náročný. Vzorec se totiž musel pozměnit kvůli počítání teploty ve stupních Celsia, protože uvádět do tabulky teplotu v Kelvinech by bylo poměrně nenázorné. Když už byl i tento problém odstraněn, nastaly další problémy. Často byl chybný i vzorec a nedal se použít (pravděpodobně způsobeno chybou pisatele). Některé nalezené hodnoty jsem tedy nemohl použít, i když byly velmi důležité.

Všechny hodnoty jsem korigoval a srovnával i s jiným zdrojem. Tabulky jsou uvedeny v základních SI jednotkách, a byla – li veličina příliš malá nebo velká, použil jsem klasické předpony kilo-k, či mili-m. Tabulky jsou určeny všem, kteří budou hledat určitou termodynamickou hodnotu. Tabulky nejsou určeny pouze pro studenty, a tak doufám, že

pomůžou i ostatnímu personálu ve škole. Tabulky sice budou zveřejněny ve formátu pdf, ale jistě bude po domluvě možné je libovolně rozšířit o potřebné další údaje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Holeček, O., Turcaj, J., Chemicko- Inženýrské tabulky, VŠCHT Fakulta Chemicko-Inženýrská v Praze, 1995
- [2] Řehánek, J., Janouš, A., Šafránek, J., Kučera, P., Tepelně-technické a energetické vlastnosti budov, Grada Publishing a.s., 2002
- [3] Řehořová, M., Vopálenský, V., Drtina, V., Mejvaldová, E., Katalog pro vaši laboratoř MERCK, s. r. o., Říčany-Jažlovice 12. 2002
- [4] Ponížil, P., Macháčková, A., Mráček, A., Laboratorní cvičení z fyziky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2004
- [5] Brdička, R., Základy fyzikální chemie, Academia, Praha, 1977
- [6] Moore, W., J., Fyzikální chemie, Nakladatelství technické literatury, Praha, 1981
- [7] Janotková, E., Pavelek, M., Štětina, J., Termomechanika, 10.2.2005[online], VUT Fakulta strojního inženýrství v Brně, Dostupná z WWW: <http://dt.fme.vutbr.cz/termomechanika>
- [8] E-tabulky, 10.2.2005 [online], VŠCHT Ústav chemického inženýrství v Praze, Dostupné z WWW: http://www.vscht.cz/uchi/e_tabulky/index.html
- [9] Fyzika, 15.5.2005 [online], Dostupná z WWW: <http://fyzika.net>
- [10] Oleje.cz, 10.5.2005 [online], Ekolube, s. r. o., Dostupné z WWW: <http://oleje.cz>
- [11] Klan, P., Honc, D., Česká chemie na internetu, 23.4.2005 [online], Univerzita Pardubice, Dostupná z WWW: <http://chemie.upce.cz>
- [12] NIST Chemistry WebBook, 15.3.2005 [online], U. S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America, Dostupná z WWW: <http://webbook.nist.gov/chemistry>
- [13] Dobrovská, J., Přednášky z fyzikální chemie, 22.5.2005 [online], Masarykova Univerzita v Brně, Dostupné z WWW: http://muff.uffs.net/skola/chemie/fyzikalni/prednasky_FYCH.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Pr	Prandtlovo kritérium
c_p	Tepelná kapacita vztažená na jeden kilogram při konstantním tlaku
η	Dynamická viskozita
λ	Tepelná vodivost
Re	Reynoldsovo kritérium
ν	Kinematická viskozita
l	Charakteristický rozměr
v	Rychlost
ρ	Hustota
q	Rychlostní gradient ve vertikálním směru
x	Vzdálenost
m	Hmotnost
B	Numerická konstanta
C	Numerická konstanta
p	Tlak
τ	Čas
F	Síla
S	Plocha
π	Rudolfovo číslo
r	Poloměr
A	Numerická konstanta
T	Teplota v Kelvinech
t	Teplota ve stupních Celsia
R	Plynová konstanta

C	Konstanta úměrnosti v kapitole viskozita
E	Minimální energie
ΔH	Entalpie
ΔU	Vnitřní energie
Q_{vyp}	Výparné teplo
Δu	Vnitřní energie vztažená na 1 mol
Δh	Entalpie vztažená na 1 mol
A	V Augustově rovnici zahrnuje molární výparné teplo
p_0	Tense páry
$\bar{C}$	Střední tepelná kapacita
T_1	Počátečná teplota v Kelvinech
T_2	Koncová teplota v Kelvinech
Q	Teplo
$C_{p,m}$	Tepelná kapacita za stálého tlaku vztažená na 1 mol
C_p	Tepelná kapacita za stálého tlaku
a	Numerická konstanta
b	Numerická konstanta
c	Numerická konstanta
c'	Numerická konstanta
$\dot{Q}$	Tepelný tok
ε	Kinetická energie
c_v	Tepelná kapacita za stálého objemu
$\bar{c}$	Rychlost
d	Numerická konstanta

M Molární hmotnost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Ukázka z tabulek dynamické viskozity	20
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Tabulky v tištěné formě.
- P II CD se všemi informacemi ve formátu doc, xls
- P III CD s bakalářskou prací ve formátu pdf