

autor: Rudolf Sýkora, (2005--2006)  
Comet System, s.r.o

# ÚVOD DO VLHKOSTI PLYNŮ

## Obsah

Absolutní vlhkost, měrná vlhkost a směšovací poměr . . . . .	2
Složení vzduchu, parciální tlaky a stavová rovnice . . . . .	4
Vypařování vody, tlak nasycených par . . . . .	6
Fázový diagram vody . . . . .	9
Odvození charakteru závislosti $p_{\text{nas}}(T)$ , Clausiova–Clapeyronova rovnice . . . . .	12
Relativní vlhkost, stupeň nasycení, teplota rosného bodu, teplota ojínění . . . . .	13
Výpočty — úvod . . . . .	19
Výpočty v ideálním přiblížení . . . . .	21
Výpočet $p_{\text{nas}}(T, \text{voda/led})$ . . . . .	24
Raoultův zákon, prostředí s danou vlhkostí pomocí nasycených roztoků . . . . .	27
Poznámky o principu měření vlhkosti kapacitními čidly . . . . .	29
Literatura . . . . .	32

## Absolutní vlhkost, měrná vlhkost a směšovací poměr

Uvažujme vlhký plyn<sup>1</sup> zaujímající objem  $V$ . Celkovou hmotnost tohoto plynu označme  $M_{vp}$  (vlhký plyn), celkovou hmotnost vodní páry<sup>2</sup> obsažené v plynu  $M_{H_2O}$  a celkovou hmotnost suchého plynu  $M_{sp}$  (suchý plyn). Zřejmě  $M_{vp} = M_{H_2O} + M_{sp}$ .

S tímto značením lze pro plyn definovat několik pojmů:

**Absolutní vlhkost** (angl. absolute humidity, česky jinak také hustota vodní páry)  $\Phi$  je celkové hmotnostní množství vodní páry připadající na jednotkový objem zkoumaného vlhkého plynu,

$$\Phi = \frac{M_{H_2O}}{V} \quad (\text{kg/m}^3). \quad (1)$$

**Měrná vlhkost**<sup>3</sup> (angl. specific humidity)  $q$  je podíl hmotnosti vodní páry  $M_{H_2O}$  k celkové hmotnosti vlhkého plynu  $M_{vp}$ ,

$$q = \frac{M_{H_2O}}{M_{vp}} = \frac{M_{H_2O}}{M_{sp} + M_{H_2O}} \quad (\text{bez rozměru, příp. } \times 100 \%). \quad (2)$$

**Směšovací poměr**<sup>3</sup> (angl. mixing ratio, moisture content, humidity content)  $r$  je podíl hmotnosti vodní páry  $M_{H_2O}$  k celkové hmotnosti suchého plynu  $M_{sp}$ ,

$$r = \frac{M_{H_2O}}{M_{sp}} \quad (\text{bez rozměru, příp. } \times 100 \%). \quad (3)$$

K definicím učiňme několik poznámek:

- Tyto pojmy jsou v porovnání s těmi, které zavedeme později, v následujícím smyslu jednoduché. Je-li zamezena výměna částic plynu s okolím (představme si plyn uzavřený v nádobě), pak zmíněné veličiny *nezávisí* na teplotě plynu.<sup>4</sup> Je to pochopitelné, neboť v tomto případě jsou všechny definující veličiny fixovány. Podobně, směšovací poměr i měrná vlhkost zůstávají konstantní i při změně vymezení objemu (zachovávajíce přitom počet částic plynu uvnitř).
- Z uvedených definic plyne, že informace nesená měrnou vlhkostí a směšovacím poměrem je jedna a táž. Platí totiž  $\frac{1}{q} = \frac{1}{r} + 1$ , neboli  $q = \frac{r}{r+1}$ ,  $r = \frac{q}{1-q}$ .

---

<sup>1</sup>Vlhkým plynem je myšlen plyn, v němž je přítomná vodní pára. Odstraněním vodní páry získáme plyn suchý.

<sup>2</sup>Intuitivně používáme výrazy plyn i pára. V podstatě je můžeme volně zaměňovat, neboť jakýkoli plyn je pára svého kapalného skupenství. Plynem nazýváme ty páry, které jsou svým stavem dostatečně vzdáleny své kapalně fázi (např. teplota plynu je výrazně (řádově) vyšší než teplota varu kapaliny). Proto kyslík označujeme jako plyn, zatímco plynnou vodu jako páru (plynná i kapalná voda spolu za normálních podmínek mohou koexistovat). Při pojmu vodní pára si nesmíme představovat známou mlhu. Mlha je směs suchého vzduchu, vodní páry a vodního aerosolu — malých kapiček kapalně vody, které způsobují bílé zbarvení.

<sup>3</sup>Je třeba upozornit na skutečnost, že jak v české, tak i zahraniční literatuře nevládně shoda v názvosloví a velice často se pojmy měrné vlhkosti a směšovacího poměru zaměňují. Je tedy vždy lépe zkontrolovat, co má autor přesně na mysli.

<sup>4</sup>Přesněji: veličiny *nezávisí* na teplotě, pokud je tato dostatečně vysoká, aby se veškerá voda v objemu vyskytovala jako pára — tj. nedocházelo ke kondenzaci vody, čímž by se vyčlenila z popisovaného plynu. V dalším textu ukážeme, že taková hraniční teplota existuje.

- Absolutní vlhkost je přímo spjata s počtem molekul vody  $N$  v jednotkovém objemu vzduchu, neboť  $M_{\text{H}_2\text{O}} = N \cdot V \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}$ , tedy  $\Phi = N \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}$ , kde  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  je hmotnost molekuly vody.
- Měrná vlhkost udává, kolikatinu z hmoty celku tvoří voda (vždy  $0 \leq q \leq 1$ ).<sup>5</sup>
- Směšovací poměr udává poměr hmotností vody a suchého plynu, které bylo potřeba smíchat, abychom získali daný vzorek ( $0 \leq r \leq \infty$ ).<sup>6</sup>
- Z definic měrné vlhkosti a směšovacího poměru plyne, že pokud je vodní páry ve vlhkém vzduchu málo, myšleno  $M_{\text{sp}} \gg M_{\text{H}_2\text{O}}$ , bude rozdíl mezi těmito veličinami minimální,  $q \approx r$ .
- Jednotky uváděné u jednotlivých definic tohoto textu jsou jednotky z SI soustavy jednotek. V praxi se běžně používají jednotky odvozené, které mohou být vhodnější. Kupříkladu absolutní vlhkost je zvykem uvádět v  $\text{g}/\text{m}^3$ . Podobně se pro měrnou vlhkost a směšovací poměr používá jednotka  $\text{g}/\text{kg}$ . Konkrétně u směšovacího poměru se můžeme dále setkat s jednotkami ppmw, ppmv (parts per million by weight, parts per million by volume), resp. ppbw, ppbv (parts per billion by weight/volume). Zde ppmw, resp. ppbw, odpovídá číselně našemu směšovacímu poměru  $r$  vynásobenému  $10^6$ , resp.  $10^9$  (tedy  $r = 0,01 \Leftrightarrow r = 1\% \Leftrightarrow \text{ppmw} = 10\,000 \Leftrightarrow \text{ppbw} = 10^7$ ). Hodnoty ppmv, resp. ppbv, jsou také úměrné směšovacímu poměru a platí  $\text{ppmw} = 0,622 \text{ ppmv}$ , resp.  $\text{ppbw} = 0,622 \text{ ppbv}$ .<sup>7</sup>

Příklad: Nalijeme-li do uzavřené nádoby ve které je 1 kg suchého vzduchu 10 g vody a necháme vodu vypařit<sup>8</sup>, získáme vlhký vzduch se směšovacím poměrem  $r = 10\text{ g}/1000\text{ g} = 0,01 = 1\%$ , měrnou vlhkostí  $q = \frac{r}{r+1} = 0,0099 = 0,99\%$ . Víme-li dále, že objem nádoby je  $V = 1\text{ m}^3$ , vyjde absolutní vlhkost vzduchu  $\Phi = 10\text{ g}/1\text{ m}^3 = 10\text{ g}/\text{m}^3$  (a počet částic vodní páry<sup>9</sup>  $3,4 \times 10^{23}/\text{m}^3$ ).

**Závěr:** Zdefinovali jsme tři nejjednodušší pojmy používané pro vyjádření vlhkosti: absolutní vlhkost, měrnou vlhkost a směšovací poměr.

<sup>5</sup>Pro  $q = 0$  máme suchý plyn,  $q = 1$  odpovídá čisté vodní páře.

<sup>6</sup>Pro  $r = 0$  máme suchý plyn,  $r = \infty$  odpovídá čisté vodní páře.

<sup>7</sup>Pro zbláhlejšího čtenáře můžeme na obranu těchto názvů uvést, že v rámci ideálního přiblížení platí  $\text{ppmv} = 10^6 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}/p_{\text{sp}}$  (jak je vidět např. z (18), předposledního vztahu), a tedy díky (6) můžeme rovněž psát  $\text{ppmv} = 10^6 \cdot n_{\text{H}_2\text{O}}/n_{\text{sp}}$  a interpretovat ppmv jako počet molekul vody připadající na milion molekul suchého plynu. V rámci ideálního přiblížení dále souhlasí podíl počtů molekul s tzv. objemovým podílem. Odtud název. Pro ppmw, ppbv a ppbw lze vytvořit podobné úvahy, nicméně nejpodstatnější zřejmě je, že všechny tyto veličiny umíme dát do souvislosti s naším směšovacím poměrem  $r$ .

<sup>8</sup>V souladu s poznámkou <sup>4</sup> bychom se měli ujistit, že se všechna voda skutečně vypaří. Intuice nám ale správně napovídá, že pokud budeme mít dostatečně velký objem nádoby, k vypaření veškeré vody dojde; později budeme moci toto tvrzení ověřit. Konkrétně např. při teplotě  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  je pro náš experiment dostatečně velkým objemem  $V = 1\text{ m}^3$ .

<sup>9</sup>Z tabulek víme, že molární hmotnost vody (1 mol =  $6,022 \times 10^{23}$  částic) je 18,016 g/mol. 10 g tak odpovídá 0,56 molům, tedy  $0,56 \cdot 6,022 \times 10^{23} \approx 3,4 \times 10^{23}$  částicím — molekulám vody.

## Složení vzduchu, parciální tlaky a stavová rovnice

Běžný vzduch kolem nás je směsí řady plynů. Na složení suchého vzduchu se nejvýznamněji podílí  $N_2$ ,  $O_2$  a Ar, zatímco ostatní složky mají řádově menší zastoupení — viz tabulku 1.<sup>10,11</sup> Vlhký vzduch obsahuje navíc vodní páru. Pro představu uveďme, že běžná<sup>12</sup> absolutní vlhkost vzduchu je řádově kolem  $10 \text{ g/m}^3$ . Hustota suchého vzduchu je přitom asi  $1,2 \text{ kg/m}^3$  ( $p = 101,3 \text{ kPa}$  a  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Složka	Objem [%]	Hmotnost [%]
Dusík $N_2$	78,03	75,47
Kyslík $O_2$	20,99	23,20
Argon Ar	0,93	1,28
Oxid uhličitý $CO_2$	0,03	0,04
Ostatní: $H_2$ , Ne, He, Kr	0,02	0,01

Tabulka 1: Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu.

Často používaným přiblížením reálného plynu je model ideálního plynu. Ideální plyn má následující vlastnosti:

1. Je tvořen velkým počtem částic (aby se dalo dobře mluvit o jeho tlaku a jiných středních hodnotách).
2. Vlastní objem jeho částic je zanedbatelný v porovnání s celkovým objemem, ve kterém se nachází.
3. Částice se pohybují náhodně, žádný směr není preferovaný.
4. Částice pociťují sílu pouze během srážek. Všechny srážky jsou zcela elastické, přitom trvají zanedbatelnou dobu.

Přijmeme-li chování ideálního plynu za pro nás rozumné přiblížení,<sup>13</sup> můžeme snadno určit výsledný tlak plynu, který je směsí několika chemicky různých plynů (příkladem může být vzduch). Pro ideální plyn totiž platí, že celkový tlak (který souvisí s nárazy jednotlivých částic plynu na stěny nádoby) je dán prostým součtem tzv. *parciálních* tlaků jednotlivých plynů,

$$p = p_1 + p_2 + \dots \quad (4)$$

<sup>10</sup>Co se myslí hmotnostním zastoupením je pravděpodobně zřejmé. U objemového zastoupení ovšem můžeme lehce zaváhat. V případě ideálních plynů odpovídá objemové složení poměrnému zastoupení *počtu* molekul jednotlivých plynů, tedy molárnímu složení plynu.

<sup>11</sup>Někteří autoři zavádějí pojem atmosférický vzduch, což je skutečný vzduch kolem nás obsahující i všechna znečištění, jako je třeba prach. Nicméně suchým vzduchem titíž autoři již myslí atmosférický vzduch zbavený všech nečistot a vodní páry, tedy totéž, co my.

<sup>12</sup>při  $T \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti — definované dále v textu — kolem 60%. Poznamenejme ale, že při vyšších teplotách může být absolutní vlhkost řádově větší: při  $T \approx 80 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti 70% vychází již absolutní vlhkost  $200 \text{ g/m}^3$ .

<sup>13</sup>Skutečně se ukazuje, že přiblížení ideálního plynu je pro mnohé aplikace dostatečné. Všechny kvalitativní vlastnosti chování vlhkosti z něho plynou také.

Parciální tlak  $i$ -tého plynu je přitom roven tlaku tohoto plynu, kdyby byl v uvažovaném objemu přítomen jenom on sám. Tomuto pravidlu o sčítání tlaků se říká Daltonův zákon.<sup>14</sup>

V případě suchého vzduchu je v duchu předchozího odstavce celkový tlak určen součtem  $p = p_{\text{N}_2} + p_{\text{O}_2} + p_{\text{Ar}}$ , případně i dalších méně zastoupených složek. U vlhkého vzduchu přispívá k celkovému tlaku navíc parciální tlak vodní páry  $p_{\text{H}_2\text{O}}$ .

Rovnice, která dává do souvislosti tlak, objem, teplotu a množství plynu se nazývá *stavová rovnice*. V případě ideálního plynu má jednoduchý tvar:

$$pV = nRT, \quad (5)$$

kde  $p$  je tlak plynu,  $V$  je objem, který plyn zaujímá,  $n$  je molární množství plynu,  $R = 8,3144 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$  je plynová konstanta a  $T$  je teplota plynu (v kelvinech).

Pár poznámek k této rovnici:

- Molární množství vždy vyjadřuje *počet*. Mít něčeho jeden mol znamená mít toho právě  $6,022 \times 10^{23}$  kusů.<sup>15</sup> Například pět molů vodní páry odpovídá  $5 \cdot 6,022 \times 10^{23} = 30,11 \times 10^{23}$  částicím  $\text{H}_2\text{O}$ .
- Stavová rovnice popisuje plyn, který se skládá z částic, jejichž počet je vyjádřen množstvím  $n$ . Pod částicí si v tomto případě představujeme nějaký celek, který se pohybuje dohromady jako jeden kus. Popisujeme-li chování dusíku za normálních podmínek, je takovou částicí molekula  $\text{N}_2$ . V případě vodní páry je to molekula  $\text{H}_2\text{O}$ .
- Řekli jsme, že stavová rovnice popisuje chování obecného ideálního plynu. Měla by tedy popisovat i ideální vícesložkový plyn. Co je v tomto případě nutno považovat za molární množství? Není to opět nic než celkový počet částic (ve smyslu předchozí poznámky) vyjádřený v molech. Při počítání částic necháváme jejich chemickou povahu zcela stranou.<sup>16</sup>
- Z předchozího plyne, že stejné molární množství různých plynů se v ohledu  $p$ - $V$ - $T$  závislosti v ideálním přiblížení chová stejně.

<sup>14</sup>Když bychom si na chvíli představili plyn jako soubor částic, které se mezi sebou vůbec neovlivňují, tj. částic, které mění svou rychlost pouze odrazem o stěny nádoby, je Daltonův zákon okamžitě srozumitelný. Podobná situace zřejmě nastává u velmi zředěných plynů. Daltonův zákon říká navíc, že sčítání tlaků je správné i pro ideální plyn, kde ke srážkám mezi částicemi dochází.

<sup>15</sup>Toto číslo souvisí s historií měření hmot chemických prvků a nemá žádnou magickou podstatu.

<sup>16</sup>V přiblížení ideálního plynu platí pro každou složku plynu stavová rovnice samostatně:

$$\begin{aligned} p_1V &= n_1RT, \\ p_2V &= n_2RT, \\ &\vdots \\ p_nV &= n_nRT. \end{aligned}$$

(Každá složka se vyskytuje v celém objemu  $V$ , všechny složky mají v rovnováze stejnou teplotu  $T$ .) Sečtením rovnic dostaneme

$$(p_1 + p_2 + \dots + p_n)V = (n_1 + n_2 + \dots + n_n)RT.$$

Se znalostí Daltonova zákona víme, že součet tlaků na levé straně je roven celkovému (přímo měřitelnému) tlaku  $p$  vykazovaného plynem. Dospíváme tak k závěru, že  $n$  uvedené ve stavové rovnici — abychom ji mohli použít pro popis vícesložkového plynu jako celku — musí být rovno součtu všech množství  $n_i$ ,

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_n.$$

Příklad: Vezměme si opět případ suchého vzduchu. Běžný tlak a teplota vzduchu v našem okolí je zhruba  $p = 100 \text{ kPa}$  a  $T = 290 \text{ K}$ . Zaměříme-li se na objem  $V = 1 \text{ m}^3$ , dovoluje nám stavová rovnice spočítat celkové molární množství  $n$ :

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{100 \times 10^3}{8,3 \cdot 290} \text{ mol} \approx 41,5 \text{ mol.}$$

V uvažovaném objemu je tak  $41,5 \cdot 6,022 \times 10^{23} \approx 2,5 \times 10^{25}$  částic plynu. Tento počet zahrnuje jako částice molekuly  $\text{N}_2$ , molekuly  $\text{O}_2$  a atomy  $\text{Ar}$ . Využijeme-li znalost hmotnostního složení suchého vzduchu uvedeného v tabulce 1,  $\alpha_{\text{N}_2} = 75,5 \%$ ,  $\alpha_{\text{O}_2} = 23,2 \%$  a  $\alpha_{\text{Ar}} = 1,3 \%$ , můžeme spočítat molární množství jednotlivých složek, potažmo i jejich parciální tlaky. Pro každou složku totiž platí:

$$\begin{aligned} x_i &:= \frac{n_i}{n} = \frac{n_i}{n_1 + n_2 + \dots + n_n} = \frac{M_i/m_i}{M_1/m_1 + M_2/m_2 + \dots + M_n/m_n} = \\ &= \frac{\alpha_i/m_i}{\alpha_1/m_1 + \alpha_2/m_2 + \dots + \alpha_n/m_n}, \end{aligned}$$

kde index  $i$  označuje jednotlivé složky,  $M_i$  označuje hmotnostní množství  $i$ -té složky obsažené v daném objemu a  $m_i$  je molární hmotnost  $i$ -té složky (tj. hmotnost 1 molu). Veličina  $x_i$ , definovaná prvou rovností, se nazývá molární zlomek příslušné složky v daném plynu. (Poslední úpravou ve sledu rovností bylo podělení čitatele i jmenovatele celkovou hmotností plynu  $M$  a nahrazením  $M_i/M = \alpha_i$ .) Molární hmotnosti složek získáme z tabulek:  $m_{\text{N}_2} = 28 \text{ g mol}^{-1}$ ,  $m_{\text{O}_2} = 32 \text{ g mol}^{-1}$  a  $m_{\text{Ar}} = 40 \text{ g mol}^{-1}$ . Dosazením hodnot vyjde

$$x_{\text{N}_2} = 78 \%, \quad x_{\text{O}_2} = 21 \%, \quad x_{\text{Ar}} = 1 \%.$$

Z výsledků vidíme, že molární a hmotnostní složení plynu je mírně odlišné (díky různě hmotným částicím jednotlivých složek). Všimněme si, že hodnoty odpovídají objemovému složení plynu z tabulky 1, v souladu s poznámkou <sup>10</sup>.

Nakonec, podělením stavové rovnice pro  $i$ -tou složku,  $p_i V = n_i RT$ , stavovou rovnicí celku,  $pV = nRT$ , získáme

$$\frac{p_i}{p} = \frac{n_i}{n} = x_i \quad \Rightarrow \quad p_i = x_i p, \quad (6)$$

z čehož spočteme parciální tlaky

$$p_{\text{N}_2} = 78,1 \text{ kPa}, \quad p_{\text{O}_2} = 21,0 \text{ kPa}, \quad p_{\text{Ar}} = 0,9 \text{ kPa}.$$

**Závěr:** Ukázali jsme, že chování plynu (závislost  $p$ - $V$ - $T$ ) je v ideálním přiblížení závislé pouze na celkovém počtu částic plynu, ne na konkrétním chemickém složení plynu. Plyn, stejně jako každá jeho případná složka, je popsán stavovou rovnicí. Výsledný tlak plynu je dán součtem parciálních tlaků jednotlivých složek, které se v tomto ohledu chovají nezávisle na ostatních.

## Vypařování vody, tlak nasycených par

Představme si uzavřenou nádobu, ve které je vakuum. Do prostoru této nádoby vstříkneme nějaké množství vody. Nádobu umístíme do termostatu a budeme udržovat teplotu nádoby na definované teplotě  $T$ .

Řekněme, že podmínky (velikost nádoby, teplota) a množství použité vody byly zvoleny tak, že po ustálení stavu máme na dně nádoby jisté množství vody v kapalném stavu (pokud je nádoba průhledná, vidíme zřetelně vodní hladinu). Je možné říci něco o obsahu vodních par v prostoru nad hladinou?

Jedná-li se o ustálený stav, množství vody v kapalném stavu a plynné fázi se v čase dále významně nemění. Nicméně, mezi oběma fázemi stále probíhá výměna částic. Molekuly vody tvořící hladinu získají čas od času dostatečnou rychlost ve směru do prostoru nad hladinou, aby se z povrchové vrstvy vody vytrhly a staly se molekulami páry. Tento proces se nazývá *vypařování* a zřejmě snižuje počet molekul tvořících kapalnou fázi. Na straně druhé, některé molekuly páry narazí časem na vodní hladinu a jsou kapalnou fází pohlceny, dochází ke *kondenzaci*. Ustálený stav odpovídá situaci, kdy počet molekul opouštějících kapalnou fázi za jednotku času je právě roven počtu molekul do kapalnou fázi se za stejný čas vracějících.

Chceme-li odhadnout počet molekul vody, které za jednotku času přejdou z plynu do kapalnou fázi, můžeme zkusit předpokládat, že to bude nějaké procento z molekul, které na vodní hladinu za tento čas narazí. Jednoduchými úvahami se dá alespoň pro páru popisovanou rovnicí ideálního plynu ukázat, že počet molekul narážejících na jednotkovou plochu vodní hladiny za jednotku času je přímo úměrný tlaku vodní páry a nepřímo úměrný odmocnině z teploty.<sup>17</sup> Počet molekul páry pohlcených jednotkovou plochou hladiny kapalnou fázi za jednotku času je pak

$$N_{\downarrow} = \alpha \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{T}},$$

kde konstanta úměrnosti  $\alpha$  je pouhé číslo na teplotě a tlaku nezávisající.

O procesu vypařování se dá usoudit, že jeho rychlost závisí výhradně na vypařované látce a teplotě.<sup>18</sup> V kapalnou fázi jsou jednotlivé molekuly vody těsně vedle sebe. Vytržení molekuly stojí nějaké množství energie a dosažitelnost této energie souvisí s teplotou. Za běžných podmínek si lze představit, že to, jestli daná molekula opustí hladinu nebo ne, nesouvisí s podmínkami nad hladinou (množstvím vodní páry, okolním plynem). To je proto, že plyny nad hladinou představují mnohem řidší prostředí než kapalnou vodu a okamžitá srážka molekuly opouštějící hladinu s něčím, co by ji vrátilo zpět, není pravděpodobná.

Získáváme tak následující obraz. Za konstantní teploty je rychlost vypařování  $N_{\uparrow}$  konstantní. Rychlost pohlcování molekul hladinou  $N_{\downarrow}$  je za konstantní teploty úměrná tlaku vodní páry  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  nad hladinou. V ustáleném stavu platí  $N_{\uparrow} = N_{\downarrow}$ , a tedy tlak vodní páry je určen pouze teplotou.

Pokud do ustáleného stavu zasáhneme tím, že odčerpáme část vodní páry, snížíme tlak vodní páry nad hladinou. Rychlost vypařování se při udržování teploty nezmění, zatímco pohlcování vodní páry se zpomalí. Vypařování bude mít převahu, tlak vodní páry se bude zvětšovat, až

<sup>17</sup>V pozadí stojí tzv. kinetická teorie zjednodušeně řečeno ukazuje, že rychlost  $v$  částic plynu je určena rovností  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$ , kde  $m$  je hmotnost částice plynu,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je teplota v kelvinech. Dále lze zjednodušeně uvažovat, že počet částic, které za jednotku času narazí na jednotkovou plochu je přímo úměrný rychlosti částic a jejich počtu  $n$  v jednotkovém objemu,  $N_{\downarrow} \propto vn$ . (Představme si, že by se všechny molekuly na počátku pohybovaly stejným směrem směrem k ploše. Na plochu během jednotkového času narazí všechny, které nejsou moc daleko, tj. ty, které jsou do vzdálenosti rovné  $v \cdot 1$  s. Počet takových částic nad jednotkovou plochou je  $vn$ . Ve skutečnosti se ne všechny molekuly pohybují stejnou rychlostí a směrem k ploše, což vede k důsledku, že správný počet nárazů není  $vn$ , ale je tomuto číslu úměrný.) Počet částic v jednotkovém objemu je dán stavovou rovnicí ideálního plynu,  $p = nRT \Rightarrow n \propto p/T$ . Dáme-li to dohromady, dostaneme  $N_{\downarrow} \propto vn \propto \sqrt{\frac{T}{m}} \frac{p}{T} \propto \frac{p}{\sqrt{T}}$ .

<sup>18</sup>Pod pojmem vypařování zde rozumíme výhradně proces přechodu molekul z kapalnou fázi do plynnou. V běžném životě pod tímto pojmem většinou chápeme výsledný jev týkající se v našich pojmech jak vypařování, tak zpětné kondenzace.

dosáhne *původní hodnoty* rovné hodnotě před naším zásahem. Pokud bychom odčerpali příliš moc páry, mohlo by se stát, že se ve snaze dosáhnout původního tlaku vypaří veškerá voda. Tím se proces zastaví, v nádobě zůstane pouze pára a výsledná hodnota jejího tlaku bude nižší než hodnota původní.

Když naopak nějakým způsobem do nádoby připustíme trochu vodní páry (stále udržujeme konstantní teplotu), tlak vodní páry se zvýší a kondenzace vody převládne nad vypařováním. Nakonec se tlak vrátí opět až na *původní hodnotu* (hladina vody se poněkud zvedne).

Protože za definované teploty a tlaku je díky stavové rovnici určen i počet molekul páry vody v jednotkovém objemu a tlak páry v rovnováze je podle předchozího určen pouze teplotou, je pouze teplotou určen i počet molekul páry v jednotkovém objemu. Při snaze tento počet snížit resp. zvětšit dojde k intenzivnějšímu vypařování resp. kondenzaci. Výsledkem je vyrovnaní počtu na původní hodnotu.

Nemožnost zvýšit za našich podmínek koncentraci vodní páry se vyjadřuje slovy, že vodní pára je *nasyčená*.

Zatím jsme uvažovali pouze situaci s vodou a její párou. Nicméně, přidání dalších (ideálních) plynů do prostoru nad hladinou naše výsledky nijak zásadně neovlivní díky Daltonovu zákonu.<sup>19</sup> Úvahy o rovnováze mezi vodní párou a vodou platí v nezměněném duchu, ostatní plyny tvoří pouze jakési pozadí.

Příklad: S použitím našich nových představ o nasycených parách a znalosti stavové rovnice ideálního plynu (5) můžeme dokázat tvrzení z poznámky<sup>8</sup>, že 10 g vody v objemu 1 m<sup>3</sup> se při teplotě 20 °C bude v rovnováze vyskytovat pouze ve formě páry (nedojde ke kondenzaci):

Z poznámky<sup>9</sup> víme, že 10 g vody odpovídá 0,56 molům H<sub>2</sub>O. Ze stavové rovnice můžeme spočítat tlak, jaký by měla vodní pára, kdyby veškerá voda ve formě páry skutečně byla:

$$p = \frac{nRT}{V} = \frac{0,56 \cdot 8,31 \cdot 293,15}{1} \text{ Pa} \approx 1364 \text{ Pa}.$$

Pokud by tento tlak vyšel vyšší, než je tlak nasycených vodních par příslušející teplotě 20 °C, znamenalo by to, podle našich představ, že takový stav není rovnovážný. Část vodní páry by musela zkondenzovat a rovnovážného stavu by bylo dosaženo, až by tlak zbylé páry klesl na hodnotu nasycených par. Tlak nasycených vodních par je ale při naší teplotě (z tabulek) asi 2,3 kPa, a tudíž ke kondenzaci vody nedojde.

**Závěr:** Máme-li v uzavřené nádobě kapalnou vodu v rovnovážném stavu s její párou,<sup>20</sup> je vodní pára nasycená a za známé teploty  $T$  je její parciální tlak  $p_{\text{nas}}$  přesně určen. Z definice absolutní vlhkosti vidíme, že je určena také — v ideálním přiblížení platí

$$p_{\text{nas}} = n_{\text{nas}}RT \rightarrow n_{\text{nas}} = \frac{p_{\text{nas}}}{RT}, \quad \Phi = n \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}},$$

<sup>19</sup>Přesněji bychom se na tomto místě měli ještě zamyslet nad možným rozpouštěním přidaných plynů ve vodě a zvážit ovlivnění vypařování vody tímto rozpouštěním. K této problematice se vztahují tzv. Raoultův a Henryův zákon, s prvním z nichž se ještě setkáme později při popisu přípravy prostředí s danou relativní vlhkostí pomocí nasycených roztoků. Na tomto místě zmiňme tvrzení autora tohoto textu, že rozpouštění přidaných plynů má zanedbatelný vliv: přidání plynu NH<sub>3</sub>, který se rozpouští asi 10 000krát lépe než třeba O<sub>2</sub>, s parciálním tlakem 1 atm a při teplotě 0 °C vede k relativní změně tlaku nasycených vodních par o 0,1 % (a jde o snížení).

<sup>20</sup>Upřesněme, že v tomto textu vždy budeme uvažovat rovnováhu mezi párou a *rovnou* vodní hladinou. Mohli bychom totiž rozebírat i stav, kdy je kapalná voda v prostoru ve formě malých kapiček (taková situace nastává např. v mracích). Pak ovšem zakřivení povrchu kapiček má jistý vliv na proces vypařování a kondenzace a tlak nasycené vodní páry v okolí kapiček závisí kromě teploty i na jejich velikosti.

Nevyjádříme-li se explicitně jinak, uvažujeme rovnováhu mezi vodní párou a *čistou* vodou. Rozpuštění jiných látek ve vodě má vliv na rychlost vypařování, tedy i konečný rovnovážný stav. Viz poznámku<sup>19</sup>.

tedy

$$\Phi_{\text{nas}} = \frac{p_{\text{nas}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}}{RT}, \quad (7)$$

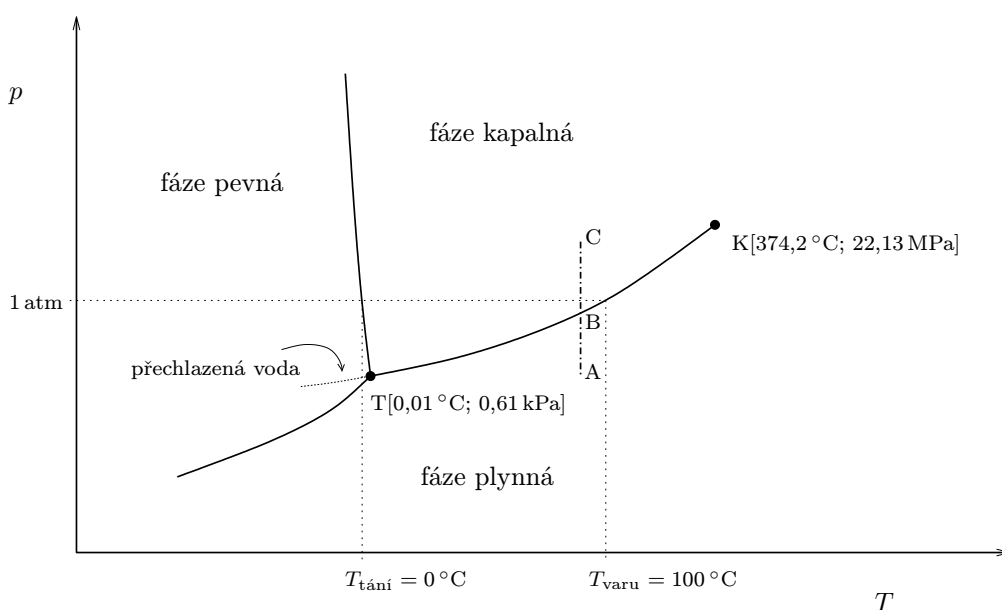
kde  $n$ , příp.  $n_{\text{nas}}$ , je počet molů vodní páry v jednotkovém objemu a  $m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}$  je hmotnost jednoho molu vody.

K otázce teoretického/praktického určení tlaku nasycených par jako funkce teploty,  $p_{\text{nas}}(T)$ , se vrátíme později.

## Fázový diagram vody

Zůstaňme ještě na chvíli u uzavřené nádoby umístěné v teplotním termostatu, dovnitř které jsme vstříkli definované množství vody a ve které se kromě vstříknuté vody nevyskytuje žádná jiná látka. V závislosti na velikosti nádoby, množství vstříknuté vody a teplotě termostatu mohou nastat různé situace. Jednu takovou jsme detailně prodiskutovali v minulé kapitole, nicméně možností výsledných konfigurací je mnohem více a bylo by nadměru užitečné mít nějakou pomůcku, která by nám řekla, jaký výsledek máme kdy očekávat. Touto pomůckou je tzv. *fázový diagram*.

Zjednodušený fázový diagram vody je zobrazen na obr. 1.



Obrázek 1: Zjednodušený fázový diagram vody.

Fázový diagram říká, v jaké fázi, případně fázích, se nachází voda, je-li známa její teplota a tlak.<sup>21</sup> Předpokládá se přitom, že daný systém je v rovnovážném stavu — tj., tento diagram nepopisuje přechodové jevy v našich experimentech, ale určuje výsledný stav.

<sup>21</sup>V tomto momentě diskutujeme fázový diagram čisté vody, tj. jednosložkového systému. Pokud se v takovém systému nachází současně několik fází, je tlak všech fází vody na rozhraních stejný, a proto si vystačíme s jediným tlakem  $p$ . Konkrétně pro rozhraní plyn–kapalina platí  $p = p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{pára}} = p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{kapalina}}$ . To zřejmě není pravdou pro systém, ve kterém se kromě vody navíc vyskytuje ještě jiná složka, například vzduch (běžný případ otevřené nádoby). Tam na případném rozhraní kapalně vody a plynu platí  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{kapalina}} = p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{pára}} + p_{\text{vzduch}}^{\text{suchý}}$ , tedy tlak kapalně vody je dán součtem parciálního tlaku vodní páry a suchého vzduchu. Chování takových vícesložkových systémů je

V našem případě lze diagram použít následovně. Libovolným způsobem připravíme nějakou situaci v nádobě (vpravíme vodu, změníme teplotu, změníme rozměry nádoby či definujeme zvnějšku tlak, prostě uděláme cokoli). Po ustálení stavu změříme uvnitř nádoby tlak  $p$  a se znalostí teploty  $T$  termostatu najdeme příslušný bod v diagramu. Neleží-li bod na některé plné čáře, bude voda v nádobě pouze v jedné jediné fázi, leží-li na některé plné čáře, budou v nádobě příslušné fáze koexistovat.

V případech uvažovaných v minulé kapitole jsme uvažovali rovnováhu mezi kapalnou a plynnou fází. Podle fázového diagramu se náš systém musel nacházet někde na čáře spojující body T a K, neboť pouze na této spojnici mohou zmíněné fáze koexistovat. Diagram zřejmě zachycuje ústřední myšlenku předchozí kapitoly, že dané teplotě přísluší při koexistenci obou fází jeden určitý tlak. Spojnice T–K tak představuje závislost  $p_{\text{nas}}(T)$ . Protože všechny naše experimenty probíhaly při dané konstantní teplotě a všechny<sup>22</sup> končily rovnováhou kapalně a plynné fáze, konečné rovnovážné stavy všech těchto experimentů odpovídaly jednomu a témuž bodu diagramu, řekněme bodu B.

Učíme opět několik poznámek:

- Mohli bychom snadno namítnout, že koncové stavy nemohou být v jednotlivých experimentech stejné — vždyť už jen celkové množství vody se liší, jednou jsme vodu přidali, jindy ubrali. To je pravda. Fázový diagram ovšem neříká, že jsou stavy zcela totožné, ale pouze, že jejich teplota a tlak jsou stejné. Diagram žádným způsobem nesouvisí ani s množstvím vody, ani s objemem nádoby.
- Diagram v sobě zahrnuje fázové přechody. Jeden takový kupříkladu odpovídá izotermickému ( $T$  je konstantní) posunu po úsečce ABC. Začneme v rovnovážném stavu A plynu uzavřeného v nádobě, jejíž objem je měnitelný. Zmenšováním objemu nádoby se při udržované konstantní teplotě pomalu posouváme směrem k bodu B (tlak přitom zákonitě roste). Jakmile dosáhneme bodu B, náš postup po úsečce se zastaví. Další zmenšování objemu povede ke zkapalňování plynu a to až do okamžiku, kdy se veškerý plyn změní na

---

třeba v obecnosti popisovat složitějšími (vícerozměrnými) fázovými diagramy. Někdy ovšem, například právě pro systém voda+vzduch, je možné využít i jednoduchý fázový diagram čisté vody a na základě jistých představ vyvozovat některé závěry. Důležitým příkladem budiž určení nasyceného tlaku vodních par. V minulé kapitole jsme řekli, že přítomnost dalších plynů (vzduchu) v ideálním přiblížení neovlivňuje proces vypařování vody. Proto lze uvedený fázový diagram přímo použít pro určení nasyceného tlaku vodních par za dané teploty i za přítomnosti jiných plynů.

Podobně lze usoudit, že rozhraní kapalina–led pociťuje naopak vždy celkový tlak v systému. Diagram lze pak použít i pro nalezení bodu tání ledu při různých okolních celkových tlacích, tj. za přítomnosti vzduchu (odečtení teploty tání ledu při okolním (celkovém) tlaku 1 atm je zakresleno v diagramu).

Nakonec můžeme z fázového diagramu vody odečíst i teplotu varu vody při různých okolních tlacích vzduchu (postup pro tlak 1 atm je opět zanesen v diagramu). Připomeňme si, že var odpovídá okamžiku, kdy nasycený tlak vodní páry je právě roven okolnímu celkovému tlaku. [Var odpovídá intenzivnímu vypařování v celém objemu kapalně vody. Představme si vznikající malou bublinku páry někde uvnitř kapaliny. Tlak, který se snaží tuto bublinku zvětšovat, je tlak vodních par, neboť nic jiného v bublince není. Tento tlak lze považovat za tlak nasycených par. Na druhé straně působí na bublinku tlak okolní kapaliny, který se snaží bublinku zmenšit a který je roven celkovému tlaku kapaliny v daném místě. Bublinka nezanikne (a může dojít k varu) pouze tehdy, pokud je tlak okolní kapaliny menší než tlak nasycených vodních par. Uvažujeme-li bublinku blízko vodní hladiny (abychom mohli zapomenout na přidaný hydrostatický tlak způsobený vodním sloupcem) lze tlak kapaliny ztotožnit s okolním tlakem vzduchu. Tak dospíváme ke zmíněné podmínce varu. (Zkusme si rovněž rozmyslet, že z popsaného mechanismu rovněž vyplývá, že v uzavřené nádobě docílíme varu pouze velice těžko; pokud se o to budeme snažit dostatečně pomalu (například pomalým zvyšováním teploty), tak k varu nedospějeme nikdy.)]

<sup>22</sup>Až na ten, kdy jsme odčerpali příliš moc páry a došla voda v kapalně podobě.

kapalinu. Celý proces přeměny plynu na páru se tak odehrává v jediném bodě fázového diagramu B (viz též předchozí poznámku). Po zkapalnění veškerého plynu se dalším snižováním objemu opět začneme pohybovat po úsečce nahoru směrem k bodu C (snižování objemu ovšem bude náročnější, neboť teď již stlačujeme kapalinu). Na zobrazování fázového přechodu se mnohem více než fázový diagram (tj.  $p$ - $T$  diagram) hodí  $p$ - $V$  diagram zobrazující izotermy.

- Na diagramu lze nalézt i čáry příslušející rovnovážné koexistenci fází kapalné a pevné, pevné a plynné. V bodě T, kde se čáry protínají, mohou existovat v rovnováze všechny tři fáze současně. Tento bod má zcela určenou polohu, pro vodu  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tlak  $0,61\text{ kPa}$ , a nazývá se *trojným bodem*.
- Jiným význačným bodem fázového diagramu je tzv. *kritický bod* K. Jeho význam pro nás ale momentálně není podstatný. Jenom pro zajímavost uvedme, že pokud bychom izotermicky stlačovali plyn s teplotou vyšší než odpovídající kritickému bodu, nedojde nikdy k ostrému fázovému přechodu do kapalného stavu, nýbrž plyn bude pozvolna měnit své vlastnosti (např. hustotu), až se bude chovat a vypadat jako kapalina.

Chování popsané výše zmíněným fázovým diagramem je ideálně jednoduché. Ovšem skutečně pozorované chování vody se od tohoto předpisu místy významně odchyluje. (Ne, není to tak, že by diagram byl špatně. Spíše tak, že jisté konfigurace vody, byť dlouhodobě nestabilní, a proto nezachycené v diagramu, se mohou přesto vyskytovat dostatečně dlouho, aby byly pozorovatelné.) Tak se v přírodě velmi často setkáváme s jevem, kdy se snižováním teploty vlhkého vzduchu dosáhne křivky voda-pára, aniž kondenzací vznikne nová fáze. Postupné ochlazování vede k přesycení vzduchu vodní párou,<sup>23</sup> až se při dosažení určité teploty náhle vytvoří vodní kapičky. Sama hodnota teploty je složitou funkcí nejen fyzikálního stavu ovzduší, ale i celkové koncentrace a chemické povahy kondenzačních jader, a nelze ji jednoduše odhadnout.<sup>24</sup> Podobně se v atmosféře vyskytují přechlazené vodní kapky (až desítky stupňů Celsia pod nulou). Na diagramu je toto přechlazení zachyceno tenkým tečkovaným pokračováním rovnovážné hranice mezi kapalinou a párou do oblasti, která by již běžně odpovídala pevné fázi. Například destilovanou vodu lze přechladit i do  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aniž by zmrzla. Ve skutečnosti je většina fázových přechodů v atmosféře spojena s větším či menším překročením křivek rovnovážných stavů fází.

Z předchozího odstavce plyne, že pro záporné teploty<sup>25</sup> je možné a někdy smysluplné při výpočtu tlaku nasycených vodních par uvažovat vedle rovnováhy led-pára i rovnováhu (přechlazená) kapalina-pára. Z našeho fázového diagramu vidíme, že tlak nasycené páry je nad kapalinou větší než nad ledem.

**Závěr:** K určení přítomných fází v rovnovážném systému se používá fázový diagram. Oblasti, kde se mohou v rovnováze nacházet dvě fáze současně jsou na diagramu zobrazeny jako

---

<sup>23</sup>Tj. v prostředí je více vodní páry, než odpovídá nasycení, relativní vlhkost převyšuje 100%. Takové prostředí se reálně nachází například ve Wilsonově mlžné komoře, což je detektor částic (alfa částic, beta částic, ...); za vynález tohoto detektoru byla roku 1927 udělena Nobelova cena.

<sup>24</sup>Na vytváření vodních kapiček, případně vytváření ledových krystalků, mají podstatný vliv různé nečistoty, cizí částice, nehomogenity, souhrně nazývané kondenzační jádra. Právě na nich dochází ke kondenzaci či k tvorbě krystalků. Absence účinných kondenzačních jader vede k možnému přesycení páry, přechlazení kapaliny, atd.

<sup>25</sup>Za normálního tlaku  $101,325\text{ kPa}$  je teplota tání ledu rovna  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přechodu odpovídá bod, který je po čáře rovnováhy led-voda mírně doleva nahoru od trojného bodu čisté vody. (Normální tlak je vyšší, než odpovídá trojnému bodu.) V případě tlaku rovnému tlaku trojného bodu vody,  $0,61\text{ kPa}$ , je bod tání roven  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Závislost bodu tání na tlaku je tedy viditelně velice slabá. Proto se běžně mluví o záporných a kladných teplotách místo o teplotě nad a pod bodem tání.

plné čáry.

(To, že se v přírodě často vyskytuje led, voda i pára současně za různých tlaků a teplot souvisí s nerovnovážným stavem takového systému a nenulovou dobou potřebnou na dosažení rovnováhy. Pokud podmínky trvají dostatečně dlouho a neleží na čarách fázového diagramu, led roztaje, voda zmrzne, ...)

Pro kladné teploty je tlak nasycených par dán rovnováhou mezi kapalnou vodou a její párou. Pro záporné teploty je třeba někdy uvažovat jak rovnováhu mezi ledem a párou (běžný případ), tak i rovnováhu mezi přechlazenou vodou a párou (častý případ v meteorologii).

## Odvození závislosti $p_{\text{nas}}(T)$ , Clausiova–Clapeyronova rovnice

V této technické kapitole odvodíme teoretickou závislost tlaku nasycené páry na teplotě.<sup>26</sup>

V termodynamice popisující fázové přechody se odvozuje tzv. Clausiova–Clapeyronova rovnice<sup>27</sup>

$$\frac{dp_{\text{nas}}(T)}{dT} = \frac{L}{T(V_{\text{plyn}} - V_{\text{kap}})}. \quad (8)$$

Rovnice popisuje změnu tlaku nasycených par  $dp_{\text{nas}}$  při (malé) změně teploty  $dT$ , známe-li při dané teplotě teplo  $L$  potřebné na vypaření jednoho molu vody, objem jednoho molu vodní páry  $V_{\text{plyn}}$  a objem jednoho molu kapaliny  $V_{\text{kap}}$ .

Objem  $V_{\text{plyn}}$  je běžně mnohem větší než  $V_{\text{kap}}$ . Proto  $V_{\text{plyn}} - V_{\text{kap}} \approx V_{\text{plyn}} = \frac{RT}{p_{\text{nas}}}$ . Pak

$$\frac{dp_{\text{nas}}(T)}{dT} = \frac{Lp_{\text{nas}}}{RT^2}. \quad (9)$$

Budeme-li předpokládat, že se  $L$  v námi uvažovaném teplotním rozsahu nemění, lze předchozí rovnici integrovat s výsledkem

$$\ln \frac{p_{\text{nas}}}{p_{\text{nas}}^0} = -\frac{L}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T^0} \right),$$

kde  $p_{\text{nas}}^0$  resp.  $T^0$  je tlak resp. teplota nasycené páry v nějakém známém bodě závislosti (ne příliš teplotně vzdáleném od  $T$ ). Pro účely numerického prokládání změřené závislosti lze předchozí rovnici přepsat ještě do tvaru

$$\ln p_{\text{nas}} = A + \frac{B}{T}, \quad (10)$$

přičemž při prokládání měníme konstanty  $A$ ,  $B$ .

Pokud předchozí řešení svou přesností nedostačuje — kvůli nesplněnému předpokladu o konstantnosti  $L$ , lze v prvním dalším přiblížení uvažovat lineární závislost na teplotě  $L = C + DT$ , kde  $C$ ,  $D$  jsou konstanty. Po dosazení do (9) a provedení integrace dostaneme

$$\ln \frac{p_{\text{nas}}}{p_{\text{nas}}^0} = -\frac{C}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T^0} \right) + \frac{D}{R} \ln \frac{T}{T^0},$$

pro účely prokládání

$$\ln p_{\text{nas}} = E + \frac{F}{T} + G \ln T, \quad (11)$$

<sup>26</sup>Samotné odvození není pro nás zase až tak důležité, navíc u něj na tomto místě nelze popsat všechny příslušné myšlenky. Mnohem podstatnější je závěr, který z odvození plyne, a proto lze beze ztráty něčeho důležitého přeskocit přímo na něj.

<sup>27</sup>Ve skutečnosti ji ovšem odvodil Carnot.

kde měníme konstanty  $E$ ,  $F$ ,  $G$ .

**Závěr:** Ukázali jsme odvození rovnic, které mohou být použity pro výpočet tlaku nasycených vodních par v závislosti na teplotě systému. Odvození bylo provedeno za jistých předpokladů, jejichž oprávněnost posoudíme později při porovnání odvozených závislostí se skutečnými daty.

Již odvození vedoucí k rovnici (10) ukazuje, že závislost tlaku na teplotě je zhruba exponenciální ( $A' = e^A$ )

$$p_{\text{nas}} = A' e^{\frac{B}{T}}, \quad (12)$$

a tedy lze očekávat, že pokud konstanta  $B$  je rozumně velká (a ona je),<sup>28</sup> bude se tlak s teplotou měnit dramaticky, v rámci několika řádů. Z tabulek lze např. vyčíst, že při změně teploty z 21 °C na 32 °C se tlak nasycených vodních par nad vodní hladinou zdvojnásobí z 2,486 kPa na 4,754 kPa a při změně z -100 °C na +100 °C se tlak nasycených par změní až o 8 řádů z cca  $10^{-3}$  Pa na cca  $10^5$  Pa.

Byť jsme se v této kapitole tvářili, že se zabýváme rovnováhou mezi kapalnou vodou a vodní párou, stejné výpočty platí pro rovnováhu mezi ledem a párou, případně vodou a ledem; obecněji i jakýmkoli fázovým přechodem, se kterým je spojeno nějaké skupenské teplo  $L$ . Proto lze očekávat, že vztahy tvarů (10), (11) lze použít např. na výpočet nasyceného tlaku vodních par nad ledem — jen konstanty budou odlišné od konstant týkajících se rovnováhy ke kapalné vodě.

## Relativní vlhkost, stupeň nasycení, teplota rosného bodu, teplota ojínění

Nyní již můžeme přistoupit k dalším definicím týkajícím se vlhkosti plynů:

**Relativní vlhkost** (angl. relative humidity, často značená  $RH$ )  $\varphi$  za dané teploty je poměr hmotnosti  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  vodní páry obsažené v plynu ke hmotnosti  $M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$  vodní páry, jíž by byl nasycen týž objem vzduchu za uvažované teploty:

$$\varphi = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}} \quad (\text{bez rozměru, příp. } \times 100 \%). \quad (13)$$

Díky (1) lze relativní vlhkost vyjádřit i jako podíl skutečné absolutní vlhkosti plynu  $\Phi$  a absolutní vlhkosti  $\Phi_{\text{nas}}$  téhož plynu za stejné teploty, pokud by byla vodní pára nasycená:

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{nas}}} \quad (\text{bez rozměru, příp. } \times 100 \%). \quad (14)$$

Pro teploty vyšší než teplota tání ledu je nasycením vždy rozuměna rovnováha mezi párou a kapalnou vodou. Pro záporné teploty ovšem panuje nejednoznačnost pramenící z možné existence přechlazené vody. Tzv. *standardní* definice uvažuje vždy nasycení ve vztahu k ledu. Naproti tomu definice World Meteorological Organization (*WMO*) počítá nasycení za každých podmínek ve vztahu ke kapalné (pod nulou přechlazené) vodě.

<sup>28</sup>Uvažujme například, že  $T$  se mění v rozsahu 200 až 400 K (cca -70 až 130 °C). Pak podíl tlaků nasycených par v krajních bodech rozsahu bude dán  $\frac{p_{\text{nas}}(400 \text{ K})}{p_{\text{nas}}(200 \text{ K})} = e^{B[\text{K}](1/400-1/200)} = e^{-B[\text{K}]/400}$ . Vidíme tedy, že aby se tlak výrazně změnil, musí být  $B$  v absolutní hodnotě rozhodně větší než 400 K, a ne třeba 1 K. Z odvození rovnice (10) navíc plyne, že konstanta  $B$  je vždy záporná, a sice rovna  $-L/R$ . To znamená, že tlak nasycených par s teplotou roste. (Pohledem do tabulek zjistíme, že  $L \approx 2500 \text{ kJ/kg} \approx 45000 \text{ J/mol}$ , a tedy  $B \approx -5500 \text{ K}$ , což v našem uvažovaném rozsahu znamená změnu tlaku  $e^{5500/400} = 4 \times 10^5$  násobnou, tj. o pět řádů.

**Stupeň nasycení** (angl. degree of saturation)  $F$  je poměr směšovacího poměru  $r$  plynu a směšovacího poměru  $r_{\text{nas}}$  plynu, který by byl při stejné teplotě a stejném celkovém tlaku vodními parami nasycen:

$$F = \frac{r}{r_{\text{nas}}} \quad (\text{bez rozměru, příp. } \times 100 \%). \quad (15)$$

Ačkoli autor tohoto textu se nikde v literatuře nesetkal s rozlišením počítání  $F$  pro kladné a záporné teploty, je přesvědčen, že situace kolem stupně nasycení je zcela analogická situaci kolem relativní vlhkosti (v obou případech vchází do hry tlak nasycených par, který může být pro teploty pod bodem tání ledu uvažován ve vztahu jak ke kapalné vodě, tak i k ledu). Proto je podle něho potřebné pro teploty pod bodem tání ledu rozlišovat něco ve smyslu  $F_{\text{standard}}$  a  $F_{\text{WMO}}$ , nebo přinejmenším uvést, vzhledem k čemu je nasycení plynu myšleno.

**Teplota rosného bodu** (angl. dew-point temperature)  $T_{\text{ros}}$  je teplota, při níž je plyn vodními parami nasycen vzhledem k rovnému povrchu čisté vody, je-li změna teploty k nasycení provedena izobaricky.

**Teplota ojinění** (angl. frost-point temperature)  $T_{\text{oji}}$  je teplota, při níž je plyn vodními parami nasycen vzhledem k povrchu čistého ledu, je-li změna teploty k nasycení provedena izobaricky.

Poznámky k definicím:

- Relativní vlhkost  $\varphi$  je v tomto textu uvažována výhradně jako číslo z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . Pokud chceme využívat v textu odvozené vztahy a dosazovat do nich  $\varphi$  v procentech, je třeba na všech takových místech psát  $\varphi \rightarrow \frac{\varphi[\%]}{100}$ . Totéž platí o stupni nasycení  $F$ .
- Často používanou definicí relativní vlhkosti je podíl parciálního tlaku vodní páry a nasyceného tlaku páry při stejné teplotě,

$$\varphi' = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}. \quad (16)$$

(Do tohoto okamžiku jsme pro tlak nasycených vodních par používali jednoduché označení  $p_{\text{nas}}$ . Protože se dále budeme setkávat s vícero různými tlaky, změníme toto značení na  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$ , aby bylo na první pohled patrné, co máme na mysli.) Pokud je vodní pára popsitelná stavovou rovnicí ideálního plynu, je tato definice shodná s naší, neboť

$$p_{\text{H}_2\text{O}}V = n_{\text{H}_2\text{O}}RT = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}}RT, \quad p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}V = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}{m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}}RT,$$

z čehož plyne žádané

$$\varphi' = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}} = \varphi.$$

Obecně ovšem v oblastech, kde přiblížení ideálního plynu není dobré,  $\varphi' \neq \varphi$ .

- Další občas zhlédnutelnou vlastností jiných definic relativní vlhkosti je zmiňování konstantnosti celkového tlaku plynu při sycení plynu vodní párou. Například definice relativní vlhkosti z knihy Měření vlhkosti autorů J. Fexy, K. Širokého:

Relativní vlhkost je dána poměrem absolutní vlhkosti plynu k vlhkosti plynu s nasycenými parami za téže teploty a tlaku (plyn je při dané teplotě a tlaku vodní párou nasycen, když je v dynamické rovnováze s rovným povrchem vody při stejné teplotě a tlaku).

Porovnání této definice s naší vyžaduje zvýšení pozornosti.

Předně si uvědomme, že taková definice neumožňuje určit relativní vlhkost prostředí, ve kterém není nic než vodní pára. Je to proto, že tlak páry je v tomto případě roven celkovému tlaku (protože nic jiného v systému nemáme) a tlak nasycené páry je určen teplotou (jak jsme se snažili ukázat v minulých kapitolách). Pokud začneme s nenasyčenou párou o jistém tlaku, musí se tento tlak při sycení zákonitě zvětšovat (teplotu držíme tak či onak konstantní) a nakonec je roven teplotou určenému tlaku nasycených par. Celkový tlak je vždy roven tlaku par a nelze ho tak držet konstantní.

Rozmyslíme-li to ještě trochu dále, zjistíme, že definice zmiňující konstantnost celkového tlaku se nedokáže vypořádat ani se situací, kdy kromě vodní páry je přítomný ještě i nějaký jiný plyn, ale je ho málo: Definice vlastně požaduje, aby  $p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{sp}} = p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}} + p'_{\text{sp}}$ , kde  $p'_{\text{sp}}$  je tlak suchého plynu po nasycení. V průběhu sycení tlak páry roste, a tedy parciální tlak suchého plynu musí klesat. Je-li ovšem  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}} - p_{\text{H}_2\text{O}} > p_{\text{sp}}$ , což, pokud je suchého plynu málo, může jistě nastat, muselo by pro splnění rovnosti tlaků být  $p'_{\text{sp}} < 0$ , a to nelze.

Přítom relativní vlhkost definovaná naší definicí (nezmiňující celkový tlak) má v obou výše uvedených situacích smysl a říká nám přesně to, co od daného pojmu očekáváme: kolik vody je v prostoru v porovnání s maximálním možným množstvím, které by v prostoru mohlo být, aniž by došlo ke kondenzaci.

Pro úplnost rozeberme ještě chování definice „s celkovým tlakem“ v případě, že suchého plynu je dostatečně, abychom nenarazili na problém záporného tlaku  $p'_{\text{sp}}$  (pouze tehdy lze definici vlastně použít): (A) Platí-li ideální přiblížení, pak vodní pára a suchý plyn existují nezávisle na sobě. Díky ekvivalenci (14) a (13) a platnosti  $\varphi = \varphi'$ , kde  $\varphi'$  je definováno rovností (16), lze pro výpočet podle diskutované definice použít rovnici (16). Tlak nasycené páry je určen teplotou a nijak nesouvisí s přítomností suchého plynu a udržováním celkového tlaku. Definice tak dává stejný výsledek, jako naše definice. Udržování celkového tlaku nemá žádný význam. (B) Ideální přiblížení neplatí. To je možné, jak rozebereme později, při nízkých teplotách a/nebo vysokých tlacích (třeba při 10 atmosférách). V těchto podmínkách již dochází k ovlivňování páry přítomností suchého plynu (už není dostatečně pravda, že tlak nasycené páry závisí pouze na teplotě; tlak páry vykazuje měřitelnou závislost i na parametrech suchého plynu). Proto je potřeba nějakým způsobem specifikovat, co se má během sycení dít se suchým plynem (pokud by se s ním dělo něco jiného, mohlo by to mít jiný vliv na vodní páru a celkový výsledek by mohl být jiný). Tato nutnost určení „co-dělat-se-suchým-plynem“ je pravděpodobně hlavní důvod, proč se vůbec kde objevuje zmínka o celkovém tlaku. Naše definice, všimněme si, tento problém skutečně žádným způsobem neřeší, neboť si suchého plynu v nejmenším nevšímá. Je jistě více různých podmínek, které bychom mohli vyžadovat a tím řešit co-dělat-se-suchým-plynem. Mohli bychom například požadovat, aby se tlaky  $p_{\text{sp}}$  před a po nasycení rovnaly. Narozdíl od udržování celkového tlaku by taková volba fungovala dobře i v případech, kdy udržování celkového tlaku není možné. Naproti tomu je ale udržování celkového tlaku z experimentálního hlediska mnohem jednodušší. To je asi i důvod, proč

se občas objevuje v definicích. Abychom na závěr trochu pozvedli možná poněkud pokleslou váhu definice „s celkovým tlakem“, poznamenejme, že pro běžný plyn je parciální tlak páry řádově menší než tlak suchého plynu, a tedy s definicí na problémy zmíněné na počátku této diskuze jen tak nenarazíme.

- Zatímco teplota rosného bodu může být kladná i záporná (vzpomeňme rovnováhu přechlazené vody a páry), teplota ojínění, má-li mít smysl, je vždy nižší než teplota tání ledu.
- Rozdíl mezi standardní a WMO definicí relativní vlhkosti je pro záporné teploty značný (pro kladné teploty jsou definice stejné). Z faktu, že nasycená pára vzhledem ke kapalné vodě má vyšší tlak než nasycená pára vzhledem k ledu, plyne, že standardní relativní vlhkost bude vždy větší než WMO vlhkost. Například podle [2]:

$t [^{\circ}\text{C}]$	$\varphi_{\text{WMO}} [\%]$	$\varphi_{\text{standard}} [\%]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$\varphi_{\text{WMO}} [\%]$	$\varphi_{\text{standard}} [\%]$
0	100	100	0	100	100
-10	100	110,3	-10	90,7	100
-20	100	121,7	-20	82,2	100
-30	100	134,3	-30	74,5	100
-40	100	148,3	-40	67,4	100

- Zatímco relativní vlhkost, teplota rosného bodu a bodu ojínění mají smysl i pro systém, ve kterém se nachází pouze voda, opak je pravdou pro stupeň nasycení. Jeho definice se totiž opírá o směšovací poměr, který sám o sobě vyžaduje přítomnost další látky, konkrétně suchého plynu.
- V kapitole o výpočtech v ideálním přiblížení ukážeme, že v běžných podmínkách (kdy dobře platí ideální přiblížení a suchý plyn tvoří většinu uvažovaného vlhkého plynu) jsou hodnoty relativní vlhkosti  $\varphi$  a stupně nasycení  $F$  velice podobné (pro  $\varphi \rightarrow 0 \Leftrightarrow F \rightarrow 0$  i  $\varphi \rightarrow 1 \Leftrightarrow F \rightarrow 1$ ; v oblasti mezi krajními body jsou veličiny tím blíže, čím více platí  $p > p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$ ). Tato podobnost občas vede k jejich zaměňování, ba dokonce je občas relativní vlhkost definována jako naše  $F$  (upozorněme nicméně, že za podmínek vzdálených těm popsaným na začátku této poznámky jsou  $F$  a  $\varphi$  zcela jiné veličiny).

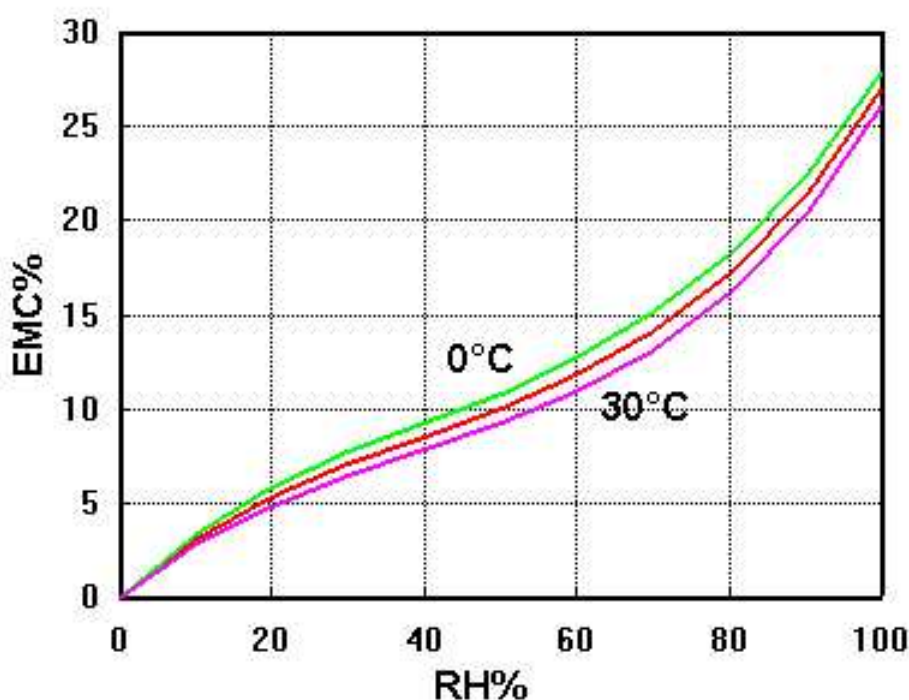
Než přistoupíme k samotným výpočtům, kterými svážeme jednotlivé vlhkostní veličiny, zkusme získat mírný nadhled nad jejich použitím a smyslem.

Nejvýznamnější veličinou pro běžného člověka je relativní vlhkost. To je proto, že rychlost vypařování vody (ať už při sušení prádla nebo při pocení; vypařováním je zde myšlen souhrnný proces vypařování a kondenzace) souvisí úzce s hodnotou relativní vlhkosti. Při 100 % relativní vlhkosti nemůže okolní vzduch pojmout žádnou další vodní páru a vypařování se zastaví (prádlo neschne, kaluže nevysychají, člověk pociťuje jakoby vyšší teplotu, než reálně je, neboť přirozený mechanismus pro ochlazování, pocení, nefunguje<sup>29</sup>).<sup>30</sup>

<sup>29</sup>Pro potřeby zohlednění vlivu relativní vlhkosti na člověka byl vytvořen tzv. Heat index kombinující skutečnou teplotu a relativní vlhkost a říkájící zdánlivou teplotu, kterou cítí člověk.

<sup>30</sup>Díky existenci dvou definic relativní vlhkosti a rozličnému chování materiálů při teplotách pod bodem tání ledu může nastat případ, kdy i přes 100% vlhkost (hned uvidíme, že myslíme standardní vlhkost) stále dochází k významnému vypařování. Pohledem do výše uvedených tabulek standardní a WMO relativní vlhkosti zjistíme, že např. při teplotě  $-10^{\circ}\text{C}$  je při  $RH_{\text{standard}} = 100\%$   $RH_{\text{WMO}} = 90,7\%$ . Pokud do těchto podmínek umístíme materiál, ve kterém je i při tak nízké teplotě voda v kapalné fázi (materiál způsobí, že kapalná voda v něm bude stabilní), bude tato voda efektivně pociťovat WMO relativní vlhkost a bude se vypařovat do okolí, materiál bude vysychat. Více o tomto např. v [6].

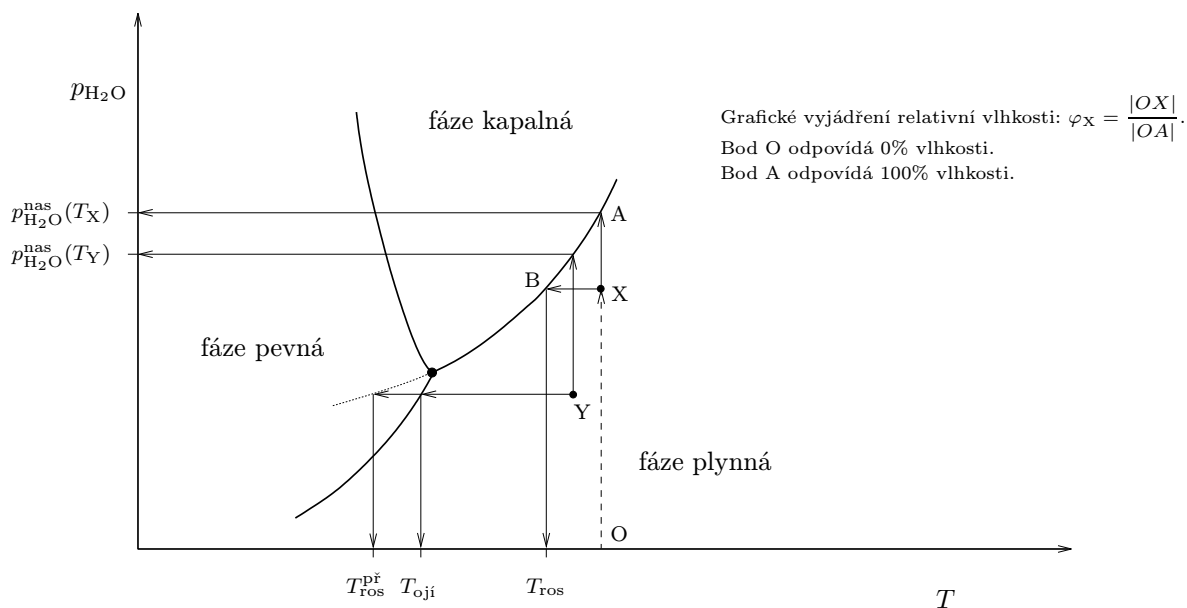
Rovněž při uchovávání muzijních exponátů je relativní vlhkost veličinou, která přímo určuje množství vody obsažené v předmětech. Slovem „přímo“ zdůrazňujeme, že v rámci každodenních potřeb není nutné udávat nějaký další parametr, jakým je např. teplota. Toto chování je dokumentováno obrázkem 2, na kterém jsou zachyceny tzv. absorpční izotermy dřeva, tj. souvislosti relativní vlhkosti okolního prostředí s množstvím vody absorbované dřevem (anglicky EMC, Equilibrium Moisture Content) po ustanovení rovnováhy za dané teploty. Je-li uvažované dřevo skladováno v prostředí s relativní vlhkostí 50 %, bude po ustanovení rovnováhy voda tvořit zhruba 10 % celkové hmotnosti dřeva a to jen s velmi malou závislostí na teplotě — na obrázku vidíme izotermy (závislosti měřené za konstantní teploty) v rozsahu 0–30 °C. Podobné chování má i většina jiných materiálů, jako je bavlna, len, vlna, hedvábí, silikonový gel nebo i beton. Uvědomme si v tomto ohledu skutečné výsadní postavení relativní vlhkosti oproti jiným vlhkostním veličinám (směšovacímu poměru, absolutní vlhkosti, teplotě rosného bodu, . . .), u kterých by takový přímý vztah neexistoval a závislost na teplotě by byla naprosto zásadní. Obrázek byl převzat z [5].



Obrázek 2: Souvislost relativní vlhkosti prostředí s rovnovážným množstvím vody absorbované dřevěným materiálem. EMC udává, kolik procent z celkové hmoty (mokrého) materiálu tvoří voda.

Rosný bod, případně bod ojínění, je důležitý v momentě, kdy nás zajímá okamžik započetí kondenzace vody, orosení/ojínění. Máme-li kousek materiálu, který ochlazujeme, jeho teplota se snižuje a v určitém okamžiku se na něm vysráží voda/led. Stane se tak tehdy, když teplota materiálu klesne na hodnotu rosného bodu/bodu ojínění okolního vzduchu. K ojínění, tj. vysrážení ledu, může dojít, pouze pokud má materiál (nebo obecněji místo, kde ke kondenzaci dochází) teplotu pod bodem tání ledu. K vysrážení vody může dojít nad i pod bodem tání. Odpověď, zda pod bodem tání ledu dojde ke kondenzaci ledu nebo vody není úplně jednoduchá a souvisí

s prostředím, kde ke kondenzaci dochází (v mracích jde často o vodu, v běžných pozemských podmínkách o led).



Obrázek 3: K vysvětlení pojmu rosného bodu a bodu ojínění.

Souvislost rosného bodu/bodu ojínění s fázovým diagramem vidíme na obr. 3. Na obrázku jsou nakresleny dva výchozí body X a Y. Oba dva odpovídají systému s vodou pouze v plynné fázi. Vidíme, že pro systém X má smysl teplota rosného bodu  $T_{ros}$ , ale ne teplota ojínění. U systému Y je běžné naopak uvést teplotu ojínění  $T_{oji}$ , zatímco případnou teplotu rosného bodu  $T_{ros}^{pr}$  je nutno chápat ve vztahu k přechlazené vodě. Z diagramu je rovněž patrné, že v takovém případě vždy platí  $T_{ros}^{pr} < T_{oji}$ . Všimněme si, že teplota obou systémů je vyšší než teplota tání ledu. Rozhodnutí, zda dojde ke kondenzaci vody nebo ledu, tak nelze jednoduše udělat pouze podle okamžitých teplot. Můžeme nicméně vždy zkusit spočítat teplotu rosného bodu a tuto porovnat s teplotou tání ledu (je-li pak (za běžných podmínek)  $0^\circ\text{C} \approx T_{tání} < T_{ros}$ , bude kondenzovat voda, v opačném případě mohou nastat oba případy).

Pro uchování názorné představy je na obr. 3 zobrazen způsob určení tlaku nasycených par při teplotách odpovídajících oběma systémům X, Y. Dále pak grafické vyjádření relativní vlhkosti vycházející ze skutečnosti, že relativní vlhkost je za dané teploty dána poměrem aktuálního a nasyceného tlaku vodní páry (přesně alespoň v ideálním přiblížení).

Uvědomme si, že máme-li systém s nenasycenými vodními parami (jako jsou např. oba zmínované systémy X a Y na obr. 3), můžeme takový systém přivést k nasycení mnoha různými způsoby. Ve fázovém diagramu se jedná o posunutí do libovolného bodu ležícího na rovnovážné čáře. Sycení za konstantní teploty (realizovatelné např. izotermickým stlačováním celého systému nebo přidáváním vody do systému) odpovídá ve fázovém diagramu vertikálnímu posuvu směrem nahoru k čáře rovnováhy. Pro systém X jde o posun podél XA. Nasycený systém pak má původní teplotu  $T_X$  a tlak nasycených par  $p_{H_2O}^{nas}(T_X)$ . Stejně dobře ovšem můžeme systém přivést k nasycení snižováním teploty a zachováváním tlaku par. Pro systém X jde tentokrát o vodorovný posun podél XB. Při dosažení nasycení bude mít systém teplotu  $T_{ros}$  a tlak nasycených par bude roven původnímu tlaku par systému X. Nebo při sycení můžeme vybrat ještě úplně jinou komplikovanou cestu.

Dále stojí za poznámku, že udržování konstantního tlaku par zmíněné v definici rosného bodu/bodu ojinění (tj. určení cesty, po které dojde k nasycení plynu; v předchozím odstavci jsme ukázali, že takových cest je bez upřesňující podmínky nepočítaně) je přesně to potřebné, aby definice měla reálnou účelnost. V praxi máme totiž nejčastěji prostředí, ve kterém nedochází k významnější změně celkového tlaku plynu (tlak je například určen okolní atmosférou). Pokud se zároveň nemění složení plynu, nemění se, jak plyne z (6), ani žádný z parciálních tlaků složek plynu. Tedy nás běžně, ptáme-li se na něco, co intuitivně odpovídá rosnému bodu/bodu ojinění, opravdu zajímá izobarické sycení (tj. při udržování konstantního tlaku).

Nakonec, abychom se opakovaně nezaplétali do problematiky spojené s rozlišováním teploty rosného bodu a bodu ojinění, zahrnující vždy úvahy o tom, který případ vlastně nastává, budeme v dalším textu používat pro oba pojmy dohromady jednotný pojem *zobecněný rosný bod*  $T_{zros}$  a rozlíšíme je pouze tam, kde to bude nutné. Tento název je čistě naše *soukromá domluva*, která má za cíl upozornit na to, že je třeba se více zamyslet. K této problematice se navíc váže komplikace spojená s tlakem nasycených par, který je jiný nad ledem a kapalnou vodou, a dále komplikace dvojí možné definice relativní vlhkosti pod bodem tání ledu. Nicméně, pokud máme správnou představu o tom, co vlastně počítáme, není třeba se příliš obávat. V kapitole o výpočtech jednotlivé varianty patřičně ošetříme.

**Závěr:** Zdefinovali jsme další čtyři pojmy používané pro vyjádření vlhkosti plynu: relativní vlhkost  $\varphi$ , stupeň nasycení  $F$ , teplotu rosného bodu  $T_{ros}$  a teplotu ojinění  $T_{oji}$ . Všechny tyto pojmy, narozdíl od pojmů z první kapitoly, mají přímou souvislost s fyzikálním procesem kondenzace a různým způsobem vyjadřují, jak daleko jsme vzdáleni momentu vystrážení vody: relativní vlhkost a stupeň nasycení určují relativní množství vody, které můžeme ještě do systému dodat při dané konstantní teplotě, aniž by ke kondenzaci došlo, teplota rosného bodu případně ojinění naproti tomu říkají, o kolik můžeme plyn ochladit, než dojde ke kondenzaci.

Zmínili jsme se o odlišnostech definic používaných různými autory a upozornili na kvalitativně odlišné chování standardní a WMO relativní vlhkosti při teplotách nižších než bod tuhnutí vody. Diskutovali jsme vztah rosného bodu a bodu ojinění a ukázali, který z nich je kdy relevantní. Pro zjednodušení následujícího textu jsme oba tyto body skryli pod soukromý (jinými autory nepoužívaný) název *zobecněný rosný bod*.

## Výpočty — úvod

Pro to, abychom byli schopni vypočítat pro nás zajímavé veličiny týkající se vlhkosti, musíme v prvé řadě mít dostatečnou sadu vhodných rovnic popisujících situaci. Jednoduchost případně složitost výpočtů přitom zřejmě závisí jednak na konkrétních veličinách, které nás zajímají, jednak na volbě dostačujícího přiblížení.

Máme-li štěstí, výpočty se mohou zredukovat na jednoduché aritmetické operace, které ani přímo nesouvisí s fyzikální podstatou plynu a jeho chováním. Příkladem je úloha určit měrnou vlhkost nebo směšovací poměr vlhkého vzduchu, známe-li jako vstupní parametry přímo hmotnosti suchého plynu a vodní páry, z nichž byl vlhký vzduch připraven. Pak jde o pouhé dosazení hodnot do příslušných definic.

Na druhé straně možné složitosti stojí úloha určit rosný bod vlhkého vzduchu ze znalosti momentální teploty, relativní vlhkosti a celkového tlaku.<sup>31</sup> V tomto případě máme co do činění

---

<sup>31</sup>Z kapitoly o vypařování vody víme, že tlak nasycených par vody je hlavně funkce teploty. O rosném bodě ukážeme, že se počítá ze znalosti tlaku nasycených par vody a relativní vlhkosti. Tedy uvidíme, že v rámci ideálního přiblížení není teplota rosného bodu závislá na celkovém tlaku. Při započtení neideálních efektů se

hned se dvěma fyzikálními procesy: Z definice rosného bodu víme, že uvažovaný systém musíme ochladit a přitom udržovat konstantní tlak. Budeme proto potřebovat rovnici a parametry popisující ochlazování plynu. Druhým fyzikálním procesem je samotná kondenzace vodní páry. Musíme být schopni určit, kdy máme ochlazování plynu zastavit, tj. kdy dojde k nasycení páry.

Vidíme, že různé úlohy se mohou lišit v počtu i druhu parametrů, které pro vyřešení úlohy potřebujeme znát. Můžeme se nicméně dohodnout na sadě parametrů, které budou vždy dostačovat pro všechny námi zamýšlené výpočty (někdy jen prostě některé nebudeme potřebovat). Jsou jimi celkový tlak plynu  $p$ , teplota  $T$ , celkový objem  $V$  a *jeden* z parametrů  $\{\Phi, r, q, p_{\text{H}_2\text{O}}, \varphi, F, T_{\text{zros}}\}$ <sup>32</sup> (absolutní vlhkost, směšovací poměr, měrná vlhkost, parciální tlak vodní páry, relativní vlhkost, stupeň nasycení, teplota zobecněného rosného bodu<sup>33</sup>). Udáním těchto parametrů (tedy například  $\{p, T, V, r\}$ ) máme dostatečně popsán stav plynu.<sup>34</sup>

Je skutečností, že ve většině případů nás zajímá pouze „lokální“ chování plynu, nikoli chování plynu jako celku. Vyjmeme-li z velkého objemu plynu menší vzorek, bude se s ohledem na vlhkost a další tzv. intenzivní veličiny chovat stejně jako původní velký objem. Proto se často uvažuje jednotkový objem a objemový parametr  $V$  charakterizující celkovou „velikost“ plynu se vynechává. Gibbsovo pravidlo fází, uvedené v poznámce, říká počet nutných parametrů pro určení intenzivních vlastností, čímž se vysvětluje, proč v našem případě požaduje tři a ne čtyři parametry.

Vedle „statického“ popisu plynu pomocí zmíněných parametrů (určujících momentální stav) potřebujeme (a) rovnici určující chování plynu při změně některého parametru — stavovou rovnici — a (b) rovnici popisující kondenzaci vodní páry v závislosti na parametrech plynu.<sup>35</sup> Obě potřebné rovnice lze uvažovat v různě realistických přiblíženích podle jevů, které bereme v potaz, nebo naopak zanedbáváme.

Použitelnost daného přiblížení posoudíme, porovnáme-li získané výsledky s výsledky úplnější teorie, popřípadě s důvěryhodnými daty. Naštěstí pro nás, i to nejjednodušší přiblížení, popsané v následující kapitole, dává použitelné výsledky pro naprostou většinu aplikací vyskytujících se za „běžných“ podmínek.

nicméně objeví i slabá závislost na celkovém tlaku.

<sup>32</sup>Tento parametr různým způsobem specifikuje, kolik vodní páry je v plynu obsaženo. Známe-li jeden takový parametr, jsme schopni alespoň teoreticky vypočítat kterýkoli jiný. Uvedená sada se dá rozšířit i o další exotičtější parametry, příkladem budiž tzv. nedosycenost ( $= p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, p) - p_{\text{H}_2\text{O}}$ ) či objemová vlhkost (raději zapomeňme).

<sup>33</sup>Zopakujeme, že tento náš soukromý název zastřešuje  $T_{\text{ros}}$  a  $T_{\text{ojí}}$ .

<sup>34</sup>Upřesněme ještě, že pod plynem myslíme systém nějakého (obecně neideálního) suchého plynu a vodní páry, tedy systém s jednou fází (plynnou) a dvěma složkami (suchý plyn a voda). Neuvažujeme případ, kdy by se v systému mohly během práce s ním objevit fázové přechody. [Každopádně ne fázové přechody týkající se suchého plynu, jejichž přítomnost by vyžadovala další parametry (s takovým případem se ale asi stejně jen tak nesetkáme). Případný výskyt kondenzace vody (tj. přítomnost kapalné fáze vody) v zásadě nevádí, pouze pak žádný vlhkostní parametr není potřeba, neboť víme jistě, že plyn je v tomto případě nasycen.]

Pro určení počtu nutných a postačujících parametrů pro popis stavu systému existuje pravidlo zvané Gibbsovo pravidlo fází. Pravidlo dává do souvislosti počet  $s$  složek v systému, počet  $f$  fází v systému a počet  $v$  stupňů volnosti systému (naš počet potřebných parametrů); pro přesnou definici těchto pojmů zde není dostatečný prostor, nelze než odkázat na příslušnou literaturu. Pravidlo zní:  $s + 2 = v + f$ . V našem případě  $s = 2$ ,  $f = 1$ , což znamená, že systém potřebuje k popsání  $v = 3$  parametry. Za tyto parametry se pak standardně bere tlak  $p$ , teplota  $T$  a nějaký z vlhkostních parametrů, například  $r$ . Pokud vás na tomto místě překvapuje, že zmiňujeme o jeden parametr méně než v hlavním textu, a sice že jsme vynechali objem  $V$ , čtete v klidu dál.

<sup>35</sup>V dřívější kapitole jsme za jistých předpokladů odvodili rovnici (11), která udává závislost  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T)$ , tedy jediným určujícím parametrem byla teplota. Důkladnější rozbor ukazuje, že tlak nasycených par závisí kromě teploty též velice slabě na dalších parametrech, například celkovém tlaku.

## Výpočty v ideálním přiblížení

V ideálním přiblížení považujeme jak samotný suchý plyn a samotnou vodní páru, tak i jejich směs za ideální plyn. Toto přiblížení je v běžných podmínkách pro naprostou většinu aplikací zcela dostatečné a přináší s sebou významnou výpočetní jednoduchost — díky jednoduchosti stavové rovnice ideálního plynu a souvisejícího faktu, že se jednotlivé komponenty plynu v tomto přiblížení z termodynamického hlediska neovlivňují.

Platí nám tedy

$$\left. \begin{array}{l} p_{\text{H}_2\text{O}}V = n_{\text{H}_2\text{O}}RT \\ p_{\text{sp}}V = n_{\text{sp}}RT \end{array} \right\} pV = nRT, \quad \text{kde } p = p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{sp}}, \quad n = n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{sp}}. \quad (17)$$

Již pomocí těchto rovnic můžeme snadno odvodit přepočty mezi prvními čtyřmi vlhkostními parametry  $\{\Phi, r, q, p_{\text{H}_2\text{O}}\}$ .<sup>36</sup>

$$r \leftrightarrow p_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\begin{aligned} r &= \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{sp}}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}/m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}}{M_{\text{sp}}/m_{\text{sp}}^{\text{mol}}} \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}}{m_{\text{sp}}^{\text{mol}}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{sp}}} \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}}{m_{\text{sp}}^{\text{mol}}} = \\ &= \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}V/RT}{p_{\text{sp}}V/RT} \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}}{m_{\text{sp}}^{\text{mol}}} = 0,622 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{sp}}} = 0,622 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p - p_{\text{H}_2\text{O}}}, \end{aligned} \quad (18)$$

kde jsme využili znalosti molární hmotnosti vody  $m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}} = 18,016 \text{ g/mol}$  a suchého vzduchu  $m_{\text{sp}}^{\text{mol}} = 28,966 \text{ g/mol}$  a skutečnosti, že pro celkový tlak plynu  $p$  platí  $p = p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{sp}}$ .

Mezi směšovací poměrem  $r$  a měrnou vlhkostí  $q$  platí dříve zmíněný vztah

$$q \leftrightarrow r$$

$$q = \frac{r}{r + 1} \quad (19)$$

(viz poznámky za definicemi těchto veličin).

Rovněž jsme již dříve (např. v rovnici (7)) zmínili vztah mezi absolutní vlhkostí, parciálním tlakem vodní páry a teplotou

$$\Phi = n \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}}{RT}, \quad (20)$$

kde  $n$  je počet molů vodní páry v jednotkovém objemu. Dosazením hodnot pro  $m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}$  a  $R$  dostaneme

$$\Phi = \frac{18,016 \text{ g/mol}}{8,314 \text{ J/mol K}} \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{T}, \quad (21)$$

tedy

$$\Phi \leftrightarrow p_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\Phi[\text{g/m}^3] = 2,167 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}[\text{Pa}]}{T[\text{K}]}. \quad (22)$$

Vztahy (18), (19) a (22) je jednoznačně určen přepočet mezi libovolnými dvěma parametry skupiny  $\{\Phi, r, q, p_{\text{H}_2\text{O}}\}$ . Tyto přepočty jsou uvedeny v tabulce 2.

<sup>36</sup>Osvěžme si, že celkový tlak  $p$  a teplotu  $T$  považujeme za známé.

	$\Phi$	$p_{\text{H}_2\text{O}}$	$r$	$q$
$\Phi$		$2,167 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{T}$	$\frac{2,167r}{0,622 + r} \frac{p}{T}$	$\frac{2,167q}{0,622 + 0,378q} \frac{p}{T}$
$p_{\text{H}_2\text{O}}$	$0,4615T\Phi$		$\frac{pr}{0,622 + r}$	$\frac{pq}{0,622 + 0,378q}$
$r$	$\frac{0,622\Phi}{2,167 \frac{p}{T} - \Phi}$	$\frac{0,622 p_{\text{H}_2\text{O}}}{p - p_{\text{H}_2\text{O}}}$		$\frac{q}{1 - q}$
$q$	$\frac{0,622\Phi}{2,167 \frac{p}{T} - 0,378\Phi}$	$\frac{0,622 p_{\text{H}_2\text{O}}}{p - 0,378 p_{\text{H}_2\text{O}}}$	$\frac{r}{r + 1}$	

Tabulka 2: Tabulka přepočtů mezi absolutní vlhkostí  $\Phi$ [g/m<sup>3</sup>], parciálním tlakem vodní páry  $p_{\text{H}_2\text{O}}$ [Pa], směšovací poměrem  $r$  a měrnou vlhkostí  $q$ . [Předpokládá se, že systém je popsán celkovým tlakem  $p$ [Pa], teplotou  $T$ [K] (ty pak považujeme vždy za známé) a jedním parametrem z množiny  $\{\Phi, p_{\text{H}_2\text{O}}, r, q\}$ .] Platnost uvedených vztahů je svázána s platností ideálního přiblížení (výjimkou je vždy platný přepočet  $r \leftrightarrow q$ ).

V dalším kroku bychom chtěli rozšířit možné přepočty vlhkostních parametrů o zbývající  $\varphi$ ,  $F$ ,  $T_{\text{zros}}$ . Zatímco žádný parametr z předchozí skupiny  $\{\Phi, r, q, p_{\text{H}_2\text{O}}\}$  přímo nesouvisel s kondenzací vody (parametry pouze různým způsobem určují množství vody v plynu), opak je pravdou pro parametry nyní uvažované (všechny určují, jak daleko jsme od podmínek vedoucích ke kondenzaci). Tato kvalitativně jiná vlastnost má důsledek, že do přepočtů jak mezi samotnými novými parametry, tak i mezi přepočtem dřívějších parametrů na parametry nyní zvažované vstupuje navíc nám již dobře známá veličina zvaná tlak nasycených vodních par,  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$ . O tlaku  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$  z předcházejících kapitol víme, že závisí výhradně na teplotě systému, tedy  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}} = p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T)$ . Zatímco samotnou závislost  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T)$  se budeme zabývat více později, na tomto místě je pro nás důležité si uvědomit, že znalost teploty  $T$  de facto znamená znalost  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$  (v nejhorším tento tlak vyhledáme v tabulkách), a tudíž včlenění veličiny  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$  do přepočtů mezi parametry s sebou nepřináší novou neznámou. Nic na tom nemění ani skutečnost, že občas potřebujeme znát tlak nasycených par vody nad ledem,  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{led})$ , jindy nad vodou,  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{voda})$ .

S pomocí  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$  a jednotlivých definic nyní snadno svážeme zbylé parametry:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \leftrightarrow \varphi$$

$$\begin{aligned} p_{\text{H}_2\text{O}} &= \varphi p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}} \\ \varphi &= \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}, \end{aligned} \quad (23)$$

jak plyne z (v ideálním přiblížení platné) definice relativní vlhkosti (16). Upřesněme: Pro  $T \geq T_{\text{tání}}$  platí  $\varphi_{\text{standard}} = \varphi_{\text{WMO}}$  a pro tyto teploty se ve vzorečku použije  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{voda})$ , tedy tlak nasycených vodních par nad kapalnou vodou. Pro  $T < T_{\text{tání}}$  platí  $\varphi_{\text{standard}} > \varphi_{\text{WMO}}$ , pro výpočet  $\varphi_{\text{standard}}$  je třeba použít  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{led})$ , zatímco pro  $\varphi_{\text{WMO}}$  použijeme  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{voda})$ .

Dále

$$F \leftrightarrow p_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$F = \frac{r}{r_{\text{nas}}} = \frac{0,622 p_{\text{H}_2\text{O}}}{p - p_{\text{H}_2\text{O}}} \frac{p - p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}{0,622 p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}} \frac{p - p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}{p - p_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (24)$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}} F p}{p - p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(1 - F)},$$

kde jsme využili dříve odvozený přepočítání mezi směšovací poměrem a parciálním tlakem vodních par,  $r \leftrightarrow p_{\text{H}_2\text{O}}$ . Pro rozhodování, které  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T)$  použít (tj. zda  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{voda})$ , nebo  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{led})$ ) platí stejná pravidla, jako jsme uvedli pro přepočítání  $\varphi \leftrightarrow p_{\text{H}_2\text{O}}$  — v úplné analogii s relativní vlhkostí počítáme vlastně  $F_{\text{standard}}$  či  $F_{\text{WMO}}$ .

Nakonec

$$T_{\text{ros}}, T_{\text{ojí}} \leftrightarrow p_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T_{\text{ros/ojí}}, \text{voda/led}). \quad (25)$$

Platnost této rovnice plyne přímo z definice rosného bodu, případně bodu ojínění, a její smysl si nejlépe uvědomíme pohledem na dříve uvedený obrázek 3. Výpočet rosného bodu  $T_{\text{ros}}$  je vždy proveden ze závislosti  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{voda})$ , výpočet bodu ojínění pak vždy z  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{led})$ . (Pokud se zajímáme o přepočítání ve směru  $p_{\text{H}_2\text{O}} \rightarrow T_{\text{zros}}$ , musíme, prozatím například s použitím tabulek, hledat takovou teplotu, aby tlak nasycených par při této teplotě odpovídal  $p_{\text{H}_2\text{O}}$ .) Víme, že aby měl bod ojínění smysl, musí  $T_{\text{ojí}} \leq T_{\text{tání}}$ . Navíc víme, že vždy vychází  $T_{\text{ros}} \leq T_{\text{ojí}}$  (viz diskuzi k obr. 3).

Nyní již umíme (s jediným háčkem tkvícím v prozatimní neznalosti přímého vypočtení  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T_{\text{ros}}, \text{voda/led})$ ) přepočítat libovolnou veličinu z  $\{\varphi, F, T_{\text{zros}}\} \leftrightarrow p_{\text{H}_2\text{O}}$  a též umíme libovolně mezi sebou přepočítávat veličiny dřívější skupiny  $\{\Phi, r, q, p_{\text{H}_2\text{O}}\}$ . To ovšem znamená schopnost přepočítat libovolný z námi uvažovaných parametrů skupiny  $\{\Phi, r, q, p_{\text{H}_2\text{O}}, \varphi, F, T_{\text{zros}}\}$  na libovolný jiný. V následující kapitole doplníme chybějící článek výpočtu, konkrétní závislost  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}(T, \text{voda/led})$ .

Příklad: Abychom dostáli slovu, využijme odvozených přepočtových vztahů pro důkaz tvrzení uvedeného v jedné z poznámek jdoucích za definicemi druhé sady vlhkostních veličin. Tam jsme zmínili blízkost relativní vlhkosti  $\varphi$  a stupně nasycení  $F$  za běžných podmínek. (Důkaz bude platný v rámci ideálního přiblížení, neboť takovou platnost mají odvozené přepočtové vztahy.)

Porovnáním rovnic (23) s první rovnicí (24) dostaneme  $F = \varphi \frac{p - p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}{p - p_{\text{H}_2\text{O}}} = \varphi \frac{p - p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}{p - \varphi p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}$ , tedy přepočítání  $F \leftrightarrow \varphi$ . Z něho plyne chtěná souvislost  $\varphi \rightarrow 0 \Leftrightarrow F \rightarrow 0$  i  $\varphi \rightarrow 1 \Leftrightarrow F \rightarrow 1$  (jistě platí  $p - p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}} > 0$ , a tím spíše i  $p - \varphi p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}} > 0$ ; prvá nerovnost souvisí s existencí  $r_{\text{nas}}$ , kterou vyžaduje samotná definice  $F$ , viz též přepočítání  $p_{\text{H}_2\text{O}} \rightarrow r$  v tabulce 2). Úpravou získáme  $\frac{\varphi}{F} = \frac{p - \varphi p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}{p - p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}}$ , z čehož dále plyne, že vždy  $F \leq \varphi$  a že procentuální odchylka  $\varphi$  od  $F$  je

$\left(\frac{\varphi}{F} - 1\right) \times 100\% = \frac{1 - \varphi}{p/p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}} - 1} \times 100\%$ . Odchylka je tím menší, čím větší je relativní vlhkost  $\varphi$  (potažmo stupeň nasycení  $F$ , směšovací poměr  $r, \dots$ ) a čím více platí  $p > p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}}$ . Například při teplotě  $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$  (z tabulek  $p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{nas}} \approx 4\text{ kPa}$ ) a okolním tlaku  $p = 1\text{ atm}$  je největší procentuální odchylka (nastávající pro  $\varphi \rightarrow 0$ ) asi 4%.

**Závěr:** V rámci ideálního přiblížení jsme odvodili přepočtení libovolného vlhkostního parametru ze skupiny  $\{\Phi, r, q, p_{\text{H}_2\text{O}}, \varphi, F, T_{\text{zros}}\}$  na libovolný jiný z téže skupiny. (Celkový tlak plynu  $p$ , pokud je k přepočtu potřeba, a teplota systému  $T$  jsou považovány za vždy známé.)

## Výpočet $p_{\text{nas}}(T, \text{voda/led})$

V této kapitole uvedeme některé vhodné vztahy pro přímý výpočet tlaku nasycených vodních par. Již v kapitole o Clausiově–Clapeyronově rovnici jsme ukázali, jaký tvar bychom pro tento vztah měli očekávat. Nicméně, neuvedli jsme potřebné numerické konstanty, a tak až do této kapitoly jsme byli nuceni tlaky vyhledávat ve fyzikálních tabulkách.

Principiálně bychom nyní mohli použít právě fyzikální tabulky a zkusit nalézt nejlepší konstanty pro vztah (10) nebo (11),<sup>37</sup>

$$\ln p_{\text{nas}} = A + \frac{B}{T}, \quad \ln p_{\text{nas}} = E + \frac{F}{T} + G \ln T, \quad (10), (11)$$

aby se co nejlépe shodoval s experimentálními daty tabulek. Přestože bychom byli víceméně úspěšní, zjistili bychom, že ve snaze o pokrytí potřebného širokého rozsahu teplot, např.  $-50$  až  $+100\text{ }^\circ\text{C}$ ,<sup>38</sup> nedokážeme data proložit dostatečně dokonale. Souvisí to s nedokonalým splněním předpokladů odvození vztahu (11), neboli, jinými slovy, s komplikovanějším chováním reálné vody. V závislosti na potřebách přesnosti se proto teplotní interval rozděluje na více částí (zpravidla dvě), v každé z nich se použije vlastní nejlepší proložení (s přirozenou podmínkou spojitosti v hraničních bodech). Příkladem takového postupu je vztah publikovaný firmou IST AG v [4]:

$$p_{\text{nas}} = C_1 \exp\left(\frac{C_2 t}{C_3 + t}\right), \quad (26)$$

kde

fáze	rozsah teplot $t$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$C_1$ [Pa]	$C_2$ [-]	$C_3$ [ $^\circ\text{C}$ ]
led	$-50$ až $0$	610,714	22,44294	272,440
voda	$-50$ až $0$	610,780	17,84362	245,425
voda	$0$ až $100$	610,780	17,08085	234,175

teplotu do vztahu dosazujeme ve  $^\circ\text{C}$  a tlak vychází v Pa (viz tabulku 3).

Všimněme si, že spojitost navázání dvou částí závislosti nad kapalnou vodou je v tomto případě zaručena stejnou konstantou  $C_1$  pro obě části (exponenciála je v hraničním bodě rovna jedné).

<sup>37</sup>Druhý jmenovaný je obecnější. Prvý dostaneme z druhého položením  $E = A$ ,  $F = B$ ,  $G = 0$ .

<sup>38</sup>Pro teploty pod bodem tání potřebujeme závislosti dvě, nad ledem a nad přechlazenou vodou, pro teploty vyšší bodu tání závislost jednu. Závislost vzhledem k ledu má tak relativně omezený rozsah teplot a vystačíme si zpravidla s jednoduchým proložením. Závislost nad kapalnou vodou je problematičtější.

$T$ [°C]	$p$ [Pa] voda	$p$ [Pa] led
-50	6,36E+00	3,94E+00
-45	1,11E+01	7,20E+00
-40	1,89E+01	1,28E+01
-35	3,14E+01	2,23E+01
-30	5,09E+01	3,80E+01
-25	8,07E+01	6,33E+01
-20	1,25E+02	1,03E+02
-15	1,91E+02	1,65E+02
-10	2,86E+02	2,60E+02
-5	4,21E+02	4,01E+02
0	6,11E+02	
5	8,73E+02	
10	1,23E+03	
15	1,71E+03	
20	2,34E+03	
25	3,17E+03	
30	4,25E+03	
35	5,63E+03	
40	7,38E+03	
45	9,59E+03	
50	1,23E+04	
55	1,57E+04	
60	1,99E+04	
65	2,50E+04	
70	3,11E+04	
75	3,85E+04	
80	4,73E+04	
85	5,77E+04	
90	7,00E+04	
95	8,45E+04	
100	1,01E+05	

Tabulka 3: Tlak nasycených vodních par; vztah fy IST AG.

Dále si ukažeme, jak vztah (26) odpovídá vztahu (11). Nejprve si všimněme rovnosti

$$\begin{aligned} p_{\text{nas}} &= C_1 \exp\left(\frac{C_2 t}{C_3 + t}\right) = C_1 \exp\left(C_2 \frac{C_3 + t - C_3}{C_3 + t}\right) = C_1 \exp\left(C_2 \left(1 - \frac{C_3}{C_3 + t}\right)\right) = \\ &= C_1 \exp(C_2) \exp\left(-\frac{C_2 C_3}{C_3 + t}\right) = A' \exp\left(\frac{B}{C + t}\right), \end{aligned}$$

kde  $A' = C_1 e^{C_2}$ ,  $B = -C_2 C_3$  a  $C = C_3$ . Pokud by číselně bylo  $C_3 = 273,15$ , měli bychom  $p_{\text{nas}} = A' e^{\frac{B}{T}}$ , kde  $T = t + 273,15$ , a tedy bychom reprodukovali závislost (12), která je přímo identická se vztahem (10), neboli odpovídá (11) při položení  $E = A = \ln A'$ ,  $F = B$ ,  $G = 0$ . Vidíme, že konstanta  $C_3$  je sice číselně blízka 273,15, nicméně není přesně taková. Navíc, ani konstanta  $G$  nám nepomůže, abychom docílili identity mezi uvažovanými vztahy. Vztahy (11) a (26) prostě nepopisují zcela stejnou závislost. Jak tomu tedy rozumět?

Vztah (10), resp. (11), jsme odvodili z fyzikálních představ v kapitole o Clausiově–Clapeyronově rovnici. Představme si, že bychom se ve zmíněné kapitole zastavili pouze u (10) a o vztahu (11) nevěděli nic. Protože bychom pravděpodobně používali Celsiovu stupnici, psali bychom všude místo odvozeného  $T$  součet  $t + 273,15$ . Zkusili bychom experimentálními daty proložit závislost (10), což znamená a priori měnit pouze dvě přítomné konstanty  $A$ ,  $B$ . Pro lepší proložení by nás ale mohlo napadnout zkusit (už bez fyzikálního opodstatnění) měnit i číslo 273,15. Tak dospějeme k formulce (26). Formulí tvaru (26) je v literatuře řada (pokaždé s mírně odlišnými numerickými konstantami) a obecně se jim říká Magnusovy formule.

Jiným postupem, jak se dobrat k lepší shodě s daty, je zlepšit fyzikální teorii. To je případ posunu od (10) k (11). A lze postupovat i dále.

V celé šíři možností lze takto obdržet nepřeberné množství rovnic, které se od sebe liší a z nichž každá souvisí jinou měrou s nějakou fyzikální teorií. V extrémním případě lze dokonce na jakýkoli fyzikální podtext zapomenout a zkusit prokládat libovolnou závislost, která nás napadne. Příkladem může být polynom dostatečně vysokého stupně. Množství různých rovnic pro výpočet tlaku nasycených par je uvedeno v [9].

Pro reálné počty je rovněž důležitá přiměřená jednoduchost vztahů a může se stát, že „nefyzikální“ závislosti budou vhodnější k manipulaci než závislosti více podpořené teorií. Magnusův vztah je ostatně příkladem, neboť, narozdíl od vztahu (11), lze snadno invertovat, a to je potřeba při výpočtu rosného bodu. Tato jednoduchost je důvodem jeho značného rozšíření.

Vedle jednoduchých méně přesných vztahů je potřeba mít jeden referenční vztah, o kterém víme, že velice přesně popisuje skutečná data (jeho vlastní komplikovanost zde není důležitá). Tímto vztahem se v poslední době stává vztah uvedený v [3], nazvěme ho ITS-90.<sup>39</sup> Pohlédneme zde pouze na jeho tvar

$$\ln p_{\text{nas}} = \sum_{i=0}^6 g_i T^{i-2} + g_7 \ln T \quad (27)$$

a uvědomme si příbuznost s naším vztahem (11) (vztah ITS-90 je rozšířením našeho o členy s dalšími mocninami  $T$ ). Hodnoty jednotlivých konstant  $g_i$  pro jednotlivé situace, stejně jako vztahy inverzní udávající rosný bod a bod ojínění, nalezne čtenář v odkazované literatuře.

Srovnáním výše uvedeného Magnusova vztahu (26) s referenčním ITS-90 dostaneme představu o chybě použití Magnusovy formule. Autor tohoto textu sice neprovedl úplnou analýzu, nicméně věří, že chyba Magnusovy formule je v rozsahu teplot  $-50$  až  $100$  °C lepší než 1 %.

<sup>39</sup>Podobnost názvu tohoto vztahu se jménem výše zmíněné fy IST AG je pouhou hříčkou náhody.

Příklad: Při výpočtu rosného bodu je třeba mít inverzní vztah k  $p_{\text{nas}}(t)$ . To lze u Magnusovy formule (26) jednoduše udělat s výsledkem

$$t = \frac{C_3 \ln\left(\frac{p_{\text{nas}}}{C_1}\right)}{C_2 - \ln\left(\frac{p_{\text{nas}}}{C_1}\right)} = \frac{C_3}{C_2 / \ln\left(\frac{p_{\text{nas}}}{C_1}\right) - 1}. \quad (28)$$

Tím máme samotnou inverzi. Rosný bod/bod ojínění získáme podle jeho definice, případně podle (25), (viz též obrázek 3) záměnou  $p_{\text{nas}} \rightarrow p_{\text{H}_2\text{O}}$ , tedy

$$t_{\text{zros}} = \frac{C_3}{C_2 / \ln\left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{C_1}\right) - 1}, \quad (29)$$

přičemž pro volbu konstant (rozhodování voda/led) platí vše, co bylo řečeno pod rovnicí (25). Hodnotu  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  umíme vypočítat z jakéhokoliv jiného vlhkostního parametru, a tudíž máme vše potřebné.

**Závěr:** Uvedli jsme dva konkrétní vzorečky pro výpočet tlaku nasycených vodních par: Magnusovu formuli s konstantami od fy IST AG, vhodnou pro reálné výpočty díky své jednoduchosti, a referenční formuli nazvanou ITS-90, kterou lze považovat za dokonale přesnou. V příkladu jsme ukázali inverzi Magnusova vztahu a explicitní výpočet rosného bodu (bodu ojínění).

## Speciální — dodatečné kapitoly

### Raoultův zákon a příprava prostředí s danou relativní vlhkostí pomocí nasycených roztoků

Z předchozího víme, že budeme-li mít v uzavřené nádobě čistou kapalnou vodu, vytvoří se časem nad její hladinou ustálené prostředí se stoprocentní relativní vlhkostí. Otázkou je, jak se situace změní, rozpustíme-li ve vodě nějaké množství jiné látky (např. kuchyňské soli nebo cukru).

Na tuto otázku dává částečnou odpověď tzv. **Raoultův zákon**, říkájící, že relativní *snížení* tlaku nasycené páry *rozpouštědla* nad roztokem je rovno molárnímu zlomku rozpouštěné látky v roztoku, tedy

$$\frac{-\Delta p_{\text{nas}}}{p_{\text{nas}}} = x, \quad x = \frac{n}{n + m}, \quad (30)$$

kde  $n$  udává počet molů rozpouštěné (přidané) látky a  $m$  počet molů použitého rozpouštědla (vody). Raoultův zákon platí dobře pro řadu organických látek (sacharozu, glukozu, močovinu), ale selhává obecně pro roztoky kyselin, zásad a solí.

Ve skutečnosti se ukazuje, že není až tak relevantní původní molární množství rozpouštěné látky, ale spíše počet molů částic, které se z rozpouštěné látky vytvoří po jejím rozpouštění. Například rozpouštěním kuchyňské soli, NaCl, dochází k rozpadu molekuly na  $\text{Na}^+$  a  $\text{Cl}^-$ , a

tedy při rozpuštění jednoho molu této soli je potřeba ve skutečnosti počítat s  $n = 2$ .<sup>40,41</sup> Při takovémto započítání disociace rozpouštěné látky (určení náležitého molárního množství) je možné (takto modifikovaný) Raoultův zákon úspěšně použit pro většinu látek.

Stojí za povšimnutí a zapamatování, že snížení tlaku par dané Raoultovým zákonem nespočívá (až na případnou disociaci rozpouštěné látky a s tím spojenou změnu  $n$ ) s chemickým složením rozpouštěné látky, ale pouze s molárním množstvím této látky. Toto chování je pouze idealizací související s představou roztoku jako tzv. ideálního roztoku, kdy síly mezi všemi molekulami jsou stejné: síla mezi dvěma molekulami nezávisí na tom, zda jde o molekuly rozpouštědla, rozpouštěné látky, nebo kombinace.<sup>42</sup>

Uvedme alespoň jednoduchou představu, proč dochází k poklesu nasyceného tlaku vodních par. Rozpuštěním přidané látky zaujmou některé molekuly této látky místa na povrchu roztoku a efektivně blokují vypařování vody. Naproti tomu návrat (zachycení) molekul vody z prostoru nad hladinou při jejich nárazu na hladinu se efektivně nezmění (to je představa ideálního roztoku).<sup>43</sup> Z představ uvedených dříve při popisu vzniku rovnováhy mezi vypařováním a zpětnou kondenzací (vytvoření nasyceného tlaku) pak plyne, že se nasycený tlak par rozpouštědla rozpouštěním přidané látky zmenší. (Pěkné úvahy na toto téma lze nalézt v [1].)

Rozpuštěním nějaké látky ve vodě tak docílíme snížení tlaku nasycené vodní páry nad hladinou roztoku, tedy vytvoření prostředí s menší než stoprocentní vlhkostí (protože relativní vlhkost je vztažena k prostředí s čistou vodou). Rozpuštěním většího a většího množství látky se relativní vlhkost prostředí monotónně snižuje. V jistém okamžiku (závislém na teplotě) však dojde k nasycení roztoku. Přidávání dalšího množství látky už nevede ke zvětšování  $x$  a relativní vlhkost prostředí nad hladinou roztoku se proto dále nemění. Máme-li viditelně nasycený roztok (na dně je vidět nerozpouštěná látka) a danou teplotu, je  $x$  určené látkou a rozpouštědlem,<sup>44</sup> a tedy je relativní vlhkost prostředí nad hladinou roztoku přesně daná. Této skutečnosti se občas využívá pro přípravu prostředí s určenou relativní vlhkostí (např. nasycený roztok NaCl takto při teplotě kolem 20 °C generuje asi 75,5% relativní vlhkost, nasycený roztok LiCl při stejné teplotě generuje 11,3% relativní vlhkost).

Příklad: Byť Raoultův zákon platí pro ideální roztoky, kterým nasycený roztok kuchyňské soli rozhodně není (ionty, na které se sůl rozpadne silně váží molekuly vody), zkusme odhadnout, jak se při teplotě kolem 20 °C změní tlak vodní páry nad tímto roztokem. Při této teplotě lze ve vodě rozpustit asi 36 g soli ve 100 g vody. Molární hmotnost soli je 58 g/mol, vody 18 g/mol. Pak

$$x = \frac{2 \cdot 36/58}{2 \cdot 36/58 + 100/18} \approx 0,18 ,$$

kde faktor 2 pochází z disociace. Nasycený tlak by tak měl být asi o 18% menší než nasycený tlak čisté vody. Relativní vlhkost prostředí nad hladinou by tak měla být asi 82%. A to

<sup>40</sup>Zde předpokládáme úplnou disociaci. K té dojde u dostatečně zředěných roztoků. Při vyšších koncentracích rozpouštědla k úplné disociaci dojít nemusí. Např. u nasyceného roztoku NaCl při teplotě kolem 25 °C je mírně přes deset procent molekul soli nedisociovaných.

<sup>41</sup>Číselný faktor, kterým je třeba násobit původní molární množství  $n$ , se nazývá van't Hoffův faktor.

<sup>42</sup>Tento předpoklad nebývá často splněn a existují tak odchylky, pozitivní i negativní, od předpovědi Raoultova zákona. Pro více informací viz [1].

<sup>43</sup>Uvědomme si, že úvaha týkající se zpětné kondenzace je nutná. Kdybychom část hladiny zakryli děrovanou fólií, molekuly by se hůř dostávali nejen ven, ale i dovnitř kapaliny, s celkovým nulovým důsledkem na hodnotu nasyceného tlaku.

<sup>44</sup>Zopakujme, že pro spočtení změny tlaku Raoultovým zákonem je důležité *kolik* rozpouštěné látky jsme rozpustili a *ne její chemické složení*. Nicméně na chemické povaze závisí, jak dobře se látka rozpouští a kolik ji vůbec jsme schopni rozpustit.

není tak daleko tabulkové hodnotě 75,5 %. (Rozdíl je způsoben silnou vazbou mezi ionty soli a molekulami vody — v porovnání se silou mezi samotnými vodními molekulami. Jedná se o tzv. negativní odchylku od Raoultova zákona.)

## Poznámky o principu měření vlhkosti kapacitními čidly

Do této chvíle jsme se zabývali různými teoretickými aspekty vlhkostní problematiky. Nicméně, pro praktické využití našich znalostí je neméně důležité umět (alespoň některé) vlhkostní veličiny reálně měřit. Metod měření vlhkosti je přitom řada, každá z nich mající své přednosti i nedostatky (jednoduchost realizace, přesnost, atd.). Stručný přehled metod lze nalézt např. v [8]. Cílem této kapitoly je čtenáři přiblížit základní princip kapacitních čidel vlhkosti. Tato čidla jsou v poslední době zdaleka nejpoužívanějším prostředkem tohoto měření.

Je třeba upozornit, že byť samotná teorie těchto čidel je s jistotou dobře známa a existují modely popisující jejich činnost, nebylo v moci autora tohoto textu se k příslušným zdrojům dostat. Proto zde uvádí pouze své postřehy a představy bez záruky na jejich správnost. Tuto kapitolu je třeba chápat spíše jako řadu poznámek, než jako důsledně vysvětlující text.

Uvažujme deskový kondenzátor s plochou každé desky  $S$  a vzdáleností desek  $d$ . Je-li mezi deskami kondenzátoru dielektrikum s relativní permitivitou  $\epsilon_r$ , je kapacita kondenzátoru dána výrazem

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (31)$$

kde  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$  je permitivita vakua.

Pokud je dielektrikem vakuum nebo suchý vzduch, je relativní permitivita blízká jedničce: pro vakuum  $\epsilon_r = 1$ , pro suchý vzduch  $\epsilon_r = 1,00059$ . Naproti tomu, kdybychom prostor kondenzátoru zcela vyplnili vodou, bylo by  $\epsilon_r \approx 88$  (při teplotě kolem  $0^\circ\text{C}$ ). Mohlo by nás tedy napadnout zkusit měřit vlhkost vzduchu skrze změny  $\epsilon_r$ , potažmo kapacity kondenzátoru, a to s představou, že molekuly vody přítomné ve vlhkém vzduchu mění relativní permitivitu prostředí kondenzátoru.

Ukazuje se, že příspěvek vodních molekul k celkové permitivitě kondenzátoru je dobře lineární funkcí počtu vodních molekul v jednotce objemu prostředí mezi deskami kondenzátoru.<sup>45</sup> Celková permitivita tak má tvar

$$\epsilon_r = \epsilon_{\text{bez vody}} + N \cdot (a + b/T), \quad (32)$$

kde  $\epsilon_{\text{bez vody}}$  je příspěvek veškerého materiálu mezi deskami vyjma vodních molekul (např. suchého vzduchu nebo případně nějakého polymeru, o kterém budeme mluvit dále) a druhý člen představuje příspěvek vody. Zde  $N$  je počet vodních molekul v jednotce objemu prostředí mezi deskami,  $a$  nějaká konstanta a  $b$  je jiná konstanta popisující teplotní závislost příspěvku vody.

Permitivita materiálu úzce souvisí s jeho schopností se tzv. polarizovat a má nejčastěji dvě různé příčiny. Prvním obecně se uplatňujícím zdrojem polarizace je tzv. elektronová polarizace, u které se (díky vnějšímu elektrickému poli) od sebe mírně posunou těžiště kladného a záporného náboje atomu či molekuly. Tento efekt je univerzální a nezávisí na teplotě. Je například příčinou nejednotkové permitivity suchého vzduchu. Druhým zdrojem polarizace, který se přičítá k prvnímu např. v případě molekul vody, je uspořádání již existujících (permanentních) elektrických dipólových momentů zúčastněných molekul. Každá molekula vody s sebou nese

<sup>45</sup>V přednáškách [7], kapitolách 11.2 a 11.3, je tato vlastnost ukázána pro oba níže zmíněné příspěvky k permitivitě.

vlastní dipólový moment.<sup>46</sup> Pokud neexistuje vnější elektrické pole, nejsou tyto momenty uspořádány a celkově nevytvářejí žádnou makroskopickou polarizaci. Pokud ovšem zapneme vnější pole, mají momenty tendenci se uspořádat, což vytváří makroskopickou polarizaci. Tento proces je ovlivňován teplotou, čím je vyšší, tím méně se momenty dokáží uspořádat a výsledná polarizace (i permitivita) je menší. Z molekul vyskytujících se běžně ve vzduchu má permanentní elektrický moment pouze voda. (Pro nulový moment je potřeba mít nesymetrickou molekulu; i molekula CO<sub>2</sub> má nulový moment, protože je to, narozdíl od vody, molekula lineární.)

První příspěvek k permitivitě ve výše uvedené rovnici, popisující vše vyjma vodních molekul, nemá teplotní závislost, čímž je vyjádřena představa, že zúčastněné molekuly nemají permanentní moment. Příspěvek od molekul vody má naopak oba členy (*a* a *b*). Teplotní závislost příspěvku od permanentních momentů je často blízká tzv. Curieově zákonu, kdy je příspěvek úměrný  $1/T$ .<sup>47,48</sup>

Pro nás nejpodstatnější vlastností uvedené rovnice pro permitivitu je lineární závislost na počtu molekul vody. Kdyby příspěvek od vodních molekul byl dostatečně velký oproti příspěvkům od suchého vzduchu, mohl by se jednoduchý deskový kondenzátor s dielektrikem tvořeným pouze vlhkým vzduchem použít pro měření vlhkosti vzduchu (připomeňme, že s *N* souvisí úzce absolutní vlhkost). Ukazuje se ovšem, že za běžných teplot, kdy *N* i pro nasycený vzduch je relativně malé číslo, je závislost permitivity na vlhkosti příliš slabá (jinak by tomu ale bylo pro teploty vyšší, např. kolem 400 °C).<sup>49</sup> Je tak potřeba zařídit, aby se počet vodních molekul v kondenzátoru měnil se změnou vlhkosti významněji, a to se dá řešit použitím vhodného materiálu coby vodu absorbujícího dielektrika.<sup>50,51</sup>

Zajímavou skutečností je zjištění, že primární veličinou určující množství vody v dielektriku není teď absolutní vlhkost, jak tomu bylo u jednoduchého kondenzátoru, ale vlhkost relativní. Jedná se přitom o obecnou vlastnost vodu absorbujících materiálů, jak je to vidět i z dříve uvedeného obrázku 2, týkajícího se dřeva. Uvedený obrázek říká, že množství vody absorbované dřívím je skoro nezávisle na teplotě určeno relativní vlhkostí. Mohli bychom tak v principu využít (problém by byl s přesností) takové dříví coby dielektrikum kondenzátoru a pak (za pomoci obrázků podobných obrázku 2) určovat relativní vlhkost.

Je dobré si uvědomit, co vlastně tvrdíme, když říkáme, že kapacita kondenzátoru závisí na relativní vlhkosti. Představme si tento kondenzátor při nějaké teplotě a nějaké relativní vlhkosti. V dielektriku je absorbováno určité množství vody, čímž je určena kapacita kondenzátoru (viz obecně platný vztah (32)). V okolí kondenzátoru se nachází určitý počet vodních molekul na jednotku objemu (korespondující s absolutní vlhkostí). My tvrdíme, že např. při zvýšení teploty a zachování relativní vlhkosti se kapacita kondenzátoru nezmění, a to i přesto, že se při zvýšené

<sup>46</sup>Jeho velikost je  $p = 6,2 \times 10^{-30}$  Cm.

<sup>47</sup>Viz opět [7].

<sup>48</sup>Stejnou závislost permitivity na teplotě má i kapalná voda, při 60 °C je  $\epsilon_r \approx 67$ .

<sup>49</sup>Pro ilustraci: Ve zmiňované literatuře se odvozuje vztah pro příspěvek permanentních momentů molekul vody k relativní permitivitě. Výsledkem je

$$\frac{Np_0^2}{3\epsilon_0kT},$$

kde *N* je objemová koncentrace molekul, *p* je permanentní elektrický moment vodní molekuly,  $\epsilon_0$  je permitivita vakua a  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup> je Boltzmannova konstanta. Nasycení vzduchu vodní párou při teplotě 20 °C odpovídá tlaku vodní páry (z tab. 3) asi 2,3 kPa a ze stavové rovnice ideálního plynu získáme  $N = p_{\text{nas}}/kT \approx 6 \times 10^{23}$  m<sup>-3</sup>. Změna relativní permitivity při změně relativní vlhkosti z nuly na sto procent pak vychází asi 0,0002. Neboli, hodnota kapacity by se změnila o 0,02 %.

<sup>50</sup>Dnes se používají převážně speciální hygroskopické polymery, dříve např. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

<sup>51</sup>Je skutečností, že kapacita čidel s vhodným dielektrikem se mění v rozsahu 0 až 100 % RH typicky o jednu čtvrtinu.

teplotě v okolí kondenzátoru může nacházet i řádově jiné (větší) množství vodních molekul v jednotce objemu (vzpomeňme si, že absolutní vlhkost se mění exponenciálně s teplotou, zachovávali-li relativní vlhkost konstantní). Tento fakt nás může překvapit.

To, co se pravděpodobně děje, je, že byť se zvýšením teploty (při  $RH = \text{konst.}$ ) mohl významně zvýšit počet molekul vody v okolním prostředí, zmenšila se zároveň schopnost dielektrika vázat vodu (neboť molekuly vody mají při vyšší teplotě větší šanci nabýt dostatečné energie na odpoutání se od dielektrika) a celkový efekt změny teploty na množství vázané vody je téměř nulový.<sup>52</sup>

Postupně jsme se tak dobrali ke kapacitnímu čidlu, které je díky svému hygroskopickému dielektriku dostatečně citlivé na reálné změny okolní vlhkosti a zároveň, opět kvůli tomuto dielektriku, závislé výhradně na relativní vlhkosti vzduchu. Přímá závislost na relativní vlhkosti je přitom pro lidi docela výhodná, neboť, jak jsme diskutovali již dříve v textu, je to relativní vlhkost (a jen málokdy vlhkost absolutní), co má stěžejní vliv na většinu pro lidi důležitých procesů.

O vlastní reálné konstrukci čidel se lze většinou dočíst na stránkách jednotlivých výrobců těchto čidel.

---

<sup>52</sup>Ve skutečnosti zřejmě nedochází k úplnému vykompenzování, ale pouze k vyrušení nejpodstatnějších (na teplotě exponenciálně závislých) členů. Jistou korekci na teplotu je tak nutno při měření vlhkosti provést.

## Literatura

- [1] Jim Clark. [www.chemguide.co.uk](http://www.chemguide.co.uk).
- [2] Bob Hardy. Determination of relative humidity in subzero temperatures.
- [3] Bob Hardy. ITS-90 formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature, and enhancement factors in the range  $-100$  to  $100$  C. Thunder Scientific Corporation, Albuquerque, NM, USA.
- [4] Innovative Sensor Technology IST AG. Basic theory. [www.ist-ag.com](http://www.ist-ag.com).
- [5] Tim Padfield. The absorption of water by materials. [www.padfield.org/tim/cfys](http://www.padfield.org/tim/cfys).
- [6] Tim Padfield. What happens to water absorbent materials below freezing? [www.padfield.org/tim/cfys](http://www.padfield.org/tim/cfys).
- [7] Richard P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands. *The Feynman lectures on physics*. Addison-Wesley Publishing Company, 1966. Existuje slovenský i český překlad přednášek.
- [8] Gert J. W. Visscher. Humidity and moisture measurement. [www.engnetbase.com](http://www.engnetbase.com).
- [9] Holger Vömel. Saturation vapor pressure formulations. CIRES, University of Colorado, Boulder, <http://cires.colorado.edu/~voemel/vp.html>.

---

KONEC