



# Sestavení tabulek termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Strojní inženýrství

*Autor práce:*

**Chyva Hout**

*Vedoucí práce:*

Ing. Magda Vestfálová, Ph.D.  
Katedra energetických zařízení  
prof. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.  
Katedra energetických zařízení





## Zadání bakalářské práce

# Sestavení tabulek termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti

*Jméno a příjmení:* **Chyva Hout**  
*Osobní číslo:* S15000067  
*Studijní program:* B2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojní inženýrství  
*Zadávající katedra:* Katedra energetických zařízení  
*Akademický rok:* **2018/2019**

### Zásady pro vypracování:

Cílem práce je sestavit tabulky termodynamických (měrná vlhkost, hustota, entalpie, ...) a termofyzikálních (viskozita, součinitel tepelné vodivosti, ...) vlastností atmosférického vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti.

1. Uvedte přehled vztahů potřebných pro popis termodynamických vlastností vlhkého vzduchu.
2. Uvedte přehled vztahů potřebných pro popis termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu.
3. Proveďte výpočet vlastností nenasyceného a nasyceného vlhkého vzduchu pro různé teploty.
4. Sestavte tabulky vlastností vlhkého vzduchu pro vhodně zvolený rozsah teplot a pro relativní vlhkosti 0 až 1.



Rozsah pracovní zprávy: 25 stran  
Forma zpracování práce: tištěná



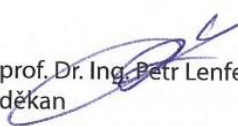
### Seznam odborné literatury:

- [1] STŘEDA, Ivo. *Základy rovnovážné termodynamiky*. Vyd. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-459-7.
- [2] ŠAFAŘÍK, Pavel a Magda VESTFÁLOVÁ. *Termodynamika vlhkého vzduchu*. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06020-9.

Vedoucí práce: Ing. Magda Vestfálová, Ph.D.  
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020.

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

V Liberci 28. února 2018



  
doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.



28. dubna 2020

Chyva Hout

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především paní Ing. Magdě Vestfálové, Ph.D. za cenné rady, velikou trpělivost a připomínky poskytnuté při vypracování bakalářské práce. Poděkování patří také mé rodině za podporu během studia i při tvorbě této práce.

# Název práce

Sestavení tabulek termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá sestavením tabulek a grafů termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti 0 až 1. Teoretická část obsahuje přehled základních termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu. V praktické části je uveden popis algoritmu výpočtů pro zadané hodnoty, kterými jsou: celkový tlak, relativní vlhkost a teplota, a který je důležitou součástí pro určení zbývajících parametrů. V závěru bakalářské práce je příloha, která obsahuje tabulky a grafy termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti 0 až 1.

## Klíčova slova:

Vlhký vzduch, relativní vlhkost, měrná vlhkost, měrná plynová konstanta, hustota, entalpie, rychlost zvuku, dynamická viskozita, kinematická viskozita, tepelná vodivost, teplotní vodivost

## Thesis title

Compilation tables thermodynamics and thermophysical properties of moist air depending on temperature and relative humidity.

## Abstract

This bachelor thesis deals with compilation tables and graphs thermodynamics and thermophysical properties of moist air depending on temperature and relative humidity from 0 to 1. Theoretical part contains overview of basics thermodynamics and thermophysical properties of moist air. In the practical part there is a description of calculation algorithms for given values, which are: total pressure, relative humidity and temperature, and which is an important part to determine the remaining parameters. At the end of thesis is a supplement, which contains tables and graphs thermodynamics and thermophysical properties of moist air depending on temperature and relative humidity from 0 to 1.

## Keywords:

Moist air, relative humidity, specific humidity, specific gas constant, density, enthalpy, speed of sound, dynamic viscosity, kinematic viscosity, thermal conductivity, thermal diffusivity

# Obsah

Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek.....	10
Přehled označení .....	11
Použité indexy .....	12
Použité fyzikální konstanty.....	12
1 Úvod .....	13
1.1 Rešerše podobných nebo stejných tabulek.....	13
2 Termodynamika ideálních plynů .....	16
2.1 Stavové veličiny .....	16
2.2 Stavová rovnice ideálního plynu .....	17
2.3 Směs ideálních plynů .....	18
2.3.1 Daltonův zákon .....	18
2.3.2 Amagatův zákon .....	19
2.3.3 Určující veličiny směsi plynů .....	20
3 Rovnovážný – fázový diagram .....	22
4 Vlhký vzduch a jeho složky .....	23
4.1 Suchý vzduch .....	23
4.2 Voda a vodní pára .....	24
5 Vlhký vzduch .....	26
5.1 Základní stavové veličiny .....	26
5.1.1 Teplota vlhkého vzduchu .....	26
5.1.2 Tlak vlhkého vzduchu .....	26
5.1.3 Objem vlhkého vzduchu .....	26
5.1.4 Hmotnost vlhkého vzduchu .....	26
5.1.5 Hustota vlhkého vzduchu .....	27
5.1.6 Stavová rovnice vlhkého vzduchu.....	27
5.1.7 Tlak syté vodní páry .....	27
5.1.8 Teplota rosného bodu .....	29

5.2	Vyjádření vlhkosti vzduchu .....	29
5.2.1	Absolutní vlhkost vzduchu .....	29
5.2.2	Relativní vlhkost vzduchu .....	29
5.2.3	Měrná vlhkost vzduchu .....	30
5.3	Hmotnostní zlomky složek vlhkého vzduchu .....	30
5.4	Měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu .....	31
5.5	Izobarická měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu.....	31
5.6	Poissonova konstanta vlhkého vzduchu .....	31
5.7	Entalpie vlhkého vzduchu .....	31
6	Termofyzikální vlastnosti vlhkého vzduchu .....	33
6.1	Rychlost zvuku ve vlhkém vzduchu .....	33
6.2	Viskozita vlhkého vzduchu .....	33
6.2.1	Dynamická viskozita vlhkého vzduchu .....	34
6.2.2	Kinematická viskozita vlhkého vzduchu .....	35
6.3	Součinitel tepelné vodivosti vlhkého vzduchu .....	35
6.4	Součinitel teplotní vodivosti vlhkého vzduchu .....	36
7	Algoritmy výpočtu .....	37
7.1	Algoritmy výpočtu termodynamických parametrů vlhkého vzduchu .....	37
7.1.1	Algoritmus výpočtu měrné vlhkosti vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}, \varphi, t$ .....	37
7.1.2	Algoritmus výpočtu měrné plynové konstanty vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}, \varphi, t$ .....	37
7.1.3	Algoritmus výpočtu hustoty vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}, \varphi, t$ .....	38
7.1.4	Algoritmus výpočtu entalpie vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}, \varphi, t$ .....	38
7.2	Algoritmy výpočtu termofyzikálních parametrů vlhkého vzduchu .....	39
7.2.1	Algoritmus výpočtu rychlosti zvuku ve vlhkém vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}, \varphi, t$ .....	39



7.2.2	Algoritmus výpočtu dynamické a kinematické viskozity vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}$ , $\varphi$ , $t$ .....	39
7.2.3	Algoritmus výpočtu součinitele tepelné a teplotní vodivosti vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}$ , $\varphi$ , $t$ .....	40
8	Závěr .....	42
	Použitá literatura a seznam zdrojů .....	43
	Příloha .....	45

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Daltonův model směsi .....	18
Obrázek 2: Amagatův model směsi .....	19
Obrázek 3: Fázový diagram .....	22
Obrázek 4: Gradient rychlosti kolmý na směr toku. Tečné napětí v plynu v důsledku vnitřního tření při toku .....	34

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnota Poissonovy konstanty .....	18
Tabulka 2: Složení suchého vzduchu .....	23
Tabulka 3: Složení suchého vzduchu dle NIST .....	24
Tabulka 4: Střední molární hmotnost suchého vzduchu .....	24

## Přehled označení

značka	jednotka	veličina
$a$	$[kg \cdot m^{-3}]$	absolutní vlhkost
$c_p$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	izobarická měrná tepelná kapacita
$c_v$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	izochorická měrná tepelná kapacita
$F$	$[N]$	síla
$h$	$[J \cdot kg^{-1}]$	měrná entalpie
$L$	$[J]$	skupenské teplo
$l$	$[J \cdot kg^{-1}]$	měrné skupenské teplo
$M$	$[kg \cdot kmol^{-1}]$	molární hmotnost
$m$	$[kg]$	hmotnost
$m_i$	$[kg]$	hmotnost složek
$n$	$[kmol]$	látkové množství
$n_i$	$[kmol]$	látkové množství složek
$p$	$[Pa]$	tlak
$p_i$	$[Pa]$	tlak parciální
$R$	$[J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}]$	molární univerzální plynová konstanta
$r$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná plynová konstanta
$r_i$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná plynová konstanta složek
$S$	$[m^2]$	plocha
$s$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná entropie
$T$	$[K]$	teplota termodynamická
$t$	$[^{\circ}C]$	teplota Celsiova
$t_{rb}$	$[^{\circ}C]$	teplota rosného bodu
$V$	$[m^3]$	objem
$V_i$	$[m^3]$	objem parciální
$v$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost zvuku
$x$	$[kg_p \cdot kg_{sv}^{-1}]$	měrná vlhkost
$x_i$	$[1]$	molární zlomek
$y$	$[m]$	osa

$\alpha$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	součinitel teplotní vodivosti
$\eta$	$[Pa \cdot s]$	dynamická viskozita
$\kappa$	[1]	Poissonova konstanta
$\lambda$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
$\vartheta$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	kinematická viskozita
$\rho$	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota
$\sigma_i$	[1]	hmotnostní zlomek
$\omega_i$	[1]	objemový zlomek
$\psi_i$	[1]	tlakový zlomek
$\varphi$	[1]	relativní vlhkost
$\tau$	$[Pa]$	tečné napětí

## Použité indexy

"	pro stav nasyceného vlhkého vzduchu
$1 + x$	pro vlhký vzduch obsahující $1 \text{ kg}$ suchého vzduchu a $x \text{ kg}$ páry
$i$	pro $i$ -tou složku
$k(l)$	pro kapalnou fázi (skupenství)
$kr$	pro kritický bod
$l, g$	pro var
$p$	pro vodní páru
$p(g)$	pro plynnou fázi (skupenství)
$s, g$	pro sublimaci
$s, l$	pro tání
$sv$	pro suchý vzduch
$t(s)$	pro tuhou fázi (skupenství)
$tr$	pro trojný bod
$vv$	pro vlhký vzduch

## Použité fyzikální konstanty

Molární univerzální plynová konstanta  $R = 8314,14 [J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}]$

# 1 Úvod

Vlhký vzduch je směs suchého vzduchu a vody ve formě syté, či přehřáté vodní páry. Tato směs plynů tvoří životně důležitý plynný obal Země. Množství vodní páry ve vlhkém vzduchu se liší v závislosti na teplotě a tlaku a jeho hodnota je od nuly (suchý vzduch) do maxima. Vlhkost vzduchu udává, jakou měrou je vzduch nasycen vodními parami. Můžeme se setkávat denně s měnícím se obsahem vodních par ve vzduchu například v podobě mlhy, rosy, deště nebo námrazy, či naopak třeba při sušení prádla. Parametry vlhkého vzduchu ovlivňují nejen klima v přírodě, ale mají význam v oborech, jako jsou energetická zařízení, v chemickém a potravinářském průmyslu, v textilním průmyslu, v technologii materiálu, v biologii a v řadě dalších technických oborů a průmyslových odvětví. Vlhkost vzduchu se vyjadřuje v procentech, pro lepší představu, relativní vlhkost je rovna 100 %, pokud je vzduch vodní parou zcela nasycen a kdybychom dodali větší množství vodní páry, vedlo by to ke kondenzaci.

Cílem této bakalářské práce je popsat termodynamické a termofyzikální vlastnosti vlhkého vzduchu a dalším důležitým bodem práce je sestavení tabulek a grafů termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti 0 až 1.

## 1.1 Rešerše podobných nebo stejných tabulek

Termodynamika či termomechanika je vyučována na různých fakultách strojírenství v České republice:

Fakulta strojní Českého vysokého učení technického v Praze, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky [1]. Předmět: Termomechanika, Termodynamika. Osnova: Vlhký vzduch, základní veličiny a jejich měření, vyjádření základních stavových veličin vlhkého vzduchu, řešení dějů v  $h$ - $x$  diagramu. Literatura: Základy Termomechaniky. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1998 [2].

Podle literatury z Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze [2] tabulka s názvem „Termofyzikální vlastnosti plynů: vzduch“ obsahuje tyto veličiny: kilomolová hmotnost, měrná plynová konstanta, hustota, měrná tepelná kapacita při stálém tlaku, tepelná vodivost a dynamická viskozita při tlaku 0,1013 MPa v intervalu teplot  $-50$  °C až  $3000$  °C.

Podle literatury [3] tabulka s názvem „Transportní a termodynamické vlastnosti suchého vzduchu při tlaku 0,1013 MPa (760 Torr)“ obsahuje následující veličiny: hustota, měrná tepelná kapacita při stálém tlaku, tepelná vodivost, teplotní vodivost, kinematická viskozita, Prandtlovo číslo a objemová roztažnost v intervalu teplot  $-180$  °C až  $1800$  °C.

Literatura [4] obsahující tabulku s názvem „Parciální tlak syté vodní páry pro teploty  $-50$  °C až  $89$  °C. Následuje tabulka týkající se nasyceného vlhkého vzduchu pro standardní tlak 101,325 kPa v intervalu teplot  $-50$  °C až  $85$  °C. Další je Mollierův  $h$ - $x$  diagram vlhkého vzduchu pro standardní tlak 101,325 kPa nebo 98 kPa, pro měrnou vlhkost  $x \in < 0,20 > g_p \cdot kg_{sv}^{-1}$  v intervalu teplot  $-20$  °C až  $50$  °C, dále potom Mollierův  $h$ - $x$  diagram vlhkého vzduchu pro standardní tlak 101,325 kPa, pro měrnou vlhkost  $x \in < 0,100 > g_p \cdot kg_{sv}^{-1}$

v intervalu teplot  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a rovněž křivky nasyceného vlhkého vzduchu v Mollierově h-x diagramu, pro tlak 30 000 Pa až 350 000 Pa.

Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Energetický ústav [5]. Předmět: Termomechanika. Osnova: Termodynamika vlhkého vzduchu, definice vlhkosti a entalpie vlhkého vzduchu, diagram entalpie-měrná vlhkost, ochlazování, ohřev, míšení a vlhčení vzduchu, adiabatické odpařování z volné hladiny, psychrometr. Literatura: Termomechanika. Vydavatelství VUT, Brno, 2011 [6].

Podle literatury z Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně [6] tabulka „Fyzikální vlastnosti suchého vzduchu“ obsahuje tyto veličiny: hustota, měrná tepelná kapacita při stálém tlaku, tepelná vodivost, teplotní vodivost, dynamická viskozita, kinematická viskozita a Prandtlovo číslo při tlaku 98,1 kPa v intervalu teplot  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Další je tabulka Vlastnosti syté kapaliny a syté páry  $\text{H}_2\text{O}$  dle IAPWS-IF97 uspořádaní podle teplot a uspořádaní podle tlaků, tabulka Vlastnosti vody a přehřáté vodní páry dle IAPWS-IF97, tabulka Vlastnosti vlhkého vzduchu: sytá pára v intervalu teplot  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro tlak 100 kPa. Další je h-s diagram vody a vodní páry IAPWS-IF97, Mollierův h-x diagram vlhkého vzduchu pro tlak 100 kPa.

Fakulta strojní Vysoké školy Báňské - Technické univerzity v Ostravě, Katedra energetiky [7]. Předmět: Termomechanika. Osnova: Vlhký vzduch a vlhké technické plyny, základní pojmy, Mollierův diagram. Literatura: Termomechanika, návody do cvičení. Vydavatelství VŠB-TU, Ostrava, 2002 [8]. Termomechanika. Vydavatelství VUT, Brno, 1992 [9].

Podle literatury z Fakulty strojní Vysoké školy Báňské - Technické univerzity v Ostravě [8] tabulka s názvem „Fyzikální vlastnosti technických plynů: vzduch“ obsahuje veličiny: molová hmotnost, hustota v normálním stavu, měrná plynová konstanta, měrná tepelná kapacita při stálém tlaku, izoentropický exponent, hodnoty kritického stavu a teplota varu při tlaku 101 325 Pa.

Podle literatury [9] tabulka „Fyzikální vlastnosti suchého vzduchu“ zahrnuje tyto veličiny: hustota, měrná tepelná kapacita při stálém tlaku, tepelná vodivost, teplotní vodivost, dynamická viskozita, kinematická viskozita a Prandtlovo číslo při tlaku 98,1 kPa v intervalu teplot  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení [10]. Předmět: Termomechanika. Osnova: Vlhký vzduch: Termodynamické vlastnosti vlhkého vzduchu, Mollierův psychrometrický diagram h-x, procesy s vlhkým vzduchem. Literatura: Tabulky termodynamických vlastností vody a vodní páry. Vydavatelství ZČU, Plzeň, 2008 [11].

Podle literatury z Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni [11] byly tabulky termodynamických vlastností vody a vodní páry počítány podle mezinárodní formulace IAPWS-IF97. Literatura obsahuje termodynamické vlastnosti na mezi sytosti podle teploty, termodynamické vlastnosti na mezi sytosti podle tlaku a jednofázové oblasti stlačené kapaliny a přehřáté páry.

Fakulta strojního inženýrství Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, Ústav strojů a energetiky [12]. Předmět: Termomechanika. Osnova: Termomechanika par, vlhký vzduch, Mollierův diagram. Literatura: Technická termodynamika. Vydavatelství ČSAV, Praha, 1963 [13]. Termomechanika. Vydavatelství VUT, Brno, 1983 [14].

Literatura z Fakulty strojního inženýrství Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem [13] obsahuje tabulku „Vlhký vzduch: syté vodní páry“ při tlaku  $10\,000\text{ kPa} \cdot \text{m}^{-2}$  v intervalu teplot  $-30\text{ °C}$  až  $100\text{ °C}$ .

Další literatura [14] obsahuje tabulku „Fyzikální charakteristiky suchého vzduchu“ zahrnující veličiny: hustota, měrná tepelná kapacita při stálém tlaku, součinitel tepelné vodivosti, součinitel teplotní vodivosti, dynamická viskozita, kinematická viskozita a Prandtlovo číslo při tlaku  $98,1\text{ kPa}$  v intervalu teplot  $-180\text{ °C}$  až  $1800\text{ °C}$ .

Na výše zmíněných fakultách strojních jsem nenašel tabulky a grafy termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti. Podle mého názoru ještě žádná z uvedených fakult tyto tabulky a grafy nevytvořila.

Jako další podklady k této práci byl použit program Vlhký vzduch 3.0 autora Pavla Snášela [15], který vznikl jako diplomová práce na téma Interaktivní grafický software pro výpočty stavů vlhkého vzduchu na Oboru termomechaniky a technického prostředí Energetického ústavu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně v akademickém roce 2009/2010.

Podobné tabulky termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti jsou pouze v literatuře [16], ale používají relativní vlhkost pouze  $0\%$ ,  $50\%$  a  $100\%$ . Hlavním důvodem, proč jsem si zvolil toto téma bakalářské práce, je potřeba vytvořit tabulky a grafy vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro použití na Katedře energetických zařízení Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci. K vytvoření tabulek rozděluji svou práci na dvě části, teoretickou a praktickou. Teoretická část obsahuje přehled vztahů potřebných pro popis termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu. V praktické části se zabývám popisem algoritmů výpočtů.

## 2 Termodynamika ideálních plynů

Vlastnosti ideálního plynu:

- rozměry molekul jsou ve srovnání se střední vzdáleností molekul zanedbatelně malé,
- molekuly mimo vzájemné srážky na sebe silově nepůsobí,
- vzájemné srážky molekul a srážky molekul se stěnami nádoby jsou dokonale pružné.

### 2.1 Stavové veličiny

Jsou v termodynamice například teplota, tlak, objem, hmotnost, dále pak látkové množství, a hustota.

**Teplota**  $T[K]$ ,  $t[^\circ\text{C}]$  je základní fyzikální veličinou a základní termodynamickou stavovou veličinou. Rozlišujeme termodynamickou teplotu  $T$ , která se udává v Kelvinech  $[K]$  a Celsiovu teplotu  $t$ , která se udává v Celsiových  $[^\circ\text{C}]$ . Mezi termodynamickou a Celsiovou teplotou platí vztah

$$T[K] = t[^\circ\text{C}] + 273,15. \quad (2.1)$$

**Tlak**  $p[\text{Pa}]$  je základní termodynamickou stavovou veličinou, která je definována vztahem

$$p = \frac{dF}{dS}, \quad (2.2)$$

kde  $F[N]$  je síla působící kolmo na plochu  $S[m^2]$ . Hlavní jednotkou je pascal  $[\text{Pa}]$ , pro který platí  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ , dalšími používanými násobnými jednotkami jsou kilopascal  $[\text{kPa}]$  nebo megapascal  $[\text{MPa}]$ . Ve starší literatuře nebo na starších přístrojích se setkáváme ještě s jinými jednotkami tlaku:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Torr} &= 133,3221 \text{ Pa}, \\ 1 \text{ at} &= 98066,5 \text{ Pa}, \\ 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa}, \\ 1 \text{ atm} &= 101\,325 \text{ Pa}. \end{aligned}$$

**Objem**  $V[m^3]$  je stavová veličina představující velikost sledované trojrozměrné soustavy. Základní jednotkou je metr krychlový  $[m^3]$  který v podstatě představuje prostor uvnitř krychle o délce strany jednoho metru. Dalšími používanými dílčími jednotkami jsou decimetr krychlový  $[dm^3]$  nebo centimetr krychlový  $[cm^3]$ .

**Hmotnost**  $m[\text{kg}]$  je základní fyzikální veličinou udávající kvantitativní skalární míru tíhových a setrvačných vlastností látek. Jednotkou je kilogram  $[\text{kg}]$ .

**Látkové množství**  $n[\text{kmol}]$  je stavová veličina udávající hodnotu úměrnou počtu atomů či molekul obsazených ve sledované látce. Jednotkou je kilomol  $[\text{kmol}]$ , což je počet částic ve 12 g uhlíku  $\text{C}_6^{12}$ . Látkové množství lze určit ze vztahu

$$n = \frac{m}{M}, \quad (2.3)$$



kde  $m[kg]$  je hmotnost,  $M[kg \cdot kmol^{-1}]$  je molární hmotnost.

**Hustota  $\rho[kg \cdot m^{-3}]$**  je stavová veličina definovaná jako podíl hmotnosti homogenní látky a jejího objemu. Platí pro ni vztah

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.4)$$

kde  $m[kg]$  je hmotnost,  $V[m^3]$  je objem.

## 2.2 Stavová rovnice ideálního plynu

Matematickou definicí ideálního plynu je stavová rovnice. Stavová rovnice ideálního plynu vyjadřuje vzájemnou závislost stavových veličin při termodynamických dějích v ideálním plynu. Stavovou rovnici můžeme napsat ve tvaru pro  $m$  kg látky

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T, \quad (2.5)$$

kde  $p[Pa]$  je tlak,  $V[m^3]$  je objem,  $m[kg]$  je hmotnost,  $T[K]$  je teplota termodynamická,  $r[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta. Měrnou plynovou konstantu  $r[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  lze vypočítat ze vztahu:

$$r = \frac{R}{M}, \quad (2.6)$$

kde  $M[kg \cdot kmol^{-1}]$  je molární hmotnost,  $R = 8314,41[J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}]$  je molární univerzální plynová konstanta.

Z rovnic (2.3), (2.5) a (2.6) vyplývá, že stavovou rovnici ideálního plynu lze psát ve tvaru

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T, \quad (2.7)$$

kde  $p[Pa]$  je tlak,  $V[m^3]$  je objem,  $n[kmol]$  je látkové množství,  $T[K]$  je teplota termodynamická,  $R = 8314,41[J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}]$  je molární univerzální plynová konstanta.

Stavová rovnice ideálního plynu pro 1 kg látky:

$$p = \rho \cdot r \cdot T, \quad (2.8)$$

kde  $p[Pa]$  je tlak,  $\rho[kg \cdot m^{-3}]$  je hustota,  $r[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta,  $T[K]$  je teplota termodynamická.

Mayerův vztah: popisuje souvislost mezi měrnými tepelnými kapacitami ideálních plynů

$$c_p - c_v = r, \quad (2.9)$$

kde  $c_p[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je izobarická měrná tepelná kapacita,  $c_v[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je izochorická měrná tepelná kapacita,  $r[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta.

Poissonova konstanta  $\kappa$  [1]: vyjadřuje poměr izobarické a izochorické měrné tepelné kapacity ideálního plynu

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}. \quad (2.10)$$

Poissonova konstanta závisí jen na počtu atomů v molekule.

**Tabulka 1:** Hodnota Poissonovy konstanty [17]

Počet atomů v molekule	Poissonova konstanta $\kappa$ [1]
jednoatomový plyn	1,66
dvouatomový plyn a suchý vzduch	1,4
tříatomový a více atomový plyn	1,33

Vyřešením soustavy rovnic (2.9) a (2.10) získáme vztah pro výpočet izochorické měrné tepelné kapacity  $c_v$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$$c_v = \frac{r}{\kappa - 1}, \quad (2.11)$$

a izobarické měrné tepelné kapacity  $c_p$  [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$$c_p = \frac{\kappa \cdot r}{\kappa - 1}. \quad (2.12)$$

## 2.3 Směs ideálních plynů

### 2.3.1 Daltonův zákon

Z nádoby odčerpáme všechny složky kromě jediné, tj. objem a teplota každé čisté složky je stejná, jako v původní směsi.

Pro celkovou hmotnost směsi  $m$  musí platit

$$m = \sum_i m_i. \quad (2.13)$$

Pro celkové látkové množství směsi  $n$  musí platit

$$n = \sum_i n_i. \quad (2.14)$$

Směs: $T, p, V, m = \sum m_i$
----------------------------------

Složka A $T, p_A, V, m_A, (n_A)$
Složka B $T, p_B, V, m_B, (n_B)$

**Obrázek 1:** Daltonův model směsi [18]

Z rovnice (2.14) uvažujeme plynnou směs skládající se z  $n_1$  látkového množství složky 1,  $n_2$  látkového množství složky 2 atd. až  $n_l$  látkového množství složky  $l$ . Potom celkové látkové množství směsi bude dáno součtem

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_l. \quad (2.15)$$

Pomocí rovnice (2.7) pro  $p_i$  je parciální tlak složky  $i$

$$p_i = \frac{n_i \cdot R \cdot T}{V}. \quad (2.16)$$

Po dosazení do (2.15) dostavám

$$\frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T} + \frac{p_2 \cdot V}{R \cdot T} + \dots + \frac{p_l \cdot V}{R \cdot T}. \quad (2.17)$$

Rovnici (2.17) lze pak psát jako

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_l = \sum_{i=1}^l p_i = \frac{R \cdot T}{V} \cdot \sum_{i=1}^l n_i. \quad (2.18)$$

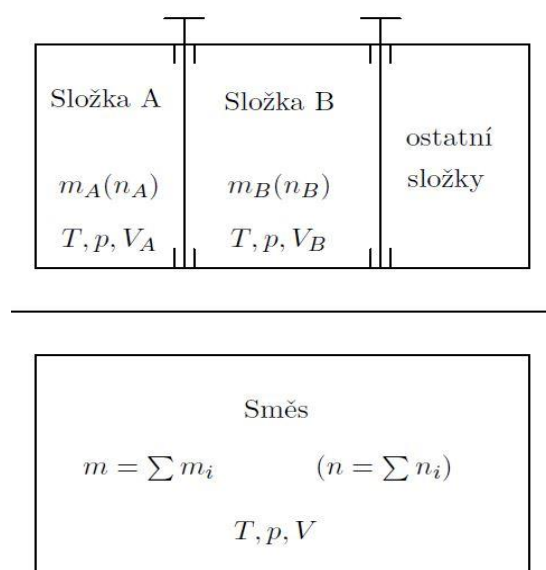
a její formulaci lze chápat jako tzv. Daltonův zákon, který říká, že celkový tlak plynné směsi je dán součtem parciálních tlaků všech složek.

Ze vztahů (2.16) a (2.18) se získá vztah mezi parciálním tlakem složky  $p_i$  a celkovým tlakem směsi  $p$

$$\frac{p_i}{p} = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^l n_i} = \frac{n_i}{n}. \quad (2.19)$$

### 2.3.2 Amagatův zákon

Z nádoby odčerpáme všechny složky kromě jediné, a tu komprimujeme tak, aby její tlak a teplota byly stejné jako tlak a teplota původní směsi.



**Obrázek 2:** Amagatův model směsi [18]

Pomocí rovnice (2.7) pro  $V_i$  je parciální objem složky  $i$

$$V_i = \frac{n_i \cdot R \cdot T}{p}. \quad (2.20)$$

Po dosazení do (2.15) dostaneme

$$\frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{p \cdot V_1}{R \cdot T} + \frac{p \cdot V_2}{R \cdot T} + \dots + \frac{p \cdot V_l}{R \cdot T}. \quad (2.21)$$

Rovnici (2.21) lze pak psát jako

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_l = \sum_{i=1}^l V_i = \frac{R \cdot T}{p} \cdot \sum_{i=1}^l n_i. \quad (2.22)$$

a její formulaci lze chápat jako tzv. Amagatův zákon, který říká, že celkový objem plyně směsi je dán součtem parciálních objemů všech složek.

Ze vztahů (2.20) a (2.22) lze odvodit vztah mezi parciálním objemem složky  $V_i$  a celkovým tlakem směsi  $V$

$$\frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^l n_i} = \frac{n_i}{n}. \quad (2.23)$$

### 2.3.3 Určující veličiny směsi plynů

Zadané složení směsi plynů musí obsahovat nejen výčet jednotlivých plynů směsi, ale také jejich poměrné zastoupení ve směsi jako celku. Množství složky ve směsi plynů může být dáno:

- Hmotnostní zlomek:

$$\sigma_i = \frac{m_i}{m}, \quad (2.24)$$

pro směs platí

$$\sum \sigma_i = 1. \quad (2.25)$$

- Molární zlomek:

$$x_i = \frac{n_i}{n}, \quad (2.26)$$

pro směs platí

$$\sum x_i = 1. \quad (2.27)$$

- Objemový zlomek:

$$\omega_i = \frac{V_i}{V}, \quad (2.28)$$

pro směs platí

$$\sum \omega_i = 1. \quad (2.29)$$

- Tlakový zlomek:

$$\psi_i = \frac{p_i}{p}, \quad (2.30)$$

pro směs platí

$$\sum \Psi_i = 1. \quad (2.31)$$

Ze vztahů (2.19) a (2.23)

$$x_i = \omega_i = \Psi_i. \quad (2.32)$$

Rovnice stavu pro složky směsi o objemu V

$$p_i \cdot V = m_i \cdot r_i \cdot T. \quad (2.33)$$

Sečteme soustavu rovnic (2.33)

$$\left(\sum_i p_i\right) \cdot V = \sum_i m_i \cdot r_i \cdot T. \quad (2.34)$$

Podle Daltonova zákona pak

$$p \cdot V = T \cdot \left(\sum_i m_i \cdot r_i\right). \quad (2.35)$$

Rovnice stavu pro směs

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T. \quad (2.36)$$

Porovnáním pravých stran rovnic (2.35) a (2.36) dostaneme měrnou plynovou konstantu směsi

$$r = \frac{\sum_i m_i \cdot r_i}{m} = \sum_i \sigma_i \cdot r_i. \quad (2.37)$$

Z poměru rovnic (2.33) a (2.36) dostaneme

$$\frac{p_i}{p} = \frac{m_i}{m} \cdot \frac{r_i}{r}, \quad (2.38)$$

a odtud

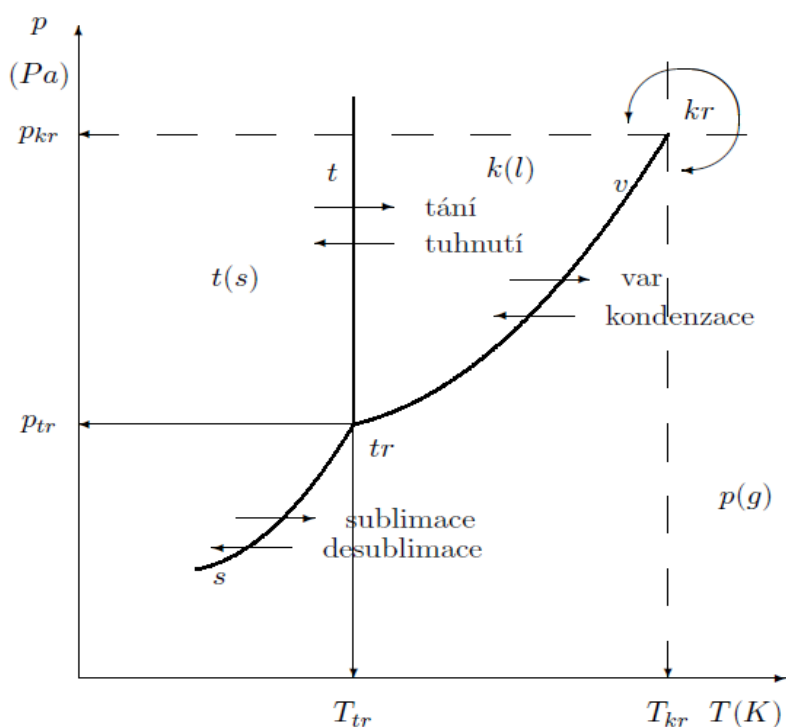
$$\Psi_i = \sigma_i \cdot \frac{r_i}{r}. \quad (2.39)$$

Z rovnic (2.32) a (2.39)

$$x_i = \omega_i = \Psi_i = \sigma_i \cdot \frac{r_i}{r}. \quad (2.40)$$

### 3 Rovnovážný – fázový diagram

Každá látka má svůj fázový diagram. Na obrázku 3 je jako příklad uveden fázový diagram, na jehož schématu jsou zobrazeny tři fáze, tuhá ( $t$ ), kapalná ( $k$ ) a plynná ( $p$ ). Tento diagram má na svislé ose tlak  $p$  a na vodorovné ose teplotu  $T$ . Při nižších teplotách existuje látka v tuhém skupenství ( $t$ ), při vyšších tlacích a teplotách existuje látka v kapalně fázi ( $k$ ) a při vyšších teplotách existuje v plynném skupenství ( $p$ ). Oblasti existence jednotlivých fází jsou od sebe odděleny mezními křivkami  $t$ ,  $s$  a  $v$ . Všechny tyto tři křivky se setkají v jednom bodě, ve kterém látka může koexistovat ve třech skupenstvích. Tento bod se nazývá trojný bod ( $tr$ ). Křivka  $t$  je křivka *tání* nebo *tuhnutí*, vyjadřuje podmínky pro koexistenci kapalně a tuhé fáze. Křivka  $s$  je křivka *sublimace* nebo *desublimace*, udává podmínky koexistence tuhé a plynné fáze. Křivka  $v$  je křivka *var* nebo *kondenzace*, vyjadřuje podmínky koexistence kapalně a plynné, vychází z trojného bodu a končí v kritickém bodě. V trojném bodě ( $tr$ ) je určen tlakem  $p_{tr}$  a teplotou  $T_{tr}$ . Dalším významným bodem v diagramu je kritický bod ( $kr$ ). V kritickém bodě je dán kritickým tlakem  $p_{kr}$  a kritickou teplotou  $T_{kr}$  dané látky, nad tímto bodem mizí rozdíl mezi kapalnou a plynnou fází.



Obrázek 3: Fázový diagram [18]

Ke změně skupenství na mezních křivkách za konstantní teploty je nutné dodat nebo odebrat látce určité množství tepla. Toto množství tepla se nazývá skupenské teplo  $L [J]$ . Podle diagramu na obrázku 3 jsou: skupenské teplo tání  $L_{s,l} [J]$ , skupenské teplo varu  $L_{l,g} [J]$ , skupenské teplo sublimace  $L_{s,g} [J]$ . Skupenské teplo pro 1 kg látky je měrné skupenské teplo:

$$l_{s,l} = \frac{L_{s,l}}{m}, \quad l_{l,g} = \frac{L_{l,g}}{m}, \quad l_{s,g} = \frac{L_{s,g}}{m}. \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (3.1)$$

## 4 Vlhký vzduch a jeho složky

Vlhký vzduch je směs suchého vzduchu a určitého množství vody ve formě syté, či přehřáté vodní páry, mlhy, jínovatky.

### 4.1 Suchý vzduch

Suchý vzduch existuje, když je z atmosférického vzduchu odstraněna vodní pára. Složení suchého vzduchu je relativně konstantní, ale malé rozdíly v množství jednotlivých komponent se vyskytují s časem, geografickým umístěním a nadmořskou výškou. Suchý vzduch je směsí plynů a jeho složení v blízkosti zemského povrchu je uvedeno v tabulce 2.

**Vlastnosti suchého vzduchu [19]:**

**Trojný bod:**

teplota v trojném bodě:  $t_{tr} = -213,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

tlak v trojném bodě:  $p_{tr} = 0,005265 \text{ MPa}$ ,

hustota v trojném bodě:  $\rho_{tr} = 957,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

**Kritický bod:**

kritická teplota:  $t_{kr} = -140,62 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

kritický tlak:  $p_{kr} = 3,7860 \text{ MPa}$ ,

kritická hustota:  $\rho_{kr} = 342,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**Tabulka 2:** Složení suchého vzduchu [19]

Plyn	Chemická značka	Objemový zlomek [%]	Hmotnostní zlomek [%]
Dusík	N <sub>2</sub>	78,0841	75,5197
Kyslík	O <sub>2</sub>	20,9460	23,1402
Argon	Ar	0,93400	1,28804
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
Neon	Ne	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Helium	He	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$
Metan	CH <sub>4</sub>	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Krypton	Kr	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
Oxid dusný	N <sub>2</sub> O	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$
Vodík	H <sub>2</sub>	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
Ozón	O <sub>3</sub>	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Xenon	Xe	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$

Z tabulky 2 je patrné, že v suchém vzduchu jsou kromě dusíku a kyslíku ve větším množství pouze argon a oxid uhličitý. Vodík a vzácné plyny jsou ve vzduchu obsaženy pouze ve stopových množstvích.

V Národním institutu standardů a technologie (National Institute of Standards and Technology, NIST, USA) pracují se složením suchého vzduchu dle tabulky 3

**Tabulka 3:** Složení suchého vzduchu dle NIST [19]

Plyn	Chemická značka	Objemový zlomek [%]
Dusík	N <sub>2</sub>	78,12
Kyslík	O <sub>2</sub>	20,96
Argon	Ar	0,92

Dále budeme počítat základní fyzikální vlastnosti suchého vzduchu.

**Tabulka 4:** Střední molární hmotnost suchého vzduchu [20]

Plyn	Molární hmotnosti $M[kg \cdot kmol^{-1}]$	Objemový zlomek $\omega_i[\%]$	$M \cdot \omega_i [kg \cdot kmol^{-1}]$
Dusík (N <sub>2</sub> )	28,0134	78,12	21,8840
Kyslík (O <sub>2</sub> )	31,9988	20,96	6,7069
Argon (Ar)	39,9480	0,92	0,3675
Suchý vzduch	28,9584	100	-

Z tabulky 4 střední molární hmotnost suchého vzduchu  $M_{sv} = 28,9584[kg \cdot kmol^{-1}]$ .

Měrná plynová konstanta suchého vzduchu  $r_{sv} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je podíl molární univerzální plynové konstanty  $R = 8314,41 [J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}]$  a střední molární hmotnosti suchého vzduchu  $M_{sv} = 28,9584 [kg \cdot kmol^{-1}]$

$$r_{sv} = \frac{R}{M_{sv}} = \frac{8314,41}{28,9584} = 287,12 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}. \quad (4.1)$$

Další bude výpočet izobarické měrné tepelné kapacity suchého vzduchu  $c_{p_{sv}} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ , uvažujeme-li Poissonovu konstantu  $\kappa = 1,4$

$$c_{p_{sv}} = \frac{\kappa \cdot r_{sv}}{\kappa - 1} = \frac{1,4 \cdot 287,12}{1,4 - 1} = 1004,92 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}. \quad (4.2)$$

Pro izochorickou měrnou tepelnou kapacitu suchého vzduchu  $c_{v_{sv}} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

$$c_{v_{sv}} = \frac{r_{sv}}{\kappa - 1} = \frac{287,12}{1,4 - 1} = 717,8 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}. \quad (4.3)$$

## 4.2 Voda a vodní pára

Druhou složkou vlhkého vzduchu je vodní pára. Voda se neustále odpařuje ze země, z oceánů, z půdy a ze vstupu do atmosféry. Vrací se na zem jako srážky. Jedná se o jednu z hlavních příčin počasí a hlavního faktoru pro vznik hurikánů a bouří. Vodní pára se přidává do vzduchu v našich domech a budovách infiltrací, potem, dýcháním, při vaření, koupání, mytí nádobí a sušení prádla, a také z rostlin.



## Vlastnosti vody a vodní páry [21]:

**Molární hmotnost vodní páry:**  $M_p = 18,015 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ,

### Trojný bod:

teplota v trojném bodě:  $t_{tr} = 0,01 \text{ °C} = 273,16 \text{ K}$ ,

tlak v trojném bodě:  $p_{tr} = 611,657 \text{ Pa}$ ,

měrné skupenské teplo varu v trojném bodě:  $l_{tr,l,g} = 2500,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,

měrné skupenské teplo sublimace v trojném bodě:  $l_{tr,s,g} = 2834,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,

měrné skupenské teplo tání v trojném bodě:  $l_{tr,s,l} = 333,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,

### Kritický bod:

kritická teplota:  $t_{kr} = 373,946 \text{ °C} = 647,096 \text{ K}$ ,

kritický tlak:  $p_{kr} = 22,064 \text{ MPa}$ ,

kritická hustota:  $\rho_{kr} = 322 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

Měrná plynová konstanta vodní páry  $r_p [J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}]$  je podíl molární univerzální plynové konstanty  $R = 8314,41 [J \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot K^{-1}]$  a molární hmotnosti vodní páry  $M_p = 18,015 [kg \cdot \text{kmol}^{-1}]$

$$r_p = \frac{R}{M_p} = \frac{8314,41}{18,015} = 461,52 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}. \quad (4.4)$$

Další bude výpočet izobarické měrné tepelné kapacity vodní páry  $c_{p_p} [J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}]$ , uvažujeme-li Poissonovu konstantu  $\kappa = 1,33$

$$c_{p_p} = \frac{\kappa \cdot r_p}{\kappa - 1} = \frac{1,33 \cdot 461,52}{1,33 - 1} = 1860 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}. \quad (4.5)$$

Pro izochorickou měrnou tepelnou kapacitu vodní páry  $c_{v_p} [J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}]$

$$c_{v_p} = \frac{r_p}{\kappa - 1} = \frac{461,52}{1,33 - 1} = 1398,54 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}. \quad (4.6)$$

## 5 Vlhký vzduch

### 5.1 Základní stavové veličiny

#### 5.1.1 Teplota vlhkého vzduchu

Vlhký vzduch je směs suchého vzduchu a vody. Vodu obsahuje ve formě přehřáté nebo syté vodní páry. Obě tyto složky vlhkého vzduchu, suchý vzduch a vodní pára mají stejnou teplotu

$$t_{vv} = t_{sv} = t_p, \quad (5.1)$$

kde  $t_{vv} [^{\circ}C]$  je teplota vlhkého vzduchu,  $t_{sv} [^{\circ}C]$  je teplota suchého vzduchu,  $t_p [^{\circ}C]$  je teplota vodní páry.

#### 5.1.2 Tlak vlhkého vzduchu

Celkový tlak vlhkého vzduchu je podle Daltonova zákona dán součtem parciálních (dílčích) tlaků jednotlivých složek. Vzhledem k této skutečnosti lze vyjádřit celkový tlak vlhkého vzduchu  $p_{vv}$  jako součet parciálních tlaků suchého vzduchu  $p_{sv}$  a vodní páry  $p_p$ :

$$p_{vv} = p_{sv} + p_p, \quad (5.2)$$

kde  $p_{vv} [Pa]$  je tlak vlhkého vzduchu,  $p_{sv} [Pa]$  je parciální tlak suchého vzduchu,  $p_p [Pa]$  je parciální tlak vodní páry.

#### 5.1.3 Objem vlhkého vzduchu

Objem suchého vzduchu i vodní páry je dle Oswaldova zákona roven objemu vlhkého vzduchu

$$V_{vv} = V_{sv} = V_p = V, \quad (5.3)$$

kde  $V_{vv} [m^3]$  je objem vlhkého vzduchu,  $V_{sv} [m^3]$  je objem suchého vzduchu,  $V_p [m^3]$  je objem vodní páry.

#### 5.1.4 Hmotnost vlhkého vzduchu

Hmotnost vlhkého vzduchu je aditivní veličina, tj.

$$m_{vv} = m_{sv} + m_p + m_k + m_t, \quad (5.4)$$

kde  $m_{vv} [kg]$  je hmotnost vlhkého vzduchu,  $m_{sv} [kg]$  je hmotnost suchého vzduchu,  $m_p [kg]$  je hmotnost vodní páry,  $m_k [kg]$  je hmotnost kapalné fáze vody,  $m_t [kg]$  je hmotnost tuhé fáze vody.

V nenasyčeném a nasyceném vlhkém vzduchu je  $m_k = m_t = 0$  a hmotnost vlhkého vzduchu je

$$m_{vv} = m_{sv} + m_p. \quad (5.5)$$

### 5.1.5 Hustota vlhkého vzduchu

Hustota vlhkého vzduchu je poměrem hmotnosti vlhkého vzduchu k jeho objemu, z rovnic (5.3) a (5.5) hustota vlhkého vzduchu je rovna součtu suchého vzduchu a vodní páry

$$\rho_{vv} = \rho_{sv} + \rho_p, \quad (5.6)$$

kde  $\rho_{vv} [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota vlhkého vzduchu,  $\rho_{sv} [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota suchého vzduchu,  $\rho_p [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota vodní páry.

### 5.1.6 Stavová rovnice vlhkého vzduchu

Vlhký vzduch je binární (dvousložková) směs. Jeho složky, suchý vzduch a vodní pára, každý lze popsat modelem ideálního plynu.

Pro suchý vzduch

$$p_{sv} \cdot V_{sv} = m_{sv} \cdot r_{sv} \cdot T, \quad (5.7)$$

$$p_{sv} = \rho_{sv} \cdot r_{sv} \cdot T, \quad (5.8)$$

kde  $p_{sv} [Pa]$  je parciální tlak suchého vzduchu,  $r_{sv} = 287,12 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta suchého vzduchu,  $m_{sv} [kg]$  je hmotnost suchého vzduchu,  $V_{sv} [m^3]$  je objem suchého vzduchu,  $T [K]$  je teplota termodynamická,  $\rho_{sv} [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota suchého vzduchu.

Pro vodní páru při téže teplotě

$$p_p \cdot V_p = m_p \cdot r_p \cdot T, \quad (5.9)$$

$$p_p = \rho_p \cdot r_p \cdot T, \quad (5.10)$$

kde  $p_p [Pa]$  je parciální tlak vodní páry,  $r_p = 461,52 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta vodní páry,  $m_p [kg]$  je hmotnost vodní páry,  $V_p [m^3]$  je objem vodní páry,  $T [K]$  je teplota termodynamická,  $\rho_p [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota vodní páry.

Stavová rovnice vlhkého vzduchu je daná vztahem:

$$p_{vv} \cdot V_{vv} = m_{vv} \cdot r_{vv} \cdot T, \quad (5.11)$$

$$p_{vv} = \rho_{vv} \cdot r_{vv} \cdot T, \quad (5.12)$$

kde  $p_{vv} [Pa]$  je tlak vlhkého vzduchu,  $m_{vv} [kg]$  je hmotnost vlhkého vzduchu,  $V_{vv} [m^3]$  je objem vlhkého vzduchu,  $T [K]$  je teplota termodynamická,  $r_{vv} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu,  $\rho_{vv} [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota vlhkého vzduchu.

### 5.1.7 Tlak syté vodní páry

Množství vodní páry obsažené ve směsi vlhkého vzduchu se může měnit. Stav, při kterém vzduch pojme maximální množství vodní páry, se nazývá nasycení. Parciální tlak nasycené vodní páry je tedy tlakem vodní páry při nasycení. Tento tlak syté vodní páry  $p_p'' [Pa]$  je funkcí pouze teploty. Vlhký vzduch dělíme dle obsaženého množství páry.

- $p_p < p_p''(t)$  je vlhký vzduch nenasyčený, vlhký vzduch je směsí suchého vzduchu a přehřáté vodní páry.
- $p_p = p_p''(t)$  je vlhký vzduch nasycený, vlhký vzduch je směsí suchého vzduchu a syté vodní páry.
- $p_p > p_p''(t)$  je vlhký vzduch přesycený, při teplotě  $t > 0$  °C je kapalná fáze, při teplotě  $t < 0$  °C je tuhá fáze.

V případě, že je vlhký vzduch nasycený a nenasyčený, je homogenní směsí, a v případě, kdy je vlhký vzduch přesycený, je heterogenní směsí.

Dle [21] lze vypočítat tlak syté vodní páry v závislosti na teplotní funkci v intervalu teplot 0 °C až 200 °C

$$p_p'' = p_{kr} \cdot \exp \left[ \frac{1}{1 - \tau} \cdot (a_1 \cdot \tau + a_2 \cdot \tau^{1,5} + a_3 \cdot \tau^3 + a_4 \cdot \tau^{3,5} + a_5 \cdot \tau^4 + a_6 \cdot \tau^{7,5}) \right], \quad (5.13)$$

kde  $p_p'' [MPa]$  je tlak syté vodní páry,  $p_{kr} = 22,064 [MPa]$  je kritický tlak vodní páry,  $T [K]$  je teplota termodynamická,  $T_{kr} = 647,096 [K]$  je kritická teplota vodní páry,  $\tau [1]$  je teplotní funkce, která je dána vztahem:

$$\tau = 1 - \frac{T}{T_{kr}}. \quad (5.14)$$

Konstanty v rovnici (5.13) jsou o hodnotách:

$$\begin{aligned} a_1 &= -7,859518, & a_4 &= 22,680741, \\ a_2 &= 1,844083, & a_5 &= -15,961872, \\ a_3 &= -11,78665, & a_6 &= 1,801225, \end{aligned}$$

a v intervalu -223 °C až 0,01 °C lze pro výpočet tlaku syté páry podle [21] použít vztah

$$p_p'' = p_{tr} \cdot \exp \left( \theta^{-1} \cdot \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \theta^{b_i} \right), \quad (5.15)$$

kde  $p_p'' [Pa]$  je tlak syté vodní páry,  $p_{tr} = 611,657 [Pa]$  je tlak trojného bodu vody,  $T [K]$  je teplota termodynamická,  $T_{tr} = 273,16 [K]$  je teplota trojného bodu vody, koeficient  $\theta [1]$  je dán vztahem:

$$\theta = \frac{T}{T_{tr}}. \quad (5.16)$$

Konstanty v rovnici (5.16) jsou o hodnotách:

$$\begin{aligned} a_1 &= -21,2144006, & b_1 &= 0,00333333333, \\ a_2 &= 27,3203819, & b_2 &= 1,206666667, \\ a_3 &= -6,1059813, & b_3 &= 1,703333333. \end{aligned}$$

### 5.1.8 Teplota rosného bodu

Teplota rosného bodu  $t_{rb} [^{\circ}C]$  je teplota, při níž jsou páry ve vzduchu při izobarickém ochlazení právě syté, tzn. vzduch je nasycen vlhkostí, tedy  $p_p = p_p''(t_{rb})$ .

## 5.2 Vyjádření vlhkosti vzduchu

Pro jednoznačné určení stavu vlhkého vzduchu jsou nutné dvě základní stavové veličiny a jedna veličina určující obsah vlhkosti ve vzduchu. Veličin určujících vlhkost vzduchu je řada. K nejčastěji používaným patří absolutní vlhkost, relativní vlhkost, měrná vlhkost.

### 5.2.1 Absolutní vlhkost vzduchu

Absolutní vlhkost vzduchu  $a [kg \cdot m^{-3}]$  je hmotnost vodní páry, případně vody a ledu v objemové jednotce vlhkého vzduchu

$$a = \frac{m_p + m_k + m_t}{V}. \quad (5.17)$$

V nenasyčeném a nasyceném vlhkém vzduchu je  $m_k = m_t = 0$  a absolutní vlhkost vzduchu je rovna hustotě vodní páry  $\rho_p$  při jejím tlaku  $p_p$ , podle rovnice (5.3)  $V_p = V$ , a tedy

$$a = \frac{m_p}{V} = \rho_p. \quad (5.18)$$

Maximální absolutní vlhkost vzduchu  $a'' [kg \cdot m^{-3}]$  je rovna hustotě syté vodní páry  $\rho_p'' [kg \cdot m^{-3}]$  při dané teplotě

$$a'' = \rho_p''. \quad (5.19)$$

### 5.2.2 Relativní vlhkost vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu  $\varphi [1]$  je veličina v praxi velmi často používaná. Vzhledem k definici relativní vlhkosti vzduchu je poměr absolutní vlhkosti vzduchu  $a [kg \cdot m^{-3}]$  a absolutní vlhkosti vzduchu nasyceného  $a'' [kg \cdot m^{-3}]$  při téže teplotě

$$\varphi = \frac{a}{a''}. \quad (5.20)$$

Podle rovnice (5.18) a (5.19) je relativní vlhkost vzduchu

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''}. \quad (5.21)$$

Vychází z rovnice (5.10) a lze ji vyjádřit vztahem

$$\varphi = \frac{a}{a''} = \frac{\rho_p}{\rho_p''} = \frac{p_p}{r_p \cdot T} \cdot \frac{r_p \cdot T}{p_p''} = \frac{p_p}{p_p''}, \quad (5.22)$$

kde  $a [kg \cdot m^{-3}]$  je absolutní vlhkost vzduchu,  $a'' [kg \cdot m^{-3}]$  je absolutní vlhkost vzduchu nasyceného,  $p_p [Pa]$  je parciální tlak vodní páry,  $p_p'' [Pa]$  je parciální tlak syté vodní páry,  $T [K]$  je teplota termodynamická,  $r_p [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta vodní páry.

Z rovnice (5.22) vyplývá, že relativní vlhkost suchého vzduchu  $\varphi = 0$  a relativní vlhkost nasyceného vzduchu  $\varphi = 1$ . Často se relativní vlhkost udává v procentech.

### 5.2.3 Měrná vlhkost vzduchu

Měrná vlhkost vzduchu  $x [kg_p \cdot kg_{sv}^{-1}]$  je hmotnost vodní páry, případně i vody ve skupenství kapalném nebo tuhém, obsažená ve vlhkém vzduchu, jehož suchá část má hmotnost 1 kg. Měrná vlhkost tedy udává hmotnost vlhkosti připadající na 1 kg suchého vzduchu

$$x = \frac{m_p + m_k + m_t}{m_{sv}}. \quad (5.23)$$

V nenasyčeném a nasyceném vlhkém vzduchu je  $m_k = m_t = 0$  a měrnou vlhkost vzduchu lze psát

$$x = \frac{m_p}{m_{sv}}. \quad (5.24)$$

Pomocí rovnice (5.3) a rovnice (5.24) lze psát

$$x = \frac{\rho_p}{\rho_{sv}}. \quad (5.25)$$

Měrná vlhkost nenasyčeného vzduchu, pro kterou  $\varphi < 1$ , pomocí rovnice (5.2), (5.8), (5.10) a (5.22) je vyjádřena vztahem

$$x = \frac{\rho_p}{\rho_{sv}} = \frac{p_p}{r_p \cdot T} \cdot \frac{r_{sv} \cdot T}{p_{sv}} = \frac{287,12}{461,52} \cdot \frac{p_p}{p_{sv}} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_p''}{p_{vv} - \varphi \cdot p_p''}. \quad (5.26)$$

Měrná vlhkost nasyceného vzduchu, pro kterou  $\varphi = 1$  je vyjádřena vztahem

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_p''}{p_{vv} - p_p''}. \quad (5.27)$$

## 5.3 Hmotnostní zlomky složek vlhkého vzduchu

Vlhký vzduch je složen z hmotnostního podílu suchého vzduchu a hmotnostního podílu vodní páry. Dle rovnice (2.24), (5.5) a (5.24) :

Hmotnostní zlomek suchého vzduchu

$$\sigma_{sv} = \frac{m_{sv}}{m_{vv}} = \frac{1}{1 + x}. \quad (5.28)$$

Hmotnostní zlomek vodní páry

$$\sigma_p = \frac{m_p}{m_{vv}} = \frac{x}{1 + x}. \quad (5.29)$$

Pro hmotnostní zlomky platí

$$\sigma_{sv} + \sigma_p = 1. \quad (5.30)$$

## 5.4 Měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu

Počítáme měrnou plynovou konstantu vlhkého vzduchu  $r_{vv}[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  podle rovnice (2.37)

$$r_{vv} = \sigma_{sv} \cdot r_{sv} + \sigma_p \cdot r_p, \quad (5.31)$$

dle rovnice (5.28) a (5.29) měrnou plynovou konstantu vlhkého vzduchu lze psát

$$r_{vv} = \frac{1}{1+x} \cdot r_{sv} + \frac{x}{1+x} \cdot r_p, \quad (5.32)$$

kde  $r_{sv}[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta suchého vzduchu,  $r_p[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta vodní páry,  $x[kg_p \cdot kg_{sv}^{-1}]$  je měrná vlhkost vzduchu.

## 5.5 Izobarická měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu

Izobarickou měrnou tepelnou kapacitu vlhkého vzduchu  $c_{p_{vv}}[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  počítáme jako pro směs ideálních plynů

$$c_{p_{vv}} = \sigma_{sv} \cdot c_{p_{sv}} + \sigma_p \cdot c_{p_p}, \quad (5.33)$$

dle rovnice (5.28) a (5.29) izobarickou měrnou tepelnou kapacitu vlhkého vzduchu lze psát

$$c_{p_{vv}} = \frac{1}{1+x} \cdot c_{p_{sv}} + \frac{x}{1+x} \cdot c_{p_p}, \quad (5.34)$$

kde  $x[kg_p \cdot kg_{sv}^{-1}]$  je měrná vlhkost vzduchu,  $c_{p_{sv}}[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je izobarická měrná tepelná kapacita suchého vzduchu,  $c_{p_p}[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je izobarická měrná tepelná kapacita vodní páry.

## 5.6 Poissonova konstanta vlhkého vzduchu

Dle rovnice (2.12) Poissonovu konstantu  $\kappa[1]$  lze psát ve tvaru

$$\kappa = \frac{c_p}{c_p - r}. \quad (5.35)$$

Podle rovnice (5.35) Poissonovu konstantu vlhkého vzduchu  $\kappa_{vv}[1]$  lze vyjádřit vztahem

$$\kappa_{vv} = \frac{c_{p_{vv}}}{c_{p_{vv}} - r_{vv}}, \quad (5.36)$$

kde  $r_{vv}[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu,  $c_{p_{vv}}[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je izobarická měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu.

## 5.7 Entalpie vlhkého vzduchu

Entalpie vlhkého vzduchu označovaná  $h_{1+x}[J \cdot kg_{sv}^{-1}]$  se vztahuje obdobně jako měrná vlhkost vzduchu na 1 kg suchého vzduchu. Tato entalpie tedy není měrnou veličinou, tj. entalpií 1 kg suchého vzduchu, ale entalpií směsi 1 kg suchého vzduchu a  $x$  kg vodní páry.

Entalpie vlhkého vzduchu  $h_{1+x} [J \cdot kg_{sv}^{-1}]$  je vyjádřena vztahem

$$h_{1+x} = h_{sv} + x \cdot h_p, \quad (5.37)$$

kde  $h_{sv} [J \cdot kg^{-1}]$  je měrná entalpie suchého vzduchu,  $h_p [J \cdot kg^{-1}]$  je měrná entalpie vodní páry,  $x [kg_p \cdot kg_{sv}^{-1}]$  je měrná vlhkost vzduchu.

Měrná entalpie suchého vzduchu  $h_{sv} [J \cdot kg^{-1}]$  je daná vztahem:

$$h_{sv} = c_{p_{sv}} \cdot t, \quad (5.38)$$

kde  $c_{p_{sv}} = 1004,92 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  (viz rovnice (4.2)) je izobarická měrná tepelná kapacita suchého vzduchu,  $t [^\circ C]$  je teplota.

Měrná entalpie vodní páry  $h_p [J \cdot kg^{-1}]$  je daná vztahem:

$$h_p = l_{l,g 0} + c_{p_p} \cdot t, \quad (5.39)$$

kde  $c_{p_p} = 1860 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  (viz rovnice (4.5)) je izobarická měrná tepelná kapacita vodní páry,  $l_{l,g 0} = 2500 [kJ \cdot kg^{-1}]$  je měrné skupenské teplo varu vody při teplotě  $0 \text{ } ^\circ C$ ,  $t [^\circ C]$  je teplota.

Pro nenasyčený vzduch  $x < x''$  je entalpie vlhkého vzduchu daná vztahem:

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x \cdot (l_{l,g 0} + c_{p_p} \cdot t). \quad (5.40)$$

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_p''}{p_{vv} - \varphi \cdot p_p''} \text{ viz rovnice (5.26).}$$

Pro nasycený vzduch  $x = x''$  je entalpie vlhkého vzduchu daná vztahem:

$$h_{1+x}'' = c_{p_{sv}} \cdot t + x'' \cdot (l_{l,g 0} + c_{p_p} \cdot t). \quad (5.41)$$

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_p''}{p_{vv} - p_p''} \text{ viz rovnice (5.27).}$$



## 6 Termofyzikální vlastnosti vlhkého vzduchu

V této kapitole jsou uvedeny některé důležité termofyzikální vlastnosti vlhkého vzduchu (dynamická viskozita, kinematická viskozita, součinitel tepelné vodivosti, součinitel teplotní vodivosti).

### 6.1 Rychlost zvuku ve vlhkém vzduchu

Rychlost zvuku označovaná  $v[m \cdot s^{-1}]$  je rychlost, jakou se zvukové vlny šíří prostředím. Často se tímto pojmem myslí rychlost zvuku ve vzduchu, která závisí na atmosférických podmínkách – největší vliv na její hodnotu má teplota vzduchu. Obecně je rychlost zvuku  $v[m \cdot s^{-1}]$  popsána Newtonovým zákonem

$$v = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}, \quad (6.1)$$

kde  $p[Pa]$  je tlak,  $\rho[kg \cdot m^{-3}]$  je hustota, index  $s$  symbolizuje derivace při konstantní entropii.

Pro ideální plyn lze rychlost zvuku psát ve tvaru

$$v = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T}, \quad (6.2)$$

kde  $\kappa[1]$  je Poissonova konstanta,  $p[Pa]$  je tlak,  $\rho[kg \cdot m^{-3}]$  je hustota,  $r[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta,  $T[K]$  je teplota termodynamická. Rychlost zvuku v ideálním plynu závisí pouze na jeho teplotě a složení.

V homogenní směsi vlhkého vzduchu lze rychlost zvuku  $v_{vv}[m \cdot s^{-1}]$  psát

$$v_{vv} = \sqrt{\kappa_{vv} \cdot r_{vv} \cdot T}, \quad (6.3)$$

kde  $\kappa_{vv}[1]$  je Poissonova konstanta vlhkého vzduchu:

$$\kappa_{vv} = \frac{c_{p_{vv}}}{c_{p_{vv}} - r_{vv}} \text{ viz rovnice (5.36),}$$

$r_{vv}[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu:

$$r_{vv} = \frac{1}{1+x} \cdot r_{sv} + \frac{x}{1+x} \cdot r_p \text{ viz rovnice (5.32),}$$

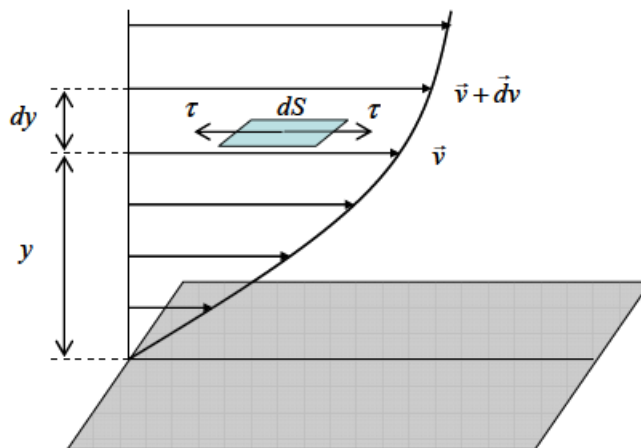
$T[K]$  je teplota termodynamická.

### 6.2 Viskozita vlhkého vzduchu

Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření. Viskozita (vnitřní tření) je vlastnost všech ideálních plynů, která se projevuje třením k sobě přiléhajících vrstev plynu při jejich vzájemném pohybu. Pohybují-li se sousední vrstvy plynu různými rychlostmi, vzniká na jejich rozhraní tečné (smykové) napětí, které jim brání v pohybu.

Jak již bylo zmiňováno, viskozita je důsledkem smykového (tečného) napětí  $\tau$ , vznikajícího mezi jednotlivými vrstvami plynu při jejich pohybu (toku) v důsledku třecí síly.

V případě laminárního proudění u Newtonských plynů roste tečné napětí spolu s rostoucí rychlostí plynu od vrstvy k vrstvě. Změnu rychlosti lze charakterizovat pomocí gradientu rychlosti  $dv/dy$ , který je kolmý na směr toku, viz obrázek 4.



**Obrázek 4:** Gradient rychlosti kolmý na směr toku. Tečné napětí v plynu v důsledku vnitřního tření při toku [22]

Závislost tečného napětí na rychlosti smykové deformace (gradientu rychlosti ve směru osy  $y$ ) udává rovnice (6.4). Podle Newtona lze vnitřní tření závislé na gradientu rychlosti vyjádřit vztahem

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}, \quad (6.4)$$

kde  $\tau [Pa]$  je tečné napětí,  $\eta [Pa \cdot s]$  je dynamická viskozita,  $dv/dy [s^{-1}]$  je gradient rychlosti ve směru kolmém na rychlost.

### 6.2.1 Dynamická viskozita vlhkého vzduchu

Dynamická viskozita  $\eta [Pa \cdot s]$  je definovaná silou, kterou působí plošná jednotka vrstvy proudícího plynu na sousední plošnou jednotku při jednotkovém rychlostním gradientu.

Podle [23] je dynamická viskozita vlhkého vzduchu  $\eta_{vv} [Pa \cdot s]$  daná rovnicí

$$\eta_{vv} = \frac{\eta_{sv}}{1 + \left(0,59329 + 0,52688 \cdot \sqrt{\frac{\eta_{sv}}{\eta_p}}\right) \cdot x} + \frac{x \cdot \eta_p}{x + 0,41554 + 0,46791 \cdot \sqrt{\frac{\eta_p}{\eta_{sv}}}}, \quad (6.5)$$

kde  $\eta_{sv} [Pa \cdot s]$  je dynamická viskozita suchého vzduchu, platí:

$$\eta_{sv} = 1,521 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{T \cdot \sqrt{T}}{T + 126}, \quad (6.6)$$

$\eta_p [Pa \cdot s]$  je dynamická viskozita vodní páry, je daná rovnicí:

$$\eta_p = 10^{-4} \cdot \frac{\sqrt{\frac{T}{647,096}}}{\sum_{i=0}^3 \frac{H_i}{\left(\frac{T}{647,096}\right)^i}}, \quad (6.7)$$

$x[kg_p \cdot kg_{sv}^{-1}]$  je měrná vlhkost vzduchu,

kde hodnoty konstant v rovnici (6.7) jsou:

$$H_0 = 1,67752, H_1 = 2,20462, H_2 = 0,6366564, H_3 = -0,241605.$$

### 6.2.2 Kinematická viskozita vlhkého vzduchu

Kinematická viskozita  $\vartheta[m^2 \cdot s^{-1}]$  je podíl dynamické viskozity a hustoty plynu, je daná vztahem

$$\vartheta = \frac{\eta}{\rho}, \quad (6.8)$$

kde  $\eta[Pa \cdot s]$  je dynamická viskozita,  $\rho[kg \cdot m^{-3}]$  je hustota plynu.

Pro vlhký vzduch je kinematická viskozita  $\vartheta_{vv}[m^2 \cdot s^{-1}]$  podíl dynamické viskozity vlhkého vzduchu a hustoty vlhkého vzduchu

$$\vartheta_{vv} = \frac{\eta_{vv}}{\rho_{vv}}, \quad (6.9)$$

kde  $\eta_{vv}[Pa \cdot s]$  je dynamická viskozita vlhkého vzduchu,  $\rho_{vv}[kg \cdot m^{-3}]$  je hustota vlhkého vzduchu.

### 6.3 Součinitel tepelné vodivosti vlhkého vzduchu

Tepelná vodivost je schopnost látky vést, přenášet teplo. Tato veličina ukazuje rychlost, jakou se teplo šíří a přenáší z jedné zahřáté části materiálu do jiné části materiálu v našem případě zejména do chladnější části prostoru. Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  je definován jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád.

Dle [23] je součinitel tepelné vodivosti vlhkého vzduchu  $\lambda_{vv} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  dán rovnicí

$$\lambda_{vv} = \frac{\lambda_{sv}}{1 + \left(0,63398 + 0,53057 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{sv}}{\lambda_p} \cdot \frac{T + 111}{T + 961}}\right)^2 \cdot \frac{T + 239,40}{T + 111} \cdot x} + \frac{x \cdot \lambda_p}{x + \left(0,39433 + 0,47119 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{sv}}{\lambda_p} \cdot \frac{T + 961}{T + 111}}\right)^2 \cdot \frac{T + 239,40}{T + 961}}, \quad (6.10)$$

kde  $\lambda_{sv} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  je součinitel tepelné vodivosti suchého vzduchu, je dán vztahem:

$$\lambda_{sv} = 0,002 \cdot \frac{1 + 0,000194 \cdot T}{1 + \frac{117}{T}} \cdot \sqrt{T}, \quad (6.11)$$

$\lambda_p [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  je součinitel tepelné vodivosti vodní páry, je dán vztahem:

$$\lambda_p = 10^{-3} \cdot \frac{\sqrt{\frac{T}{647,096}}}{\sum_{k=0}^4 \frac{L_k}{\left(\frac{T}{647,096}\right)^k}}, \quad (6.12)$$

$x [kg_p \cdot kg_{sv}^{-1}]$  je měrná vlhkost vzduchu,

kde hodnoty koeficientů v rovnici (6.12) jsou:

$$\begin{aligned} L_0 &= 0,002443221, & L_1 &= 0,01323095, & L_2 &= 0,00670357, \\ L_3 &= -0,003454586, & L_4 &= 0,0004096266. \end{aligned}$$

#### 6.4 Součinitel teplotní vodivosti vlhkého vzduchu

Teplotní vodivost je schopnost stejnorodého materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém vedení tepla. Teplotní vodivost měří rychlost šíření tepla v médiu vedením, když se mění teplota s časem. V analýze přenosů tepla je součinitel teplotní vodivosti  $\alpha [m^2 \cdot s^{-1}]$  definován vztahem

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}, \quad (6.13)$$

kde  $\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  je součinitel tepelné vodivosti,  $c_p [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je izobarická měrná tepelná kapacita,  $\rho [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota.

Čím je hodnota součinitele tepelné vodivosti vyšší, tím rychleji se šíří teplo do média. Malá hodnota součinitele tepelné vodivosti znamená, že teplo je většinou absorbováno materiálem a malé množství tepla bude dále vedeno.

Pro součinitel teplotní vodivosti vlhkého vzduchu  $\alpha_{vv} [m^2 \cdot s^{-1}]$  lze psát

$$\alpha_{vv} = \frac{\lambda_{vv}}{c_{p_{vv}} \cdot \rho_{vv}}, \quad (6.14)$$

kde  $\lambda_{vv} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  je součinitel tepelné vodivosti vlhkého vzduchu,  $c_{p_{vv}} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  je izobarická měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu,  $\rho_{vv} [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota vlhkého vzduchu.

## 7 Algoritmy výpočtu

Máme tři parametry vlhkého vzduchu, které slouží k výpočtu zbývajících parametrů. Jeden je vždy hodnota celkového tlaku  $p_{vv}$  a další dva parametry jsou teplota  $t$  a relativní vlhkost  $\varphi$ . Každý algoritmus jsou postupy při výpočtech dané právě těmito třemi parametry.

### 7.1 Algoritmy výpočtu termodynamických parametrů vlhkého vzduchu

#### 7.1.1 Algoritmus výpočtu měrné vlhkosti vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}$ , $\varphi$ , $t$

Pro výpočet měrné vlhkosti vzduchu nejprve potřebujeme výpočet tlaku syté vodní páry.

##### Postup výpočtu:

1) Pro danou teplotu  $t$  se spočítá tlak syté vodní páry  $p_p''$ .

Pro  $t \geq 0$  °C používáme rovnici (5.13)

$$p_p'' = p_{kr} \cdot \exp \left[ \frac{1}{1 - \tau} \cdot (a_1 \cdot \tau + a_2 \cdot \tau^{1,5} + a_3 \cdot \tau^3 + a_4 \cdot \tau^{3,5} + a_5 \cdot \tau^4 + a_6 \cdot \tau^{7,5}) \right].$$

Nebo pro  $t < 0$  °C používáme rovnici (5.15)

$$p_p'' = p_{tr} \cdot \exp \left( \theta^{-1} \cdot \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \theta^{b_i} \right).$$

2) Měrná vlhkost nenasyčeného vzduchu  $x$  se spočítá z rovnic (5.26)

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_p''}{p_{vv} - \varphi \cdot p_p''}.$$

Měrná vlhkost nasyceného vzduchu  $x''$  se spočítá z rovnic (5.27)

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_p''}{p_{vv} - p_p''}.$$

Hodnoty měrné vlhkosti vzduchu o tlaku  $p_{vv} = 101\,325$  Pa v závislosti na teplotě pro relativní vlhkost  $\varphi = 0$  až  $\varphi = 1$  jsou uvedeny v tabulce 1 a graf 1 v Příloze.

#### 7.1.2 Algoritmus výpočtu měrné plynové konstanty vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}$ , $\varphi$ , $t$

Pro výpočet měrné plynové konstanty vlhkého vzduchu nejprve potřebujeme výpočet tlaku syté vodní páry a měrnou vlhkost vzduchu.

##### Postup výpočtu:

1) Pro výpočet tlaku syté vodní páry  $p_p''$  viz algoritmus (7.1.1)

2) Pro výpočet měrné vlhkosti vzduchu  $x$  viz algoritmus (7.1.1)

3) Měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu  $r_{vv}$  se spočítá z rovnic (5.32)

$$r_{vv} = \frac{1}{1+x} \cdot r_{sv} + \frac{x}{1+x} \cdot r_p.$$

Hodnoty měrné plynové konstanty vlhkého vzduchu o tlaku  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$  v závislosti na teplotě pro relativní vlhkost  $\varphi = 0$  až  $\varphi = 1$  jsou uvedeny v tabulce 2 a grafu 2 v Příloze.

### 7.1.3 Algoritmus výpočtu hustoty vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}$ , $\varphi$ , $t$

Pro výpočet hustoty vlhkého vzduchu nejprve potřebujeme výpočet tlaku syté vodní páry, dále měrnou vlhkost vzduchu a měrnou plynovou konstantu vlhkého vzduchu.

#### Postup výpočtu:

- 1) Pro výpočet tlaku syté vodní páry  $p_p''$  viz algoritmus (7.1.1)
- 2) Pro výpočet měrné vlhkosti vzduchu  $x$  viz algoritmus (7.1.1)
- 3) Pro výpočet měrné plynové konstanty vlhkého vzduchu  $r_{vv}$  viz algoritmus (7.1.2)
- 4) Hustota vlhkého vzduchu  $\rho_{vv}$  se spočítá z rovnic (5.12)

$$\rho_{vv} = \frac{p_{vv}}{r_{vv} \cdot T}.$$

Hodnoty hustoty vlhkého vzduchu o tlaku  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$  v závislosti na teplotě pro relativní vlhkost  $\varphi = 0$  až  $\varphi = 1$  jsou uvedeny v tabulce 3 a grafu 3 v Příloze.

### 7.1.4 Algoritmus výpočtu entalpie vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}$ , $\varphi$ , $t$

Pro výpočet entalpie vlhkého vzduchu nejprve potřebujeme výpočet tlaku syté vodní páry a dále měrnou vlhkost vzduchu.

#### Postup výpočtu:

- 1) Pro výpočet tlaku syté vodní páry  $p_p''$  viz algoritmus (7.1.1)
- 2) Pro výpočet měrné vlhkosti vzduchu  $x$  viz algoritmus (7.1.1)
- 3) Pro nenasyčený vzduch se entalpie vlhkého vzduchu  $h_{1+x}$  spočítá z rovnic (5.40)

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x \cdot (l_{l,g\,0} + c_{p_p} \cdot t).$$

Pro nasycený vzduch se entalpie vlhkého vzduchu  $h_{1+x}''$  spočítá z rovnic (5.41)

$$h_{1+x}'' = c_{p_{sv}} \cdot t + x'' \cdot (l_{l,g\,0} + c_{p_p} \cdot t).$$

Hodnoty entalpie vlhkého vzduchu o tlaku  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$  v závislosti na teplotě pro relativní vlhkost  $\varphi = 0$  až  $\varphi = 1$  jsou uvedeny v tabulce 4 a grafu 4 v Příloze.

## 7.2 Algoritmy výpočtu termofyzikálních parametrů vlhkého vzduchu

### 7.2.1 Algoritmus výpočtu rychlosti zvuku ve vlhkém vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}, \varphi, t$

Pro výpočet rychlosti zvuku ve vlhkém vzduchu nejprve potřebujeme výpočet tlaku syté vodní páry, výpočet měrné vlhkosti vzduchu a měrné plynové konstanty vlhkého vzduchu, a dále výpočet izobarické měrné tepelné kapacity vlhkého vzduchu a Poissonovu konstantu vlhkého vzduchu.

#### Postup výpočtu:

1) Podle algoritmu výpočtu termodynamických parametrů vlhkého vzduchu pro danou teplotu  $t$ , celkový tlak  $p_{vv}$ , a relativní vlhkost  $\varphi$ , lze určit tlak syté vodní páry  $p_p''$ , měrnou vlhkost vzduchu  $x$  a měrnou plynovou konstantu vlhkého vzduchu  $r_{vv}$ .

2) Izobarická měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu  $c_{p_{vv}}$  se spočítá z rovnic (5.34)

$$c_{p_{vv}} = \frac{1}{1+x} \cdot c_{p_{sv}} + \frac{x}{1+x} \cdot c_{p_p}.$$

3) Poissonova konstanta vlhkého vzduchu  $\kappa_{vv}$  se spočítá z rovnic (5.36)

$$\kappa_{vv} = \frac{c_{p_{vv}}}{c_{p_{vv}} - r_{vv}}.$$

4) Rychlost zvuku vlhkého vzduchu  $v_{vv}$  se spočítá z rovnic (6.3)

$$v_{vv} = \sqrt{\kappa_{vv} \cdot r_{vv} \cdot T}.$$

Hodnoty rychlosti zvuku vlhkého vzduchu o tlaku  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$  v závislosti na teplotě pro relativní vlhkost  $\varphi = 0$  až  $\varphi = 1$  jsou uvedeny v tabulce 5 a grafu 5 v Příloze.

### 7.2.2 Algoritmus výpočtu dynamické a kinematické viskozity vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}, \varphi, t$

Pro výpočet dynamické a kinematické viskozity vlhkého vzduchu nejprve potřebujeme výpočet tlaku syté vodní páry, dále výpočet měrné vlhkosti vzduchu a měrné plynové konstanty vlhkého vzduchu, výpočet hustoty vlhkého vzduchu, a dále pro danou teplotu  $t$  lze vypočítat dynamickou viskozitu suchého vzduchu a dynamickou viskozitu vodní páry.

#### Postup výpočtu:

1) Podle algoritmu výpočtu termodynamických parametrů vlhkého vzduchu, pro danou teplotu  $t$ , celkový tlak  $p_{vv}$ , a relativní vlhkost  $\varphi$ , lze určit tlak syté vodní páry  $p_p''$ , měrnou vlhkost vzduchu  $x$ , měrnou plynovou konstantu vlhkého vzduchu  $r_{vv}$ , hustotu vlhkého vzduchu  $\rho_{vv}$ .

2) Pro danou teplotu  $t$  se spočítá dynamická viskozita suchého vzduchu  $\eta_{sv}$  z rovnic (6.6)

$$\eta_{sv} = 1,521 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{T \cdot \sqrt{T}}{T + 126}.$$

3) Pro danou teplotu  $t$  se spočítá dynamická viskozita vodní páry  $\eta_p$  z rovnic (6.7)

$$\eta_p = 10^{-4} \cdot \frac{\sqrt{\frac{T}{647,096}}}{\sum_{i=0}^3 \frac{H_i}{\left(\frac{T}{647,096}\right)^i}}$$

4) Dynamická viskozita vlhkého vzduchu  $\eta_{vv}$  se spočítá z rovnic (6.5)

$$\eta_{vv} = \frac{\eta_{sv}}{1 + \left(0,59329 + 0,52688 \cdot \sqrt{\frac{\eta_{sv}}{\eta_p}}\right) \cdot x} + \frac{x \cdot \eta_p}{x + 0,41554 + 0,46791 \cdot \sqrt{\frac{\eta_p}{\eta_{sv}}}}$$

Hodnoty dynamické viskozity vlhkého vzduchu o tlaku  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$  v závislosti na teplotě pro relativní vlhkost  $\varphi = 0$  až  $\varphi = 1$  jsou uvedeny v tabulce 6 a grafu 6 v Příloze.

5) Kinematická viskozita vlhkého vzduchu se spočítá z rovnic (6.9)

$$\vartheta_{vv} = \frac{\eta_{vv}}{\rho_{vv}}$$

Hodnoty kinematické viskozity vlhkého vzduchu o tlaku  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$  v závislosti na teplotě pro relativní vlhkost  $\varphi = 0$  až  $\varphi = 1$  jsou uvedeny v tabulce 7 a grafu 7 v Příloze.

### 7.2.3 Algoritmus výpočtu součinitele tepelné a teplotní vodivosti vlhkého vzduchu pro zadané hodnoty $p_{vv}$ , $\varphi$ , $t$

Pro výpočet součinitele tepelné a teplotní vodivosti vlhkého vzduchu nejprve potřebujeme výpočet tlaku syté vodní páry, dále výpočet měrné vlhkosti vzduchu a měrné plynové konstanty vlhkého vzduchu, výpočet hustoty vlhkého vzduchu, izobarické měrné tepelné kapacity vlhkého vzduchu, a dále pro danou teplotu  $t$  lze vypočítat součinitele tepelné vodivosti suchého vzduchu a součinitele tepelné vodivosti vodní páry.

#### Postup výpočtu:

1) Podle algoritmu výpočtu termodynamických parametrů vlhkého vzduchu, pro danou teplotu  $t$ , celkový tlak  $p_{vv}$ , a relativní vlhkost  $\varphi$ , lze určit tlak syté vodní páry  $p_p''$ , měrnou vlhkost vzduchu  $x$ , měrnou plynovou konstantu vlhkého vzduchu  $r_{vv}$ , hustotu vlhkého vzduchu  $\rho_{vv}$ , izobarickou měrnou tepelnou kapacitu vlhkého vzduchu  $c_{p_{vv}}$ .

2) Pro danou teplotu  $t$  se spočítá součinitel tepelné vodivosti suchého vzduchu  $\lambda_{sv}$  z rovnic (6.11)

$$\lambda_{sv} = 0,002 \cdot \frac{1 + 0,000194 \cdot T}{1 + \frac{117}{T}} \cdot \sqrt{T}$$

3) Pro danou teplotu  $t$  se spočítá součinitel tepelné vodivosti vodní páry  $\lambda_p$  z rovnic (6.12)



$$\lambda_p = 10^{-3} \cdot \frac{\sqrt{\frac{T}{647,096}}}{\sum_{k=0}^4 \frac{L_k}{\left(\frac{T}{647,096}\right)^k}}$$

4) Součinitel tepelné vodivosti vlhkého vzduchu  $\lambda_{vv}$  se spočítá z rovnic (6.10)

$$\lambda_{vv} = \frac{\lambda_{sv}}{1 + \left(0,63398 + 0,53057 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{sv}}{\lambda_p} \cdot \frac{T + 111}{T + 961}}\right)^2 \cdot \frac{T + 239,40}{T + 111} \cdot x + \frac{x \cdot \lambda_p}{x + \left(0,39433 + 0,47119 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{sv}}{\lambda_p} \cdot \frac{T + 961}{T + 111}}\right)^2 \cdot \frac{T + 239,40}{T + 961}}}$$

Hodnoty součinitele tepelné vodivosti vlhkého vzduchu o tlaku  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$  v závislosti na teplotě pro relativní vlhkost  $\varphi = 0$  až  $\varphi = 1$  jsou uvedeny v tabulce 8 a grafu 8 v Příloze.

5) Součinitel teplotní vodivosti vlhkého vzduchu  $\alpha_{vv}$  se spočítá z rovnic (6.14)

$$\alpha_{vv} = \frac{\lambda_{vv}}{c_{p_{vv}} \cdot \rho_{vv}}$$

Hodnoty součinitele teplotní vodivosti vlhkého vzduchu o tlaku  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$  v závislosti na teplotě pro relativní vlhkost  $\varphi = 0$  až  $\varphi = 1$  jsou uvedeny v tabulce 9 a grafu 9 v Příloze.

## 8 Závěr

Výsledkem této práce je sestavení tabulek a grafů termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti 0 až 1. V první, teoretické části, je obsažen přehled základních vztahů a všech vztahů potřebných k výpočtu termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu. Druhá, praktická část, se zabývá popisem algoritmů výpočtů termodynamických parametrů vlhkého vzduchu a termofyzikálních parametrů vlhkého vzduchu.

V rámci bakalářské práce jsem vytvořil tabulky a grafy termodynamických vlastností vlhkého vzduchu: měrné vlhkosti vzduchu, měrné plynové konstanty, hustoty, entalpie, i tabulky a grafy termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu: rychlosti zvuku, dynamické viskozity, kinematische viskozity, součinitele tepelné vodivosti, součinitele teplotní vodivosti v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti 0 až 1. Tabulky jsou vytvořeny tak, aby byla práce s nimi co nejpohodlnější a uživatel rychle a snadno pochopil jejich použití. Jsou sestaveny v oblasti nasyceného a nenasyceného vzduchu v rozsahu teplot od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a při celkovém tlaku  $101\,325\text{ Pa}$ .

Během psaní této bakalářské práce jsem si rozšířil znalosti v oblasti termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu. Jako student obecného studia jsem se seznámil se zajímavým oborem, který se jistě bude ještě dále vyvíjet. Znalosti získané při psaní práce, jak doufám, zúročím v navazujícím studiu.

Domnívám se, že jsem splnil vytyčené cíle bakalářské práce a že tato práce bude sloužit k lepšímu pochopení dané problematiky u studentů TUL.

## Použitá literatura a seznam zdrojů

- [1] Předměty | Českého vysokého učení technického v Praze, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky. ČVUT Fakulta strojní [online]. Copyright © 2019 ČVUT FS. [cit 01. 04. 2019]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ustavy/sekce-ustav-mechaniky-tekutin-a-termodynamiky/ustav-mechaniky-tekutin-a-termodynamiky-12112/vyuka-12112/predmety-12112/>
- [2] NOŽIČKA, Jiří. Základy Termomechaniky. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1998. ISBN 80-01-02409-1.
- [3] NOŽIČKA, Jiří, VÁRADIOVÁ, Blanka a ADAMEC, Josef. Termomechanika: sbírka příkladů. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999. ISBN 80-01-02015-0.
- [4] ŠAFAŘÍK, Pavel a VESTFÁLOVÁ, Magda. Základy termodynamiky vlhkého vzduchu. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999. ISBN 80-01-01977-2.
- [5] Termomechanika. Vysokého učení technického v Brně, Fakulta strojního inženýrství [online]. Copyright © 2019 VUT v Brně. [cit 02. 04. 2019]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/predmety/detail/198767>
- [6] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Vydavatelství VUT, Brno, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [7] Fakulta strojní Vysoké školy Báňské - Technická univerzita v Ostravě, Katedra energetiky, VŠB-TUO [online]. Copyright © Katedra energetiky 2019. [cit 03. 04. 2019]. Dostupné z: <http://katedry.fs.vsb.cz/energetika/studijni-materialy.php>
- [8] KADLEC, Zdeněk. Termomechanika, návody do cvičení. Vydavatelství VŠB-TU, Ostrava, 2002. ISBN 80-7078-912-3.
- [9] HLOUŠEK, Jiří. Termomechanika. Vydavatelství VUT, Brno, 1992. ISBN 80-214-0387-X.
- [10] Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení. Literatura [online]. Copyright © 1991-2018 UWB Plzeň. [cit 04. 04. 2019]. Dostupné z: <http://kke.zcu.cz/about/projekty/mtm/literatura.html>
- [11] RADIM, Mareš. Tabulky termodynamických vlastností vody a vodní páry. Vydavatelství ZČU, Plzeň, 2008. ISBN 978-80-7043-680-6.
- [12] Fakulta strojního inženýrství Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, Ústav strojů a energetiky [online]. Copyright © FSI 2008-2018. [cit 05. 04. 2019]. Dostupné z: <http://www.fsi.ujep.cz/>
- [13] KALČIK, Josef. Technická termodynamika. Vydavatelství ČSAV, Praha, 1963.
- [14] ENENKL, Vladimír. Termomechanika. Vydavatelství VUT, Brno, 1983.

- [15] Studijní pomůcky - termomechanika, VUT, Energetický ústav. Copyright © 2011 FSI VUT v Brně. Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/ot/studijni-pomucky-seminar-aplikovane-termomechaniky-2>
- [16] ŠAFAŘÍK, Pavel a VESTFÁLOVÁ, Magda. Termodynamika vlhkého vzduchu. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2016. ISBN 978-80-01-06020-9.
- [17] PETŘÍKOVÁ, Markéta a KRYŠTŮFEK, Pavel. Tabulky a diagramy pro termodynamiku. Vydavatelství TUL, Liberec, 2016. ISBN 978-80-7494-272-3.
- [18] STŘEDA, Ivo. Základy rovnovážné termodynamiky. Vydavatelství TUL, Liberec, 2018. ISBN 978-80-7494-396-6.
- [19] ŠAFAŘÍK, Pavel a VESTFÁLOVÁ, Magda. Termodynamika vlhkého vzduchu. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2016. ISBN 978-80-01-06020-9.
- [20] GATLEY.P, Donald. Understanding Psychrometrics, Third Edition. ASHRAE, Atlanta, 2013. ISBN 978-1-936504-31-2.
- [21] ŠAFAŘÍK, Pavel a VESTFÁLOVÁ, Magda. Termodynamika vlhkého vzduchu. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2016. ISBN 978-80-01-06020-9.
- [22] NOŽIČKA, Jiří. Mechanika tekutin. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004. ISBN 80-01-02865-8.
- [23] ŠAFAŘÍK, Pavel a VESTFÁLOVÁ, Magda. Termodynamika vlhkého vzduchu. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2016. ISBN 978-80-01-06020-9.

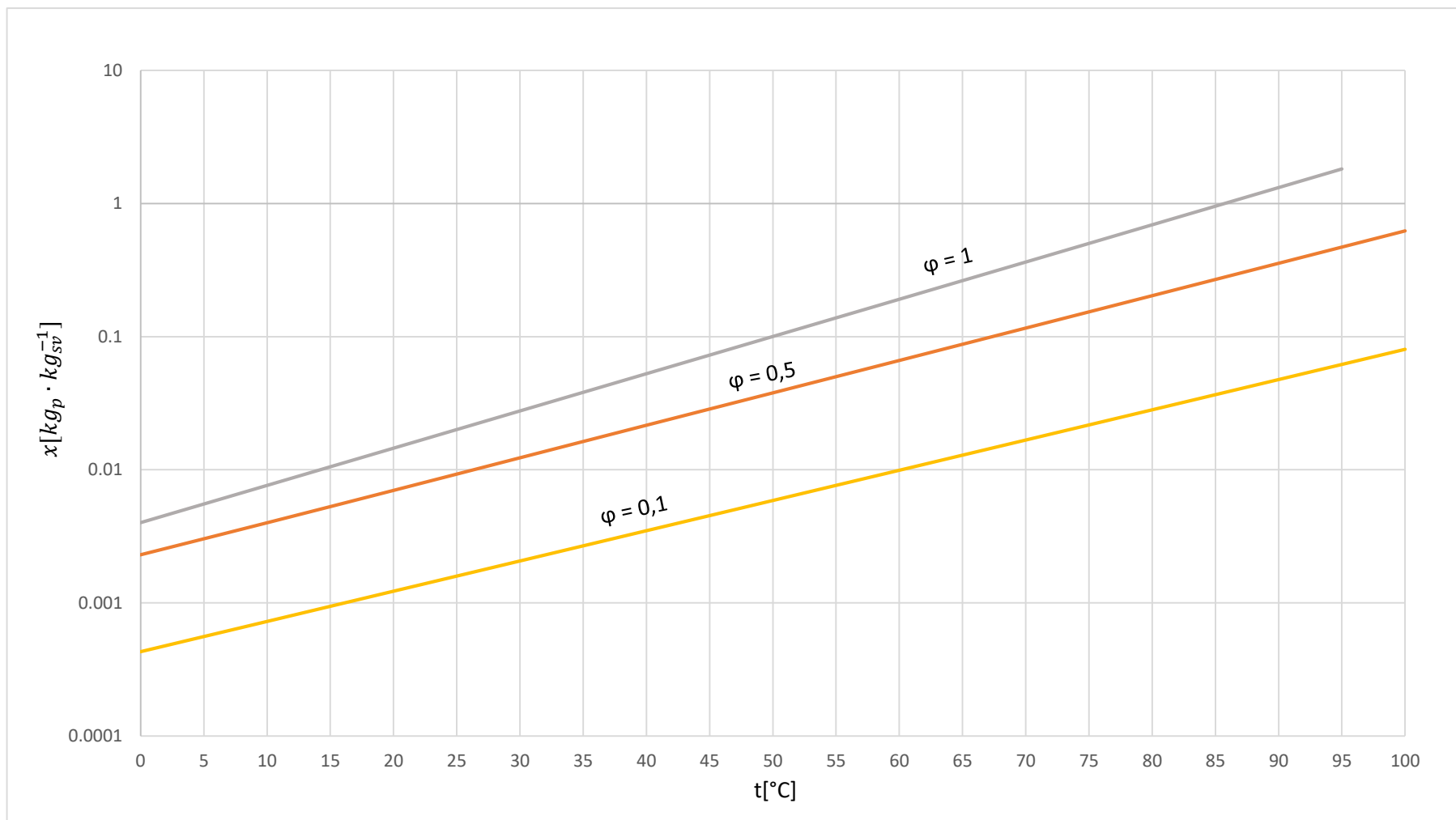
## Příloha

Tabulka 1	Měrná vlhkost o tlaku $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$ podle teploty a relativní vlhkosti
Graf 1	Měrná vlhkost v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$
Tabulka 2	Měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu o tlaku $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$ podle teploty a relativní vlhkosti
Graf 2	Měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$
Tabulka 3	Hustota vlhkého vzduchu o tlaku $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$ podle teploty a relativní vlhkosti
Graf 3	Hustota vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$
Tabulka 4	Entalpie vlhkého vzduchu o tlaku $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$ podle teploty a relativní vlhkosti
Graf 4	Entalpie vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$
Tabulka 5	Rychlost zvuku vlhkého vzduchu o tlaku $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$ podle teploty a relativní vlhkosti
Graf 5	Rychlost zvuku vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$
Tabulka 6	Dynamická viskozita vlhkého vzduchu o tlaku $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$ podle teploty a relativní vlhkosti
Graf 6	Dynamická viskozita vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$
Tabulka 7	Kinematická viskozita vlhkého vzduchu o tlaku $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$ podle teploty a relativní vlhkosti
Graf 7	Kinematická viskozita vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$
Tabulka 8	Součinitel tepelné vodivosti vlhkého vzduchu o tlaku $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$ podle teploty a relativní vlhkosti
Graf 8	Součinitel tepelné vodivosti vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$
Tabulka 9	Součinitel teplotní vodivosti vlhkého vzduchu o tlaku $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$ podle teploty a relativní vlhkosti
Graf 9	Součinitel teplotní vodivosti vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$

**Tabulka 1: Měrná vlhkost  $x[kg_p \cdot kg_{sv}^{-1}]$ ,  $p_{vv} = 101\,325\,Pa$**

$t[^\circ C] \backslash \varphi[1]$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
-50	0	2,42E-06	4,83E-06	7,25E-06	9,67E-06	1,21E-05	1,45E-05	1,69E-05	1,93E-05	2,18E-05	2,42E-05
-40	0	7,88E-06	1,58E-05	2,36E-05	3,15E-05	3,94E-05	4,73E-05	5,52E-05	6,31E-05	7,10E-05	7,88E-05
-30	0	2,33E-05	4,67E-05	7,00E-05	9,33E-05	1,17E-04	1,40E-04	1,63E-04	1,87E-04	2,10E-04	2,33E-04
-20	0	6,34E-05	1,27E-04	1,90E-04	2,54E-04	3,17E-04	3,80E-04	4,44E-04	5,07E-04	5,71E-04	6,34E-04
-10	0	1,60E-04	3,19E-04	4,79E-04	6,39E-04	7,99E-04	9,59E-04	0,0011	0,0013	0,0014	0,0016
0	0	3,75E-04	7,51E-04	0,0011	0,0015	0,0019	0,0023	0,0026	0,0030	0,0034	0,0038
5	0	5,36E-04	0,0011	0,0016	0,0021	0,0027	0,0032	0,0038	0,0043	0,0049	0,0054
10	0	7,55E-04	0,0015	0,0023	0,0030	0,0038	0,0046	0,0053	0,0061	0,0069	0,0076
15	0	0,0010	0,0021	0,0032	0,0042	0,0053	0,0063	0,0074	0,0085	0,0096	0,0106
20	0	0,0014	0,0029	0,0043	0,0058	0,0073	0,0087	0,0102	0,0117	0,0132	0,0147
25	0	0,0020	0,0039	0,0059	0,0079	0,0099	0,0119	0,0139	0,0160	0,0180	0,0201
30	0	0,0026	0,0053	0,0079	0,0106	0,0133	0,0160	0,0188	0,0216	0,0244	0,0272
35	0	0,0035	0,0070	0,0105	0,0141	0,0178	0,0214	0,0252	0,0289	0,0327	0,0366
40	0	0,0046	0,0092	0,0139	0,0187	0,0235	0,0284	0,0334	0,0385	0,0437	0,0489
45	0	0,0059	0,0120	0,0182	0,0245	0,0309	0,0375	0,0442	0,0510	0,0580	0,0651
50	0	0,0077	0,0155	0,0236	0,0319	0,0404	0,0491	0,0580	0,0672	0,0767	0,0864
55	0	0,0098	0,0200	0,0304	0,0413	0,0525	0,0640	0,0760	0,0884	0,1013	0,1146
60	0	0,0125	0,0255	0,0390	0,0532	0,0679	0,0833	0,0994	0,1163	0,1339	0,1525
65	0	0,0158	0,0323	0,0498	0,0682	0,0877	0,1083	0,1301	0,1533	0,1779	0,2042
70	0	0,0198	0,0408	0,0633	0,0874	0,1132	0,1410	0,1709	0,2033	0,2385	0,2768
75	0	0,0246	0,0513	0,0803	0,1118	0,1463	0,1843	0,2262	0,2726	0,3245	0,3827
80	0	0,0305	0,0642	0,1016	0,1432	0,1900	0,2428	0,3030	0,3722	0,4526	0,5471
85	0	0,0377	0,0802	0,1286	0,1842	0,2486	0,3243	0,4143	0,5233	0,6578	0,8283
90	0	0,0463	0,1000	0,1632	0,2384	0,3295	0,4423	0,5854	0,7730	1,0296	1,4017
95	0	0,0567	0,1247	0,2079	0,3119	0,4458	0,6245	0,8751	1,2516	1,8813	3,1483
100	0	0,0692	0,1557	0,2669	0,4153	0,6231	0,9351	1,4558	2,4995	5,6498	769,2511

**Graf 1: Měrná vlhkost v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$**

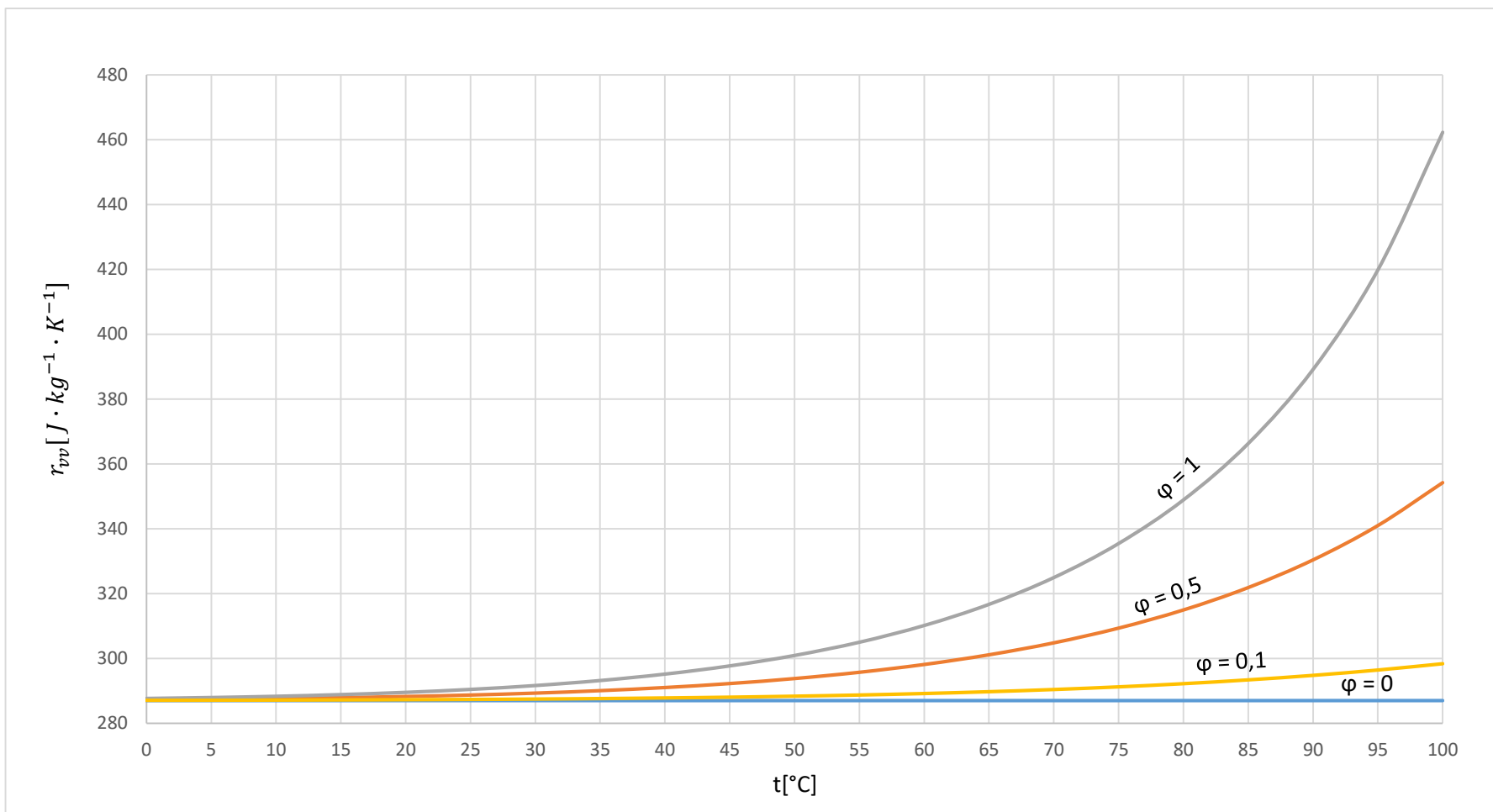


**Tabulka 2: Měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu  $r_{vv} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ ,  $p_{vv} = 101\,325 Pa$**

$t [^{\circ}C]$ \ $\varphi [1]$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
-50	287,00	287,00	287,00	287,00	287,00	287,00	287,00	287,00	287,00	287,00	287,00
-40	287,00	287,00	287,00	287,00	287,01	287,01	287,01	287,01	287,01	287,01	287,01
-30	287,00	287,00	287,01	287,01	287,02	287,02	287,02	287,03	287,03	287,04	287,04
-20	287,00	287,01	287,02	287,03	287,04	287,06	287,07	287,08	287,09	287,10	287,11
-10	287,00	287,03	287,06	287,08	287,11	287,14	287,17	287,20	287,22	287,25	287,28
0	287,00	287,07	287,13	287,20	287,26	287,33	287,39	287,46	287,53	287,59	287,66
5	287,00	287,09	287,19	287,28	287,38	287,47	287,56	287,66	287,75	287,85	287,94
10	287,00	287,13	287,26	287,40	287,53	287,66	287,79	287,93	288,06	288,19	288,33
15	287,00	287,18	287,37	287,55	287,73	287,92	288,10	288,29	288,47	288,66	288,84
20	287,00	287,25	287,50	287,76	288,01	288,26	288,52	288,77	289,02	289,28	289,54
25	287,00	287,34	287,68	288,03	288,37	288,71	289,06	289,40	289,75	290,10	290,45
30	287,00	287,46	287,92	288,38	288,84	289,30	289,76	290,23	290,70	291,17	291,64
35	287,00	287,61	288,21	288,83	289,44	290,06	290,67	291,30	291,92	292,55	293,18
40	287,00	287,80	288,60	289,40	290,21	291,02	291,84	292,66	293,49	294,32	295,16
45	287,00	288,03	289,08	290,13	291,18	292,25	293,32	294,40	295,49	296,59	297,69
50	287,00	288,33	289,68	291,04	292,41	293,79	295,19	296,60	298,02	299,46	300,91
55	287,00	288,70	290,43	292,17	293,94	295,72	297,53	299,36	301,22	303,09	304,99
60	287,00	289,16	291,35	293,58	295,83	298,13	300,46	302,82	305,23	307,67	310,15
65	287,00	289,72	292,48	295,30	298,18	301,11	304,10	307,15	310,26	313,44	316,67
70	287,00	290,39	293,86	297,42	301,06	304,80	308,62	312,55	316,57	320,70	324,94
75	287,00	291,21	295,54	300,00	304,60	309,34	314,23	319,28	324,49	329,87	335,44
80	287,00	292,19	297,56	303,14	308,93	314,94	321,19	327,69	334,47	341,52	348,88
85	287,00	293,35	299,99	306,94	314,22	321,84	329,85	338,26	347,11	356,44	366,28
90	287,00	294,74	302,91	311,55	320,69	330,38	340,67	351,62	363,30	375,77	389,14
95	287,00	296,39	306,40	317,12	328,61	340,96	354,28	368,67	384,28	401,26	419,81
100	287,00	298,32	310,57	323,87	338,35	354,18	371,57	390,74	411,99	435,68	462,26



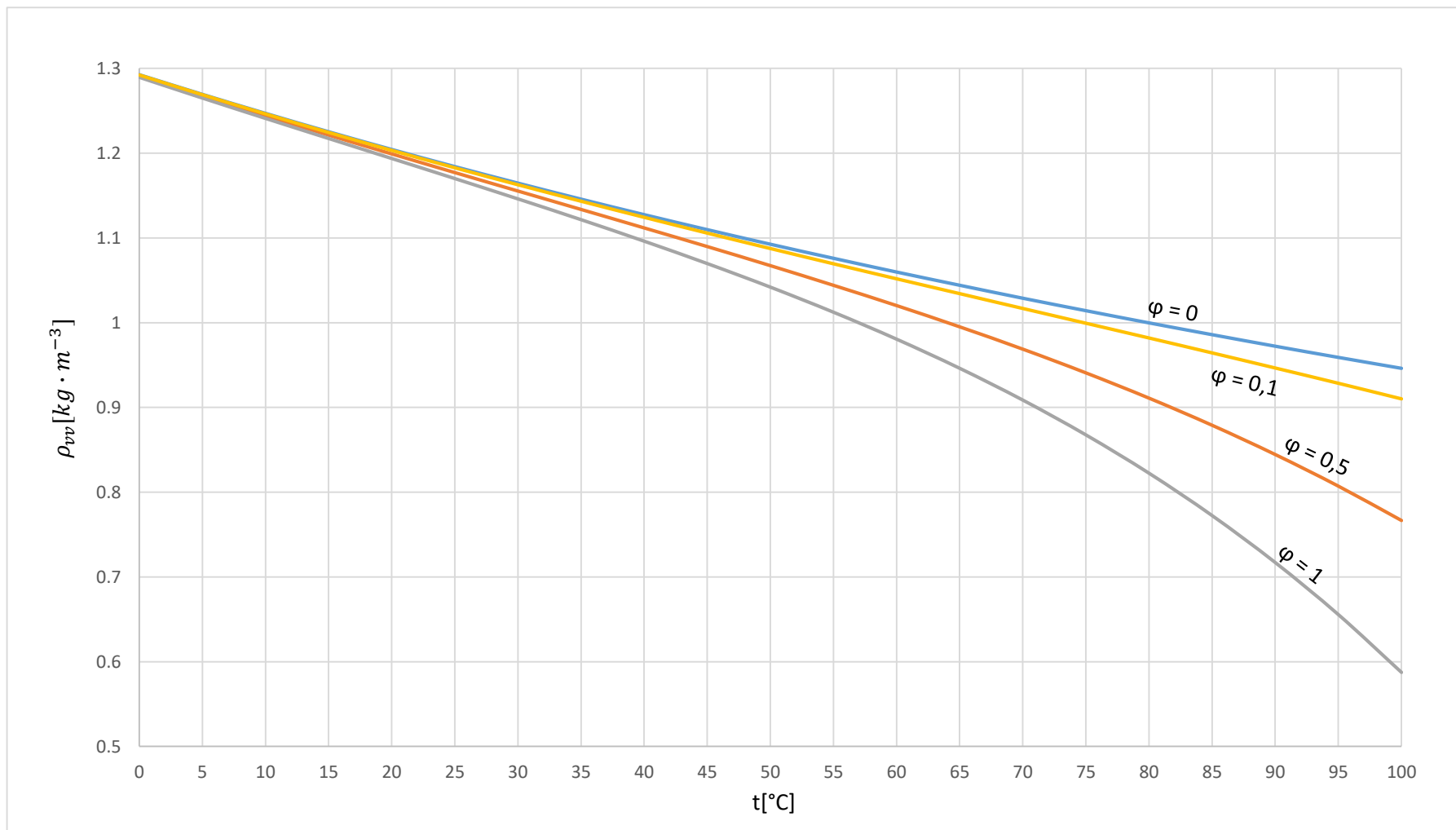
**Graf 2: Měrná plynová konstanta vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$**



**Tabulka 3: Hustota vlhkého vzduchu  $\rho_{vv}$  [  $kg \cdot m^{-3}$  ],  $p_{vv} = 101\,325\,Pa$**

$t[^\circ C]$ \ $\varphi[1]$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
-50	1,5821	1,5821	1,5821	1,5821	1,5821	1,5821	1,5821	1,5821	1,5821	1,5821	1,5821
-40	1,5143	1,5142	1,5142	1,5142	1,5142	1,5142	1,5142	1,5142	1,5142	1,5142	1,5142
-30	1,4520	1,4520	1,4519	1,4519	1,4519	1,4519	1,4519	1,4518	1,4518	1,4518	1,4518
-20	1,3946	1,3946	1,3945	1,3945	1,3944	1,3944	1,3943	1,3942	1,3942	1,3941	1,3941
-10	1,3416	1,3415	1,3414	1,3412	1,3411	1,3410	1,3408	1,3407	1,3406	1,3405	1,3403
0	1,2925	1,2922	1,2919	1,2916	1,2913	1,2910	1,2907	1,2904	1,2901	1,2898	1,2896
5	1,2693	1,2689	1,2684	1,2680	1,2676	1,2672	1,2668	1,2664	1,2660	1,2655	1,2651
10	1,2469	1,2463	1,2457	1,2451	1,2446	1,2440	1,2434	1,2428	1,2423	1,2417	1,2411
15	1,2252	1,2244	1,2237	1,2229	1,2221	1,2213	1,2205	1,2198	1,2190	1,2182	1,2174
20	1,2043	1,2033	1,2022	1,2012	1,2001	1,1991	1,1980	1,1969	1,1959	1,1948	1,1938
25	1,1841	1,1827	1,1813	1,1799	1,1785	1,1771	1,1757	1,1743	1,1729	1,1715	1,1701
30	1,1646	1,1627	1,1609	1,1590	1,1572	1,1553	1,1535	1,1516	1,1498	1,1479	1,1461
35	1,1457	1,1433	1,1409	1,1385	1,1360	1,1336	1,1312	1,1288	1,1264	1,1240	1,1216
40	1,1274	1,1243	1,1212	1,1181	1,1149	1,1118	1,1087	1,1056	1,1025	1,0994	1,0962
45	1,1097	1,1057	1,1017	1,0977	1,0938	1,0898	1,0858	1,0818	1,0778	1,0738	1,0698
50	1,0925	1,0875	1,0824	1,0774	1,0723	1,0673	1,0622	1,0572	1,0521	1,0471	1,0420
55	1,0759	1,0695	1,0632	1,0568	1,0505	1,0441	1,0378	1,0314	1,0251	1,0188	1,0124
60	1,0597	1,0518	1,0439	1,0360	1,0281	1,0202	1,0123	1,0044	0,9964	0,9885	0,9806
65	1,0441	1,0343	1,0245	1,0147	1,0049	0,9951	0,9854	0,9756	0,9658	0,9560	0,9462
70	1,0288	1,0168	1,0048	0,9928	0,9808	0,9688	0,9568	0,9448	0,9327	0,9207	0,9087
75	1,0141	0,9994	0,9848	0,9701	0,9555	0,9408	0,9262	0,9116	0,8969	0,8823	0,8676
80	0,9997	0,9820	0,9642	0,9465	0,9288	0,9110	0,8933	0,8756	0,8578	0,8401	0,8224
85	0,9858	0,9644	0,9431	0,9217	0,9004	0,8790	0,8577	0,8364	0,8150	0,7937	0,7724
90	0,9722	0,9466	0,9211	0,8956	0,8701	0,8445	0,8190	0,7935	0,7680	0,7425	0,7170
95	0,9590	0,9286	0,8983	0,8679	0,8375	0,8072	0,7769	0,7465	0,7162	0,6859	0,6556
100	0,9461	0,9102	0,8743	0,8384	0,8025	0,7667	0,7308	0,6949	0,6591	0,6232	0,5874

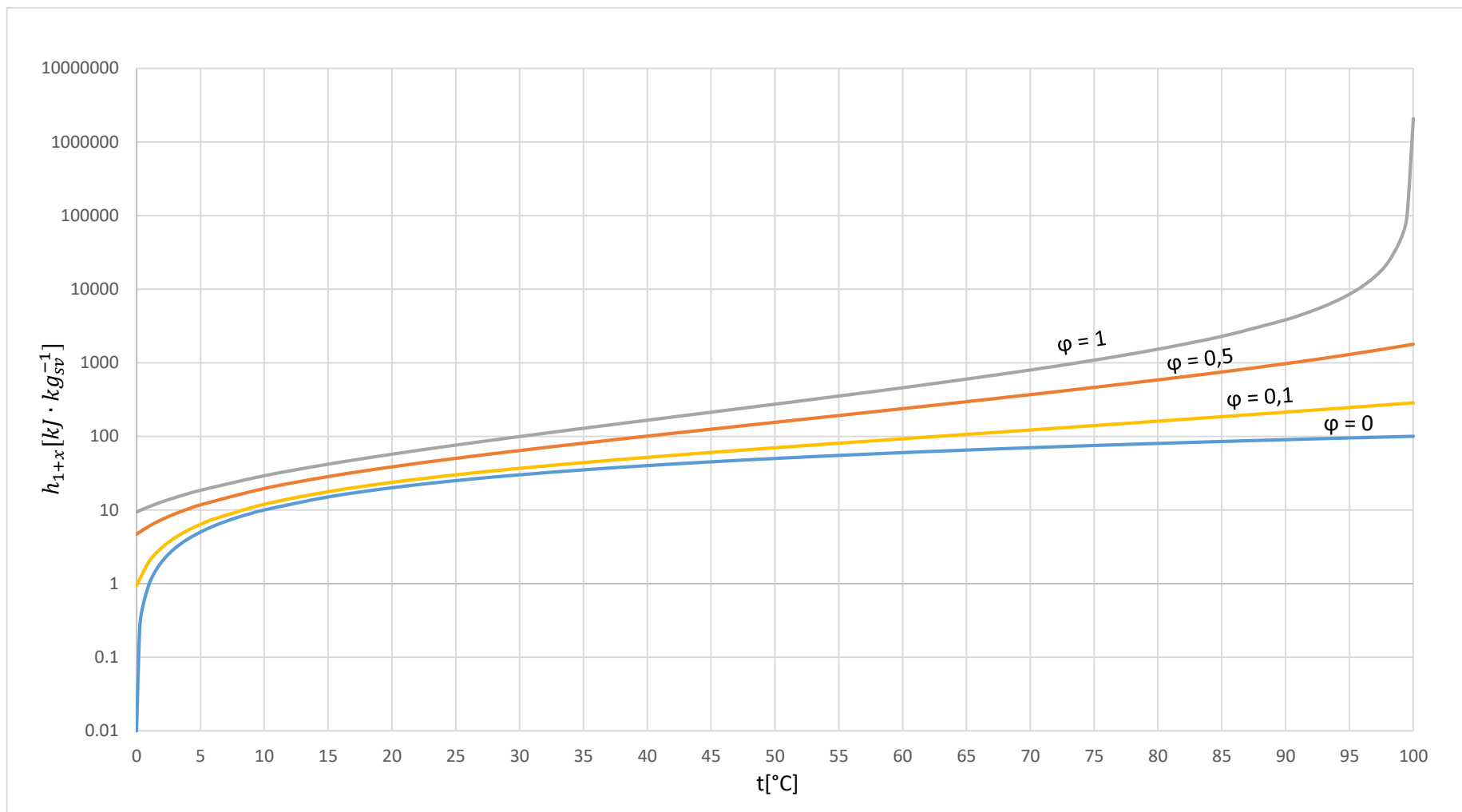
**Graf 3: Hustota vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$**



**Tabulka 4: Entalpie vlhkého vzduchu  $h_{1+x} [kJ \cdot kg_{sv}^{-1}]$ ,  $p_{vv} = 101\,325\,Pa$**

$t [^{\circ}C]$ \ $\varphi [1]$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
-50	-50,225	-50,219	-50,213	-50,208	-50,202	-50,196	-50,190	-50,184	-50,179	-50,173	-50,167
-40	-40,180	-40,161	-40,142	-40,123	-40,104	-40,084	-40,065	-40,046	-40,027	-40,008	-39,989
-30	-30,135	-30,078	-30,021	-29,964	-29,907	-29,850	-29,793	-29,736	-29,679	-29,622	-29,565
-20	-20,090	-19,934	-19,778	-19,622	-19,466	-19,309	-19,153	-18,997	-18,841	-18,684	-18,528
-10	-10,045	-9,649	-9,253	-8,857	-8,460	-8,063	-7,667	-7,269	-6,872	-6,474	-6,077
0	0	0,939	1,878	2,819	3,761	4,704	5,649	6,594	7,540	8,488	9,437
5	5,023	6,368	7,715	9,065	10,417	11,772	13,129	14,488	15,850	17,214	18,580
10	10,045	11,946	13,852	15,763	17,678	19,598	21,522	23,451	25,385	27,324	29,267
15	15,068	17,719	20,380	23,050	25,728	28,416	31,113	33,819	36,535	39,259	41,993
20	20,090	23,742	27,412	31,098	34,802	38,523	42,261	46,017	49,790	53,582	57,391
25	25,113	30,084	35,088	40,122	45,189	50,288	55,419	60,583	65,781	71,011	76,276
30	30,135	36,828	43,578	50,385	57,249	64,173	71,156	78,200	85,305	92,471	99,700
35	35,158	44,074	53,090	62,208	71,430	80,757	90,191	99,735	109,389	119,157	129,039
40	40,180	51,941	63,876	75,989	88,284	100,765	113,436	126,301	139,366	152,635	166,112
45	45,203	60,573	76,240	92,213	108,500	125,111	142,056	159,344	176,986	194,994	213,379
50	50,225	70,139	90,551	111,479	132,944	154,966	177,567	200,771	224,601	249,085	274,248
55	55,248	80,839	107,252	134,528	162,708	191,839	221,970	253,152	285,443	318,902	353,594
60	60,270	92,909	126,886	162,285	199,197	237,721	277,964	320,046	364,094	410,250	458,668
65	65,293	106,629	150,115	195,920	244,243	295,289	349,297	406,533	467,296	531,921	600,790
70	70,315	122,328	177,754	236,941	300,286	368,242	441,332	520,160	605,430	697,966	798,736
75	75,338	140,397	210,821	287,303	370,659	461,859	562,066	672,683	795,420	932,386	1086,200
80	80,360	161,302	250,602	349,624	460,049	583,965	724,006	883,538	106,900	1280,000	1530,500
85	85,383	185,603	298,748	427,488	575,287	746,716	947,933	1187,400	1477,300	1835,300	2288,700
90	90,405	213,976	357,419	525,944	726,762	970,139	1271,200	1653,200	2154,000	2838,900	3832,500
95	95,428	247,247	429,505	652,375	931,131	1289,800	1768,500	2439,700	3448,500	5135,300	8529,600
100	100,450	286,438	518,976	818,041	121,900	1775,700	2614,500	4014,200	6820,000	15289,000	2068200,000

**Graf 4: Entalpie vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$**

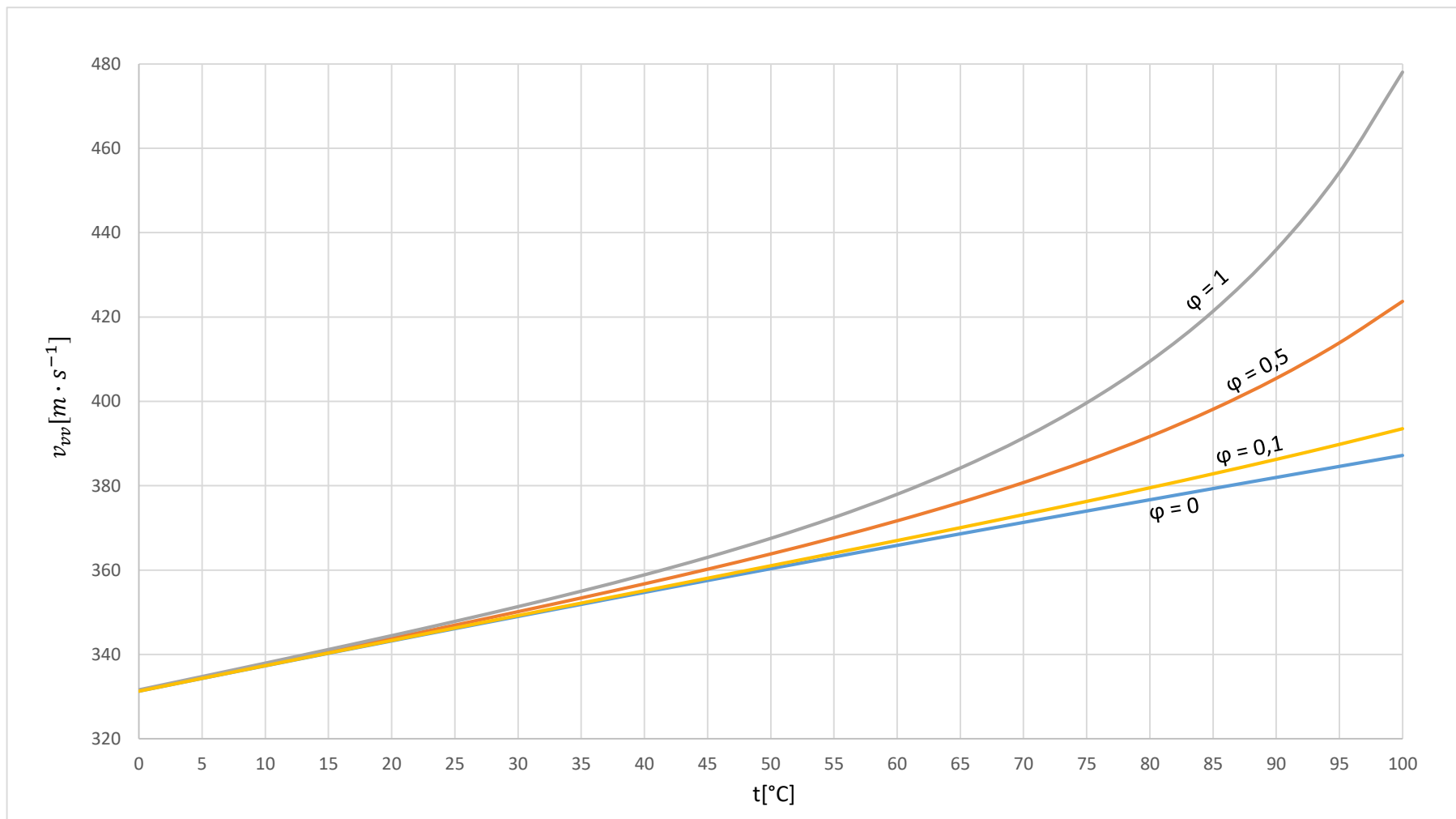


**Tabulka 5: Rychlost zvuku vlhkého vzduchu  $v_{vv}$  [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $p_{vv} = 101\,325\,Pa$**

$t$ [°C] \ $\varphi$ [1]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
-50	299,44	299,44	299,44	299,44	299,44	299,44	299,44	299,44	299,44	299,44	299,44
-40	306,07	306,07	306,07	306,07	306,07	306,07	306,08	306,08	306,08	306,08	306,08
-30	312,57	312,57	312,57	312,57	312,57	312,58	312,58	312,58	312,58	312,58	312,58
-20	318,93	318,93	318,94	318,94	318,95	318,95	318,96	318,96	318,97	318,97	318,98
-10	325,17	325,18	325,19	325,21	325,22	325,23	325,25	325,26	325,27	325,28	325,30
0	331,29	331,32	331,35	331,38	331,41	331,44	331,48	331,51	331,54	331,57	331,60
5	334,31	334,35	334,40	334,44	334,49	334,53	334,58	334,62	334,67	334,71	334,76
10	337,30	337,36	337,43	337,49	337,55	337,62	337,68	337,75	337,81	337,88	337,94
15	340,26	340,35	340,44	340,53	340,62	340,71	340,80	340,89	340,98	341,07	341,16
20	343,20	343,33	343,45	343,58	343,70	343,82	343,95	344,08	344,20	344,33	344,45
25	346,12	346,29	346,46	346,63	346,80	346,97	347,14	347,31	347,48	347,66	347,83
30	349,01	349,24	349,47	349,70	349,93	350,16	350,39	350,63	350,86	351,10	351,33
35	351,87	352,18	352,49	352,80	353,11	353,42	353,73	354,04	354,36	354,68	354,99
40	354,72	355,12	355,53	355,94	356,35	356,77	357,18	357,60	358,02	358,44	358,87
45	357,54	358,07	358,60	359,14	359,69	360,23	360,78	361,34	361,89	362,45	363,02
50	360,34	361,03	361,72	362,43	363,13	363,85	364,57	365,30	366,03	366,77	367,52
55	363,11	364,00	364,90	365,81	366,73	367,66	368,60	369,55	370,51	371,48	372,46
60	365,87	367,00	368,16	369,32	370,51	371,71	372,92	374,16	375,41	376,68	377,96
65	368,60	370,04	371,51	373,00	374,51	376,05	377,62	379,22	380,85	382,50	384,19
70	371,32	373,13	374,98	376,87	378,80	380,77	382,79	384,85	386,96	389,12	391,33
75	374,01	376,27	378,60	380,98	383,43	385,95	388,54	391,20	393,93	396,75	399,64
80	376,69	379,50	382,40	385,39	388,49	391,69	395,01	398,44	401,99	405,67	409,48
85	379,35	382,81	386,41	390,16	394,07	398,14	402,39	406,82	411,45	416,29	421,35
90	381,99	386,23	390,69	395,37	400,29	405,47	410,92	416,67	422,74	429,15	435,93
95	384,61	389,79	395,28	401,11	407,31	413,90	420,93	428,43	436,45	445,05	454,28
100	387,21	393,50	400,24	407,50	415,30	423,73	432,84	442,71	453,46	465,18	478,04

**Graf 5: Rychlost zvuku vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$**

55

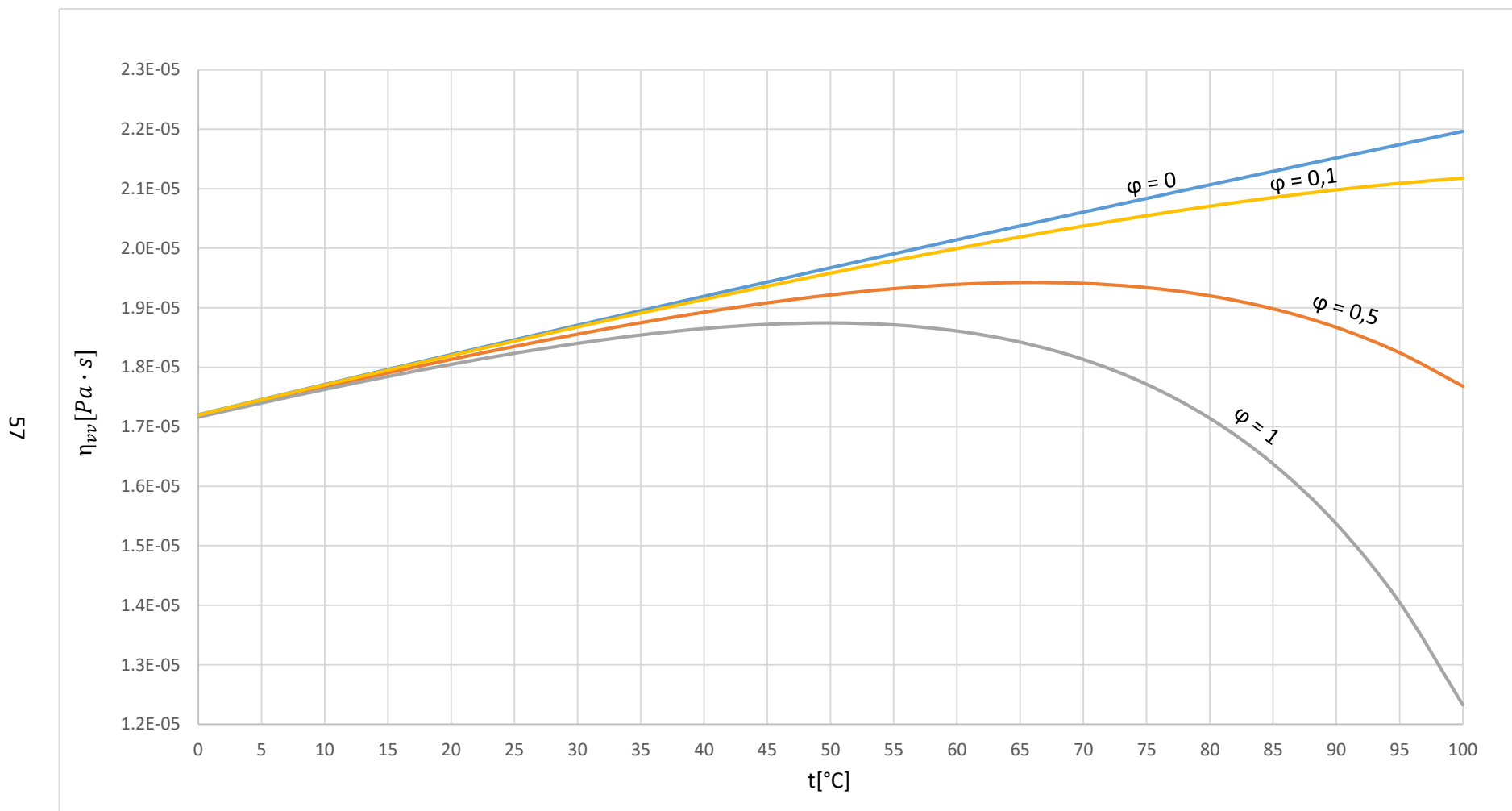


**Tabulka 6: Dynamická viskozita vlhkého vzduchu  $\eta_{vv}[Pa \cdot s]$ ,  $p_{vv} = 101\,325\,Pa$**

$t[^\circ C]$ \ $\phi[1]$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
-50	1,45E-05	1,45E-05	1,45E-05	1,45E-05	1,45E-05	1,45E-05	1,45E-05	1,45E-05	1,45E-05	1,45E-05	1,45E-05
-40	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05
-30	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05
-20	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05
-10	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,67E-05
0	1,72E-05	1,72E-05	1,72E-05	1,72E-05	1,72E-05	1,72E-05	1,72E-05	1,72E-05	1,72E-05	1,72E-05	1,72E-05
5	1,75E-05	1,75E-05	1,74E-05	1,74E-05	1,74E-05	1,74E-05	1,74E-05	1,74E-05	1,74E-05	1,74E-05	1,74E-05
10	1,77E-05	1,77E-05	1,77E-05	1,77E-05	1,77E-05	1,77E-05	1,77E-05	1,77E-05	1,76E-05	1,76E-05	1,76E-05
15	1,80E-05	1,80E-05	1,79E-05	1,79E-05	1,79E-05	1,79E-05	1,79E-05	1,79E-05	1,79E-05	1,79E-05	1,78E-05
20	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,81E-05	1,81E-05	1,81E-05	1,81E-05	1,81E-05	1,81E-05	1,80E-05
25	1,85E-05	1,84E-05	1,84E-05	1,84E-05	1,84E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,82E-05
30	1,87E-05	1,87E-05	1,86E-05	1,86E-05	1,86E-05	1,86E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,84E-05	1,84E-05
35	1,90E-05	1,89E-05	1,89E-05	1,88E-05	1,88E-05	1,87E-05	1,87E-05	1,87E-05	1,86E-05	1,86E-05	1,85E-05
40	1,92E-05	1,91E-05	1,91E-05	1,90E-05	1,90E-05	1,89E-05	1,89E-05	1,88E-05	1,88E-05	1,87E-05	1,87E-05
45	1,94E-05	1,94E-05	1,93E-05	1,92E-05	1,92E-05	1,91E-05	1,90E-05	1,89E-05	1,89E-05	1,88E-05	1,87E-05
50	1,97E-05	1,96E-05	1,95E-05	1,94E-05	1,93E-05	1,92E-05	1,91E-05	1,90E-05	1,89E-05	1,88E-05	1,87E-05
55	1,99E-05	1,98E-05	1,97E-05	1,96E-05	1,94E-05	1,93E-05	1,92E-05	1,91E-05	1,90E-05	1,88E-05	1,87E-05
60	2,01E-05	2,00E-05	1,98E-05	1,97E-05	1,95E-05	1,94E-05	1,92E-05	1,91E-05	1,89E-05	1,88E-05	1,86E-05
65	2,04E-05	2,02E-05	2,00E-05	1,98E-05	1,96E-05	1,94E-05	1,92E-05	1,90E-05	1,88E-05	1,86E-05	1,84E-05
70	2,06E-05	2,04E-05	2,01E-05	1,99E-05	1,97E-05	1,94E-05	1,92E-05	1,89E-05	1,87E-05	1,84E-05	1,81E-05
75	2,08E-05	2,05E-05	2,03E-05	2,00E-05	1,96E-05	1,93E-05	1,90E-05	1,87E-05	1,84E-05	1,81E-05	1,77E-05
80	2,11E-05	2,07E-05	2,03E-05	2,00E-05	1,96E-05	1,92E-05	1,88E-05	1,84E-05	1,80E-05	1,76E-05	1,71E-05
85	2,13E-05	2,09E-05	2,04E-05	1,99E-05	1,95E-05	1,90E-05	1,85E-05	1,80E-05	1,75E-05	1,69E-05	1,64E-05
90	2,15E-05	2,10E-05	2,04E-05	1,99E-05	1,93E-05	1,87E-05	1,80E-05	1,74E-05	1,68E-05	1,61E-05	1,54E-05
95	2,17E-05	2,11E-05	2,04E-05	1,97E-05	1,90E-05	1,82E-05	1,75E-05	1,67E-05	1,58E-05	1,50E-05	1,40E-05
100	2,20E-05	2,12E-05	2,04E-05	1,95E-05	1,86E-05	1,77E-05	1,67E-05	1,57E-05	1,46E-05	1,35E-05	1,23E-05



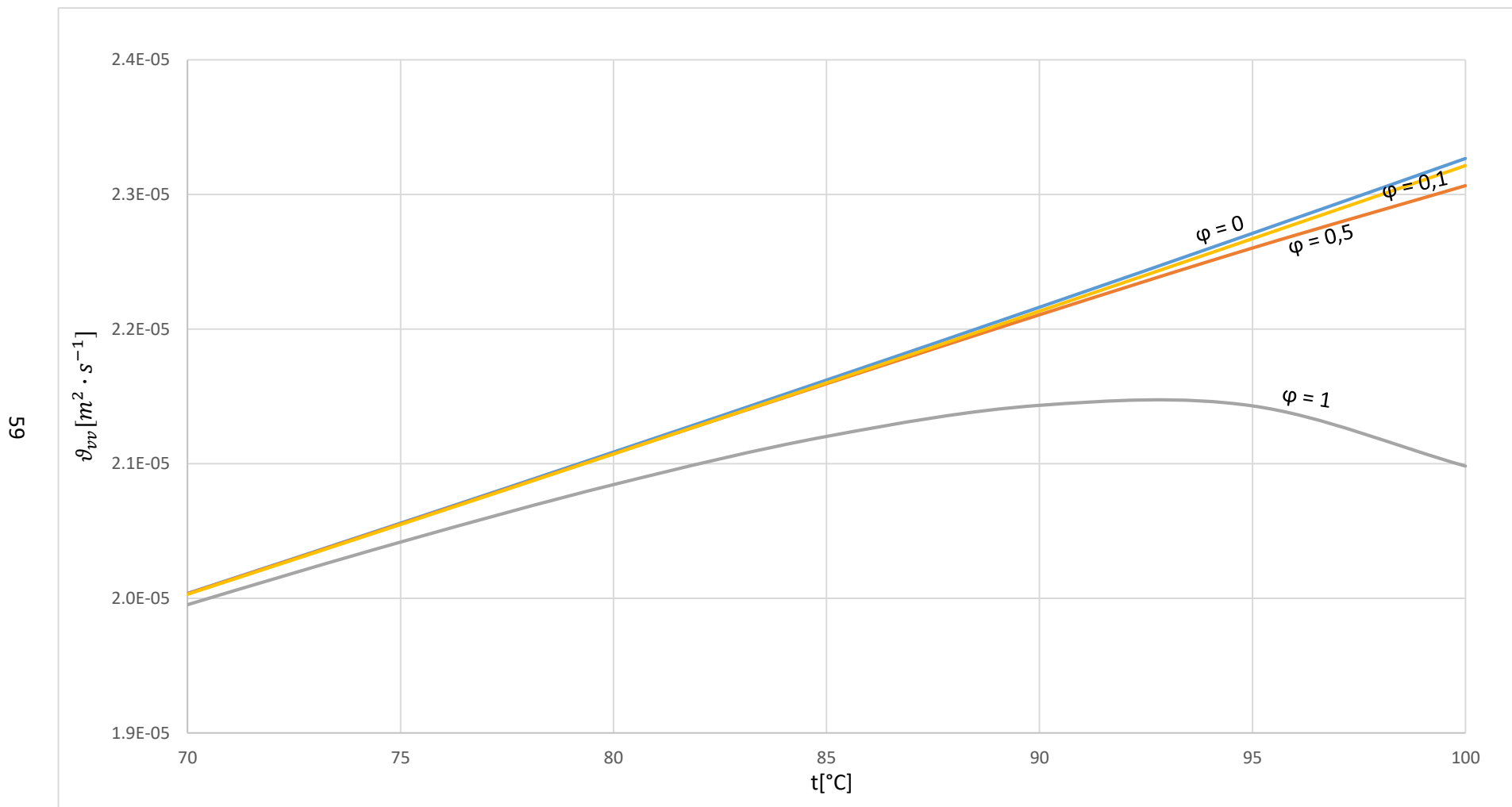
**Graf 6: Dynamická viskozita vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$**



**Tabulka 7: Kinematická viskozita vlhkého vzduchu  $\nu_{vv}[m^2 \cdot s^{-1}]$ ,  $p_{vv} = 101\,325\,Pa$**

$t[^\circ C]$ \ $\phi[1]$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
-50	9,18E-06	9,18E-06	9,18E-06	9,18E-06	9,18E-06	9,18E-06	9,18E-06	9,18E-06	9,18E-06	9,18E-06	9,18E-06
-40	9,96E-06	9,96E-06	9,96E-06	9,96E-06	9,96E-06	9,96E-06	9,96E-06	9,96E-06	9,96E-06	9,96E-06	9,96E-06
-30	1,08E-05	1,08E-05	1,08E-05	1,08E-05	1,08E-05	1,08E-05	1,08E-05	1,08E-05	1,08E-05	1,08E-05	1,08E-05
-20	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05
-10	1,24E-05	1,24E-05	1,24E-05	1,24E-05	1,24E-05	1,24E-05	1,24E-05	1,24E-05	1,24E-05	1,24E-05	1,24E-05
0	1,33E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,33E-05
5	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05
10	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05	1,42E-05
15	1,47E-05	1,47E-05	1,47E-05	1,47E-05	1,47E-05	1,47E-05	1,47E-05	1,47E-05	1,47E-05	1,47E-05	1,47E-05
20	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05
25	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05	1,56E-05
30	1,61E-05	1,61E-05	1,61E-05	1,61E-05	1,61E-05	1,61E-05	1,61E-05	1,61E-05	1,61E-05	1,61E-05	1,61E-05
35	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05
40	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05	1,70E-05
45	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05
50	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05
55	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05	1,85E-05
60	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05
65	1,95E-05	1,95E-05	1,95E-05	1,95E-05	1,95E-05	1,95E-05	1,95E-05	1,95E-05	1,95E-05	1,95E-05	1,95E-05
70	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05
75	2,06E-05	2,06E-05	2,06E-05	2,06E-05	2,06E-05	2,06E-05	2,05E-05	2,05E-05	2,05E-05	2,05E-05	2,04E-05
80	2,11E-05	2,11E-05	2,11E-05	2,11E-05	2,11E-05	2,11E-05	2,11E-05	2,10E-05	2,10E-05	2,09E-05	2,08E-05
85	2,16E-05	2,16E-05	2,16E-05	2,16E-05	2,16E-05	2,16E-05	2,16E-05	2,15E-05	2,14E-05	2,13E-05	2,12E-05
90	2,22E-05	2,22E-05	2,22E-05	2,22E-05	2,22E-05	2,21E-05	2,20E-05	2,19E-05	2,18E-05	2,16E-05	2,14E-05
95	2,27E-05	2,27E-05	2,27E-05	2,27E-05	2,27E-05	2,26E-05	2,25E-05	2,23E-05	2,21E-05	2,18E-05	2,14E-05
100	2,33E-05	2,32E-05	2,32E-05	2,32E-05	2,32E-05	2,31E-05	2,29E-05	2,26E-05	2,22E-05	2,17E-05	2,10E-05

**Graf 7: Kinematická viskozita vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$**

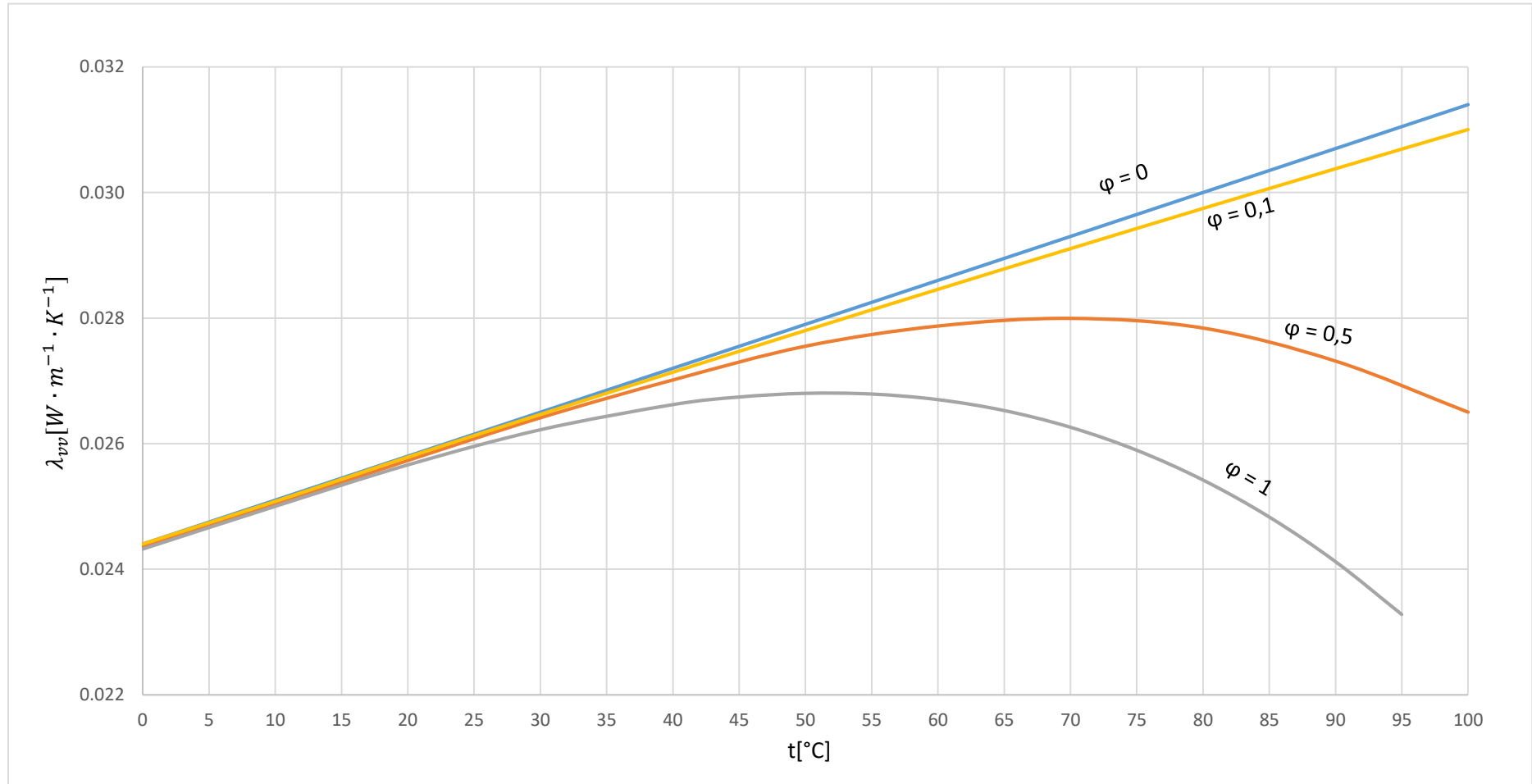


**Tabulka 8: Součinitel tepelné vodivosti vlhkého vzduchu  $\lambda_{vv}$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ],  $p_{vv} = 101\,325\,Pa$**

$t[^\circ C]$ \ $\varphi[1]$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
-50	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204
-40	0,0213	0,0213	0,0213	0,0213	0,0213	0,0213	0,0213	0,0213	0,0213	0,0213	0,0213
-30	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220
-20	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228	0,0228
-10	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236
0	0,0244	0,0244	0,0244	0,0244	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243	0,0243
5	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247	0,0247
10	0,0251	0,0251	0,0251	0,0251	0,0251	0,0251	0,0251	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250
15	0,0255	0,0255	0,0255	0,0255	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0253
20	0,0259	0,0258	0,0258	0,0258	0,0258	0,0258	0,0257	0,0257	0,0257	0,0257	0,0257
25	0,0262	0,0262	0,0262	0,0262	0,0261	0,0261	0,0261	0,0260	0,0260	0,0260	0,0260
30	0,0266	0,0266	0,0265	0,0265	0,0265	0,0264	0,0264	0,0263	0,0263	0,0263	0,0262
35	0,0270	0,0269	0,0269	0,0268	0,0268	0,0267	0,0267	0,0266	0,0266	0,0265	0,0265
40	0,0273	0,0273	0,0272	0,0271	0,0271	0,0270	0,0269	0,0269	0,0268	0,0267	0,0267
45	0,0277	0,0276	0,0275	0,0274	0,0273	0,0273	0,0272	0,0271	0,0270	0,0269	0,0268
50	0,0281	0,0279	0,0278	0,0277	0,0276	0,0275	0,0274	0,0273	0,0271	0,0270	0,0269
55	0,0284	0,0283	0,0281	0,0280	0,0278	0,0277	0,0275	0,0274	0,0272	0,0271	0,0269
60	0,0288	0,0286	0,0284	0,0282	0,0280	0,0278	0,0277	0,0275	0,0273	0,0271	0,0269
65	0,0291	0,0289	0,0287	0,0284	0,0282	0,0280	0,0277	0,0275	0,0272	0,0270	0,0268
70	0,0295	0,0292	0,0289	0,0286	0,0283	0,0280	0,0277	0,0274	0,0271	0,0268	0,0265
75	0,0298	0,0295	0,0291	0,0288	0,0284	0,0280	0,0277	0,0273	0,0269	0,0265	0,0261
80	0,0302	0,0297	0,0293	0,0289	0,0284	0,0280	0,0275	0,0270	0,0266	0,0261	0,0256
85	0,0305	0,0300	0,0295	0,0289	0,0284	0,0278	0,0273	0,0267	0,0261	0,0255	0,0250
90	0,0309	0,0302	0,0296	0,0289	0,0283	0,0276	0,0269	0,0262	0,0255	0,0249	0,0243
95	0,0312	0,0305	0,0297	0,0289	0,0281	0,0272	0,0264	0,0256	0,0249	0,0242	0,0237
100	0,0315	0,0307	0,0297	0,0288	0,0278	0,0268	0,0259	0,0250	0,0243	0,0240	0,0243

**Graf 8: Součinitel tepelné vodivosti vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$**

61



**Tabulka 9: Součinitel teplotní vodivosti vlhkého vzduchu  $\alpha_{vv}[m^2 \cdot s^{-1}]$ ,  $p_{vv} = 101\,325\,Pa$**

$t[^\circ C]$ \ $\phi[1]$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
-50	1,29E-05	1,29E-05	1,29E-05	1,29E-05	1,29E-05	1,29E-05	1,29E-05	1,29E-05	1,29E-05	1,29E-05	1,29E-05
-40	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05
-30	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05	1,51E-05
-20	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05
-10	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05	1,75E-05
0	1,88E-05	1,88E-05	1,88E-05	1,88E-05	1,87E-05	1,87E-05	1,87E-05	1,87E-05	1,87E-05	1,87E-05	1,87E-05
5	1,94E-05	1,94E-05	1,94E-05	1,94E-05	1,94E-05	1,94E-05	1,94E-05	1,93E-05	1,93E-05	1,93E-05	1,93E-05
10	2,01E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	1,99E-05	1,99E-05
15	2,07E-05	2,07E-05	2,07E-05	2,07E-05	2,06E-05	2,06E-05	2,06E-05	2,06E-05	2,06E-05	2,06E-05	2,05E-05
20	2,14E-05	2,14E-05	2,13E-05	2,13E-05	2,13E-05	2,13E-05	2,12E-05	2,12E-05	2,12E-05	2,12E-05	2,11E-05
25	2,21E-05	2,20E-05	2,20E-05	2,20E-05	2,19E-05	2,19E-05	2,18E-05	2,18E-05	2,18E-05	2,17E-05	2,17E-05
30	2,27E-05	2,27E-05	2,26E-05	2,26E-05	2,25E-05	2,25E-05	2,25E-05	2,24E-05	2,24E-05	2,23E-05	2,23E-05
35	2,34E-05	2,34E-05	2,33E-05	2,32E-05	2,32E-05	2,31E-05	2,30E-05	2,30E-05	2,29E-05	2,28E-05	2,28E-05
40	2,41E-05	2,40E-05	2,40E-05	2,39E-05	2,38E-05	2,37E-05	2,36E-05	2,35E-05	2,34E-05	2,33E-05	2,33E-05
45	2,48E-05	2,47E-05	2,46E-05	2,45E-05	2,44E-05	2,43E-05	2,41E-05	2,40E-05	2,39E-05	2,38E-05	2,37E-05
50	2,56E-05	2,54E-05	2,53E-05	2,51E-05	2,50E-05	2,48E-05	2,46E-05	2,45E-05	2,43E-05	2,42E-05	2,40E-05
55	2,63E-05	2,61E-05	2,59E-05	2,57E-05	2,55E-05	2,53E-05	2,51E-05	2,49E-05	2,47E-05	2,45E-05	2,43E-05
60	2,70E-05	2,68E-05	2,65E-05	2,63E-05	2,60E-05	2,57E-05	2,55E-05	2,52E-05	2,50E-05	2,47E-05	2,45E-05
65	2,78E-05	2,74E-05	2,71E-05	2,68E-05	2,65E-05	2,61E-05	2,58E-05	2,55E-05	2,52E-05	2,48E-05	2,45E-05
70	2,85E-05	2,81E-05	2,77E-05	2,73E-05	2,69E-05	2,65E-05	2,60E-05	2,56E-05	2,52E-05	2,48E-05	2,44E-05
75	2,93E-05	2,88E-05	2,82E-05	2,77E-05	2,72E-05	2,67E-05	2,62E-05	2,57E-05	2,51E-05	2,46E-05	2,41E-05
80	3,00E-05	2,94E-05	2,87E-05	2,81E-05	2,75E-05	2,68E-05	2,62E-05	2,55E-05	2,49E-05	2,43E-05	2,37E-05
85	3,08E-05	3,00E-05	2,92E-05	2,84E-05	2,76E-05	2,68E-05	2,60E-05	2,53E-05	2,45E-05	2,38E-05	2,30E-05
90	3,16E-05	3,06E-05	2,96E-05	2,87E-05	2,77E-05	2,67E-05	2,58E-05	2,48E-05	2,39E-05	2,31E-05	2,23E-05
95	3,24E-05	3,12E-05	3,00E-05	2,88E-05	2,76E-05	2,65E-05	2,53E-05	2,43E-05	2,33E-05	2,24E-05	2,17E-05
100	3,32E-05	3,17E-05	3,03E-05	2,88E-05	2,74E-05	2,61E-05	2,48E-05	2,36E-05	2,26E-05	2,20E-05	2,20E-05

**Graf 9: Součinitel teplotní vodivosti vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti pro tlak  $p_{vv} = 101\,325\text{ Pa}$**

