



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Experimentální měření emisí amoniaku a metanu v chovech skotu

BAT Centrum

Fakulta Zemědělská a Technologická,

Katedra techniky a kybernetiky,

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Radim Kuneš (kunes@fzt.jcu.cz)



- Dne 5. dubna 2022 byl předložen návrh revize směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrování prevence a omezování znečištění)
- **Zrušení bodu 6.6** - Intenzivní chov drůbeže nebo prasat s prostorem pro více než:
 - **40 000** kusů drůbeže,
 - **2 000** prasat na porážku (nad 30 kg) nebo **750** prasnic.
- Ten je nahrazen kapitolou VIa – **Zvláštní ustanovení pro chov drůbeže, prasat a skotu** (články 70a – 70i.) V příloze II návrhu směrnice IED je definována příloha Ia Činnosti podle článku 70:
 - 1) Chov skotu, prasat nebo drůbeže v zařízeních o **150 nebo více DJ (dobytčí jednotka)**.
 - 2) Chov jakékoli směsice těchto zvířat: skotu, prasat nebo drůbeže, v zařízeních o velikosti nejméně 150 DJ.
- **snížení prahové hodnoty pro chovy, které spadají do působnosti směrnice IED (150 DJ) a její rozšíření o chovy skotu.**

Srovnání aktuální a navrhované prahové hodnoty podle návrhu směrnice IED

Kategorie hospodářských zvířat	Aktuální prahová hodnota (ks)	Navrhovaná prahová hodnota (ks)
Drůbež	40 000	10 700 (nosnice) 5 000 (ostatní drůbež)
Prasata na porážku (nad 30 kg)	2 000	500
Prasnice	750	300
Skot (dojnice)	0	150



- Cíle funkčního úkolu pro rok 2022:
- Rešerše dostupných metodik pro měření emisí z chovů skotu (přirozená ventilace)
- Provedení experimentálních měření NH_3 a CH_4

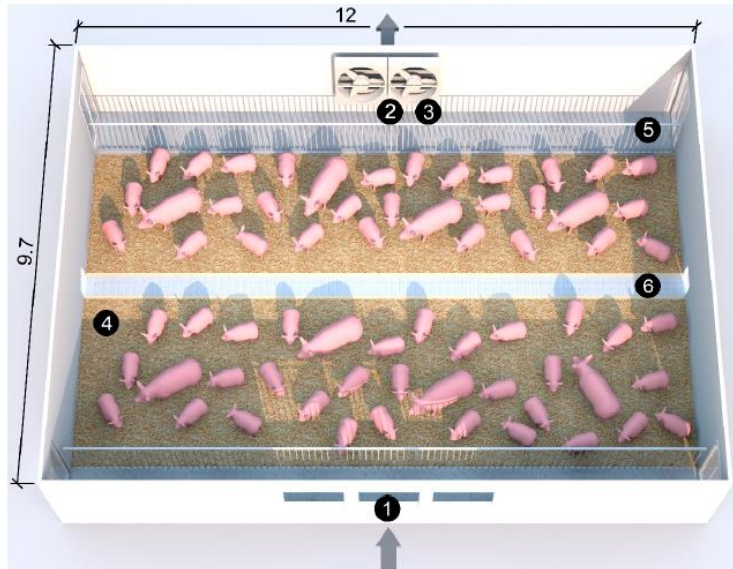
- Cíle funkčního úkolu pro rok 2023:
- Provedení experimentálních měření NH_3 a CH_4
- Tvorba matematických modelů proudění plynů ve stáji a jejím okolí



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

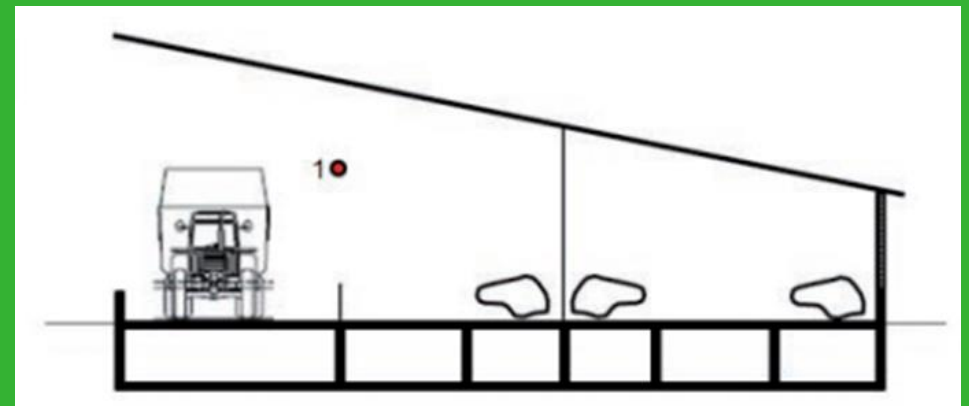
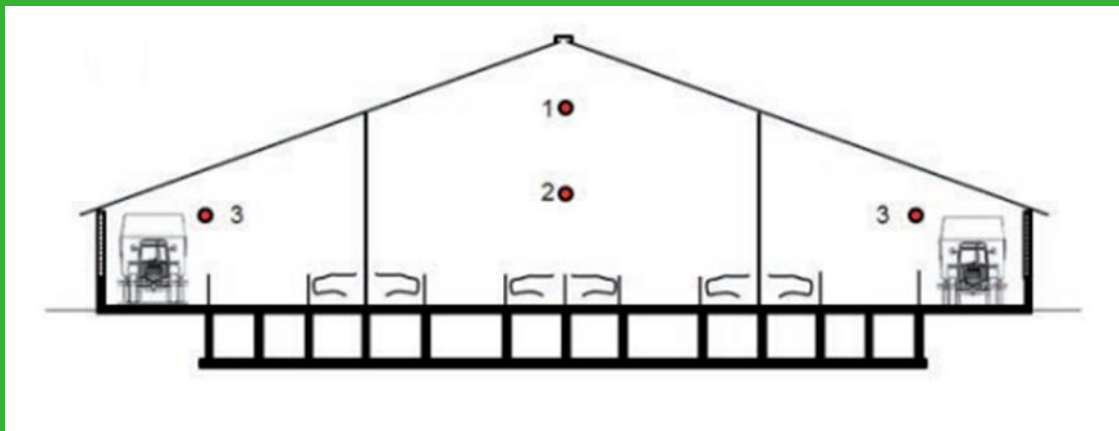
Rozdíly v přístupu monitoringu emisí





Obecná metodika pro monitoring emisí

- Není stanovena referenční metodika pro monitoring emisí z přirozeně větraných chovů
- Doporučení pro praxi:
 - 6 měření rovnoměrně během 1 roku
 - stanovení průtoku vzdušiny pomocí bilance CO_2 (vnitřní a vnější CO_2 , metabolická produkce CO_2 od zvířat)
 - rozmístění odběrových sond po 10 – 15 m v délce stáje
 - měření koncentrací uvnitř a mimo stáj, mikroklimatické podmínky, informace o zvířatech





Emisní faktory pro emise NH₃ z chovů skotu

Kategorie zvířat	Emisní faktor (kg NH ₃ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)				
	Stáj	Hnůj, podestýlka	Kejda, trus	Zapravení do půdy	Pastva
Dojnice	10,0	2,5	2,5	12,0	2,4
Telata, býci, jalovice, krávy BTPM*	6,0	1,7	2,5	6,0	1,8

Naměřené hodnoty emisí NH₃ v porovnání s emisním faktorem pro dojnice

Objekt	Číslo měření	Naměřená emise (kg NH ₃ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)	Emisní faktor (kg NH ₃ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)
Objekt 1	1	4,8 ± 0,4	10
	2	4,2 ± 0,6	
Objekt 2	1	3,4 ± 1,4	
	2	9,7 ± 1,8	
Objekt 3	1	6,4 ± 0,7	
	2	6,8 ± 2,7	
	3	6,5 ± 0,6	
Objekt 4	1	5,5 ± 0,6	
	2	6,4 ± 0,5	
Objekt 5	1	5,8 ± 0,4	
	2	6,1 ± 0,1	
	3	7,0 ± 0,4	
	4	6,6 ± 0,4	
	5	6,5 ± 0,4	

Naměřené hodnoty emisí NH₃ v porovnání s emisním faktorem pro býky 6–12 měsíců

Objekt	Číslo měření	Naměřená emise (kg NH ₃ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)	Emisní faktor (kg NH ₃ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)
Objekt 6	1	1,9 ± 0,3	6
	2	3,3 ± 0,3	
	3	1,0 ± 0,1	
	4	1,6 ± 0,2	
	5	2,1 ± 0,3	
	6	0,9 ± 0,1	
	7	0,9 ± 0,1	
	8	1,0 ± 0,1	
	9	0,8 ± 0,1	



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Naměřené hodnoty emisí CH₄ v porovnání s emisním faktorem pro dojnice

Objekt	Číslo měření	Stanovená emise (kg CH ₄ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)	Emisní faktor (kg CH ₄ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)
Objekt 1	1	62 ± 1	159,45
	2	64 ± 2	
Objekt 2	1	104 ± 10	
	2	122 ± 13	
Objekt 3	1	84 ± 5	
	2	55 ± 17	
	3	78 ± 3	
Objekt 4	1	80 ± 2	
	2	78 ± 1	
Objekt 5	1	78 ± 1	
	2	78 ± 1	
	3	78 ± 1	
	4	80 ± 1	
	5	79 ± 1	

Emisní faktory pro emise CH₄ z enterické fermentace z chovů skotu

Kategorie zvířat	EF (kg CH ₄ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)
Dojnice	159,45
Kráva BTPM*	94,78
Jalovice starší než 2 roky	51,92
Býci starší než 2 roky	72,53
Jalovice 1–2 roky	78,61
Býk 1–2 roky	81,32
Jalovice 6–12 měsíců	47,22
Býk 6–12 měsíců	57,63
Telata mladší 6 měsíců	5,52–5,57

Naměřené hodnoty emisí CH₄ v porovnání s emisním faktorem pro býky 6–12 měsíců

Objekt	Číslo měření	Stanovená emise (kg CH ₄ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)	Emisní faktor (kg CH ₄ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)
Objekt 6	1	26 ± 1	57,63
	2	30 ± 1	
	3	27 ± 0	
	4	29 ± 0	
	5	31 ± 0	
	6	24 ± 1	
	7	22 ± 0	
	8	22 ± 0	
	9	25 ± 0	



Emisní faktory pro emise NH₃ z chovů skotu

Kategorie zvířat	Emisní faktor (kg NH ₃ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)				
	Stáj	Hnůj, podestýlka	Kejda, trus	Zapravení do půdy	Pastva
Dojnice	10,0	2,5	2,5	12,0	2,4

Aktualizované emisní faktory pro emise NH₃ z chovů skotu

Kategorie zvířat	Emisní faktor (kg NH ₃ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)				
	Stáj	Hnůj, podestýlka	Kejda, trus	Zapravení do půdy	Pastva
Dojnice	11,9	2,5	2,5	6,9	2,4

Naměřené hodnoty emisí NH₃ v porovnání s emisním faktorem pro dojnice

Objekt	Číslo měření	Naměřená emise (kg NH ₃ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)	Emisní faktor (kg NH ₃ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)
Objekt 1	1	5,4 ± 0,4	10,7*
	2	3,4 ± 0,3	
	3	2,5 ± 0,7	
	4	1,9 ± 0,3	
	5	1,2 ± 0,4	
	Průměr	2,9 ± 0,4	
Objekt 2	1	3,3 ± 0,2	11,9
	2	3,6 ± 0,3	
	3	4,4 ± 0,4	
	4	1,2 ± 0,6	
	5	2,7 ± 0,2	
	Průměr	3,04 ± 0,3	

*aut. odkliz kejdy 2x denně, snížení emisí NH₃ o 10 %



Emisní faktory pro emise CH₄ z enterické fermentace z chovů skotu

Kategorie zvířat	EF (kg CH ₄ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)
Dojnice	159,45

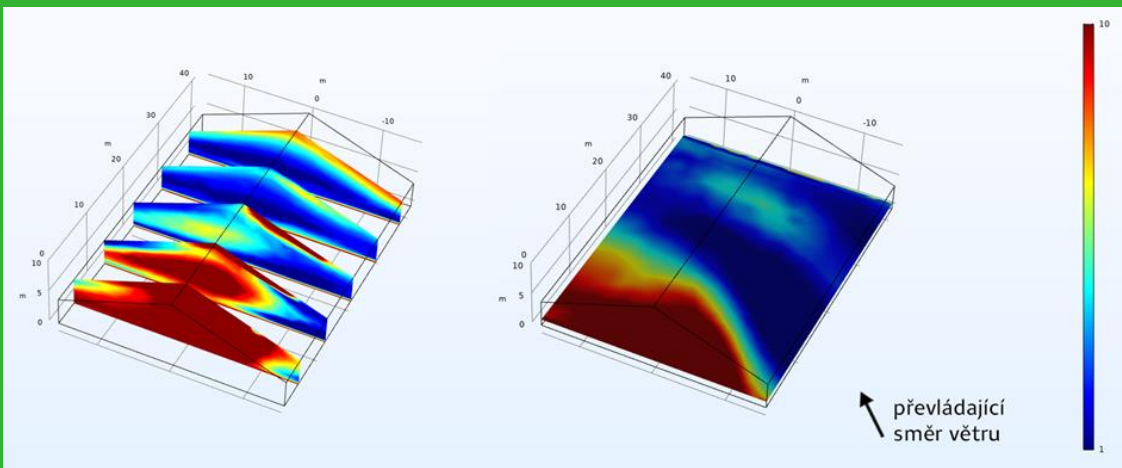
Naměřené hodnoty emisí CH₄ v porovnání s emisním faktorem pro dojnice

Objekt	Číslo měření	Naměřená emise (kg CH ₄ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)	Emisní faktor (kg CH ₄ · ks ⁻¹ · rok ⁻¹)
Objekt 1	1	80 ± 1	159,45
	2	74 ± 1	
	3	59 ± 6	
	4	68 ± 2	
	5	57 ± 3	
	Průměr	68 ± 3	
Objekt 2	1	72 ± 2	
	2	73 ± 1	
	3	55 ± 2	
	4	46 ± 4	
	5	62 ± 1	
	Průměr	63 ± 2	



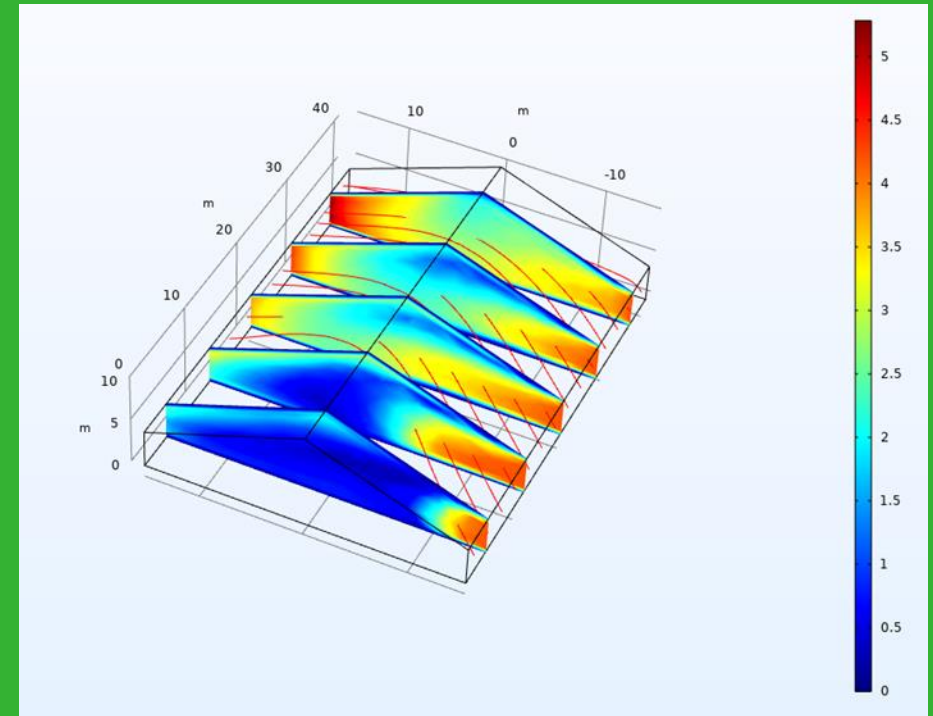
Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice



Difuze částic amoniaku při proudění vzduchu o rychlosti $9,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Matematický model proudění emisí



Simulace proudění vzduchu uvnitř chovu skotu (vstupní rychlost proudění byla nastavena na $4,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)



4 Matematický model

4.1 Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics je výkonný softwarový nástroj, který poskytuje řešení pro modelování a simulaci mocha vědeckých a technických problémů. Tento program je vysoce flexibilní a umožňuje uživatelům vytvářet přesné matematické modely, které odpovídají reálným podmínkám.

S využitím Comsol Multiphysics lze provádět různé simulace a získat tak přesný a detailní pohled na zkoumaný problém.

Základní matematický model řešený v rámci zakázky je zaměřen na simulaci proudění sledovaných plynů. Nástroje programu umožňují vytvořit 3D modely prostředí ustájení skotu, včetně stěn, oken, stropu a podlahy. Dále lze přidat modely skotu, které zahrnují jejich tělesné rozměry, tepelnou produkci a produkci amoniaku.

Na základě výsledků matematických modelů lze identifikovat potenciální problémy, jako je například špatná ventilace nebo vysoká koncentrace amoniaku v oblasti ustájení zvířat, a navrhnout účinná opatření pro zvýšení pohodlí a zdraví skotu.

4.2 Rovnice popisující proudění plynu

Stav proudění je popsán rozložením hustoty $\rho(x, t)$ a rychlosti $\mathbf{u}(x, t)$ proudící tekutiny v prostoru a čase. Protože hledáme čtyři skalární veličiny (hustotu a tři složky vektoru rychlosti), je nutné řešit čtyři skalární rovnice. Jsou jimi rovnice kontinuity (skalární) a rovnice Navierova-Stokesova (vektorová).

Rovnice kontinuity Vyjadřuje zákon zachování hmotnosti, $m = \text{konst.}$ V lokální formulaci pro kontinuum je vyjádřena ve formě parciální diferenciální rovnice

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0. \quad (5.1)$$

Navierova-Stokesova rovnice představuje Newtonův pohybový zákon $m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{F}$, formulovaný lokálně pro spojitá prostředí. Nejobecnější tvar tohoto zákona je

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = \mathbf{f}^*,$$

kde \mathbf{f}^* je efektivní hustota síly, jež v sobě zahrnuje hustotu objemové síly \mathbf{f} , např. gravitační síly $\mathbf{f} = \rho \mathbf{g}$, a příspěvek plošných sil \mathbf{f}_{pl} , jenž je vyjádřen ve formě divergence příslušného tenzoru napětí \mathbf{T} , $\mathbf{f}_{pl} = \nabla \cdot \mathbf{T}$. Různé modely kontinua pracují s různými formami tenzoru napětí. Konkrétně pro tzv. newtonovskou tekutinu má tento tenzor tvar $\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$. Zde p je tlak, \mathbf{I} je jednotkový tenzor (jednotková matice) a μ je viskozita prostředí. Veličina $\nabla \mathbf{u}$ představuje tenzorový součin operátoru ∇ a vektoru \mathbf{u} . Ve složkovém zápisu v kartézských souřadnicích

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Po dosazení za \mathbf{T} dostáváme pohybovou rovnici kontinua ve formě Navierovy-Stokesovy rovnice:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{f}. \quad (5.2)$$

Poznámka 1: Soustava rovnic (5.1), (5.2) zdanlivě není úplná, chybí explicitní rovnice pro tlak $p(x, t)$. Tato chybějící rovnice je dána nepřímo jakožto podmínka řešitelnosti rovnice (5.2): Aplikací operátoru divergence na obě strany N-S rovnice obdržíme pro tlak Poissonovu rovnici.

Rovnice (5.1) a (5.2) se zjednoduší v případě ustáleného a nestlačitelného proudění. Za těchto předpokladů dostáváme modifikovaný tvar rovnic (5.1') a (5.2'):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (5.1')$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho \mathbf{g} \quad (5.2')$$

Poznámka 2: I proudění plynu lze v dobrém přiblížení pokládat za proudění nestlačitelné tekutiny, pokud je Machovo číslo $Ma \equiv u/c$, kde c je rychlost zvuku v daném prostředí, podstatně menší než 1. Obvykle se za přípustnou horní hranici Machova čísla bere hodnota 0,3. Předpoklad nízkého Machova čísla je v modelech obtékání stáje vzduchem velmi dobře splněn.

Pokud parametry proudění dosáhnou vysokých hodnot Reynoldsova čísla $Re = \rho u L / \mu$, přejde ustálený laminární tok do chaotického turbulentního proudění, v němž všechny veličiny vedle složky nezávislé na čase získají i složku chaotickou. Konkrétně pro rychlost píšme

$$\mathbf{u} = \langle \mathbf{u} \rangle + \mathbf{u}'. \quad (5.3')$$

Úhlové závorky zde vyjadřují časovou střední hodnotu rychlosti v daném místě, \mathbf{u}' je s časem se rychle měnící chaotická složka. Po dosazení výrazu (5.3') do N-S rovnice (5.2') a jejím dodatečným vyšetřováním podle času obdržíme modifikovanou N-S rovnici pro turbulentní proudění, obsahující střední hodnoty kvadratických součinů $\langle u'_i u'_j \rangle$ (složky Reynoldsova tenzoru napětí). Různé modely turbulentního proudění se mj. liší ve způsobu odhadu těchto středních hodnot.

4.3 Difúzní rovnice

Ve směsi dvou (a více složek) dochází k přenosu hmoty nejen konvekcí, ale i difúzí. Difúzi lze popsat pomocí veličin, vztahených k hmotnostem jednotlivých složek, nebo alternativně pomocí veličin, vztahených k jejich látkovému (molárním) množství. V případě hmotnostního popisu dvousložkového systému, např. směsi vzduchu s amoniakem, se zavádějí následující veličiny ($i = 1, 2$):

ρ_i ... hustota hmotnosti i -té složky

u_i ... rychlost i -té složky

$\rho = \rho_1 + \rho_2$... celková hustota směsi

$\omega_i = \frac{\rho_i}{\rho}$... poměrné hmotnostní zastoupení veličiny i ve směsi ($\omega_1 + \omega_2 = 1$)

$\mathbf{u} = \frac{\rho_1 \mathbf{u}_1 + \rho_2 \mathbf{u}_2}{\rho} = \omega_1 \mathbf{u}_1 + \omega_2 \mathbf{u}_2$... hmotnostní střední rychlost směsi

$\mathbf{j}_i = \rho_i(\mathbf{u}_i - \mathbf{u})$... difúzní tok veličiny i , definovaný relativně k hmotnostnímu těžšímu směsi

Difúzní tok určuje tzv. Fickův zákon

$$\mathbf{j}_i = -\rho D \nabla \omega_i \quad (5.4)$$

Člen $\nabla \omega_i$ představuje gradient koncentrace i -té složky. Difúzní koeficient D je obecně funkcí stavových proměnných (teploty, tlaku, koncentrací, ...). A. Eick tento zákon publikoval jako analogii k rovnici vedení tepla, později byl zákon odvozen z kinetické teorie plynů.

Celkový (totální) tok veličiny i je dán součtem konvektivního a difúzního členu:

$$\mathbf{j}_{tot,i} \equiv \rho_i \mathbf{u}_i = \rho_i \mathbf{u} - \rho D \nabla \omega_i.$$

Rozložení hustoty jednotlivých složek ve směsi popisuje standardně rovnice kontinuity. Konkrétně pro první složku (amoniak) máme

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_{tot,1} = r_1,$$

resp. po dosazení za celkový tok

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{u}) + \nabla \cdot (-\rho D \nabla \omega_1) = r_1 \quad (5.5)$$

Jednotlivé členy v této rovnici popisují tyto procesy:

$\frac{\partial \rho_1}{\partial t}$... rychlost, s jakou se mění v daném místě hustota složky 1

$\nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{u})$... rychlost výtoku složky 1 z jednotkového objemu, způsobeném konvekcí

$\nabla \cdot (-\rho D \nabla \omega_1)$... rychlost výtoku složky 1 z jednotkového objemu, způsobeném difúzí

r_1 ... produkce složky 1 v jednotkovém objemu za jednotku času (způsobeném např. chemickou reakcí).

Rovnice (4) se opět zjednoduší pro ustálené a nestlačitelné proudění. V případě amoniaku chemické reakce neuvažujeme, $r_1 = 0$. Další zjednodušení přináší předpoklad jeho nízké koncentrace ($\omega_1 \ll \omega_2$), kdy je proudění směsi dominantně určováno prouděním vzduchu. (V COMSOLU je pro tento případ určena aplikace „Transport of Diluted Species“.)

Poznámka 3: Především při studiu dějů, doprovázených chemickými reakcemi, je výhodnější pracovat s molárními koncentracemi. Analogicky k hmotnostním veličinám se zavádějí molární hustoty c_i , celková molární hustota směsi $c = c_1 + c_2$, molární poměrné zastoupení složek $x_i = c_i/c$, molární střední rychlost směsi $\mathbf{u}^ = x_1 \mathbf{u}_1 + x_2 \mathbf{u}_2$ a molární difúzní tok $\mathbf{j}_i^* = c_i(\mathbf{u}_i - \mathbf{u})$. Fickův zákon má tvar*

$$\mathbf{j}_i^* = -c D \nabla x_i. \quad (5.4')$$

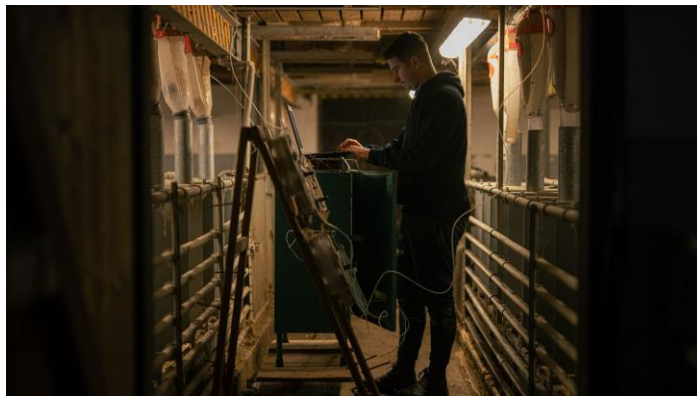
Ačkoli jednotlivé veličiny v této formulaci jsou jinak definovány, koeficient difúze D zůstává stejný jako v rovnici (5.4).



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice
University of South Bohemia
in České Budějovice

ODBORNÁ ČINNOST



- **BAT Centrum FZT JU**

- Funkční úkol pro rok 2023

- zajištění Technické pracovní skupiny (TPS) pro intenzivní chovy hospodářských zvířat (kategorie 6.6)
- uspořádání workshopu se zástupci MZe, MŽP, ČIŽP, chovatelů, odborných poradců
- experimentální měření emisí NH_3 a CH_4 v chovech skotu
- tvorba matematických modelů proudění plynů

- **Realizace funkčního úkolu podpořena Mze – odbor bezpečnosti potravin**



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Vyvíjíme moderní technologie, pracujeme s přírodou.

doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.
Děkan fakulty zemědělské a technologické
bartos@fzt.jcu.cz

Ing. Radim Kuneš
BAT Centrum
kunesr@fzt.jcu.cz