

Přestup tepla mezi plynem a kapalinou ve dvoufázových kontaktořech

(Heat transfer between gas and liquid in two-phase contactors)

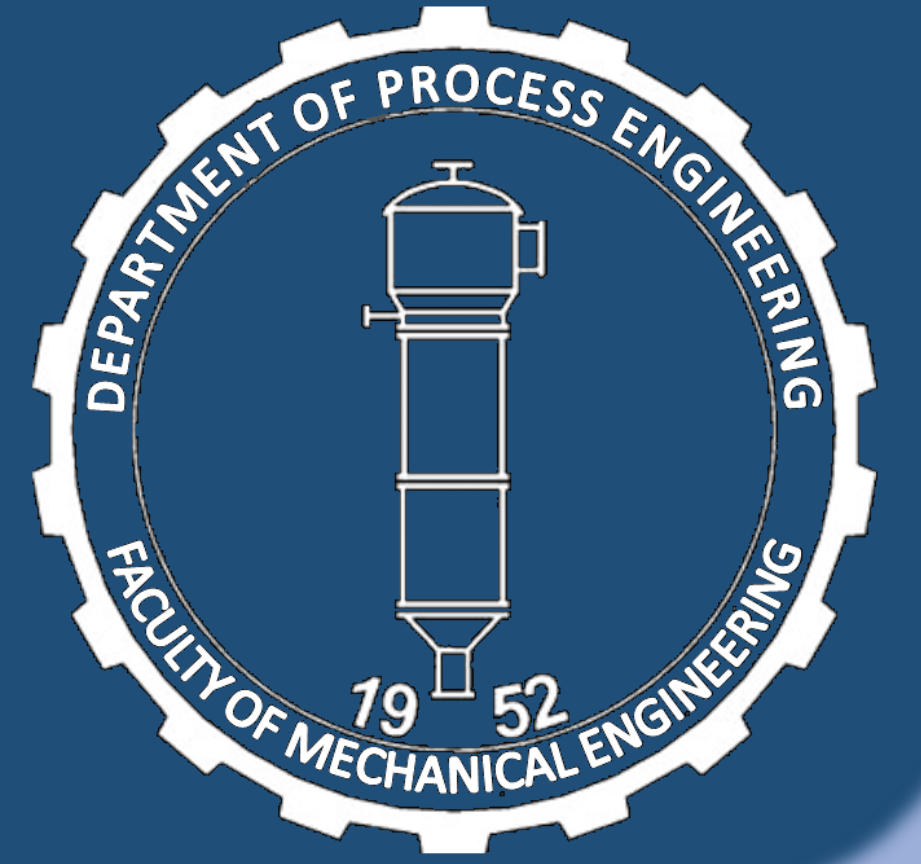


FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6

Ing. Martin Žiřka

České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní,



Úvod

Dizertační práce obsahuje:

1. Podrobnou rešerši se zaměřením na hydrodynamiku a přenos tepla v probublávané vrstvě.
2. Teoretické odvození součinitele přestupu tepla mezi bublinami plynu a kapalinou.
3. Experimentální a výpočtové stanovení zádrže a součinitele přestupu tepla mezi plynem a kapalinou v modelovém zařízení pro zvolené podmínky dle provedené rešerše.
4. Vzájemné porovnání výsledků získaných z výpočtových vztahů a hodnot experimentálně zjištěných pro zadaný případ.

Provedená rešerše

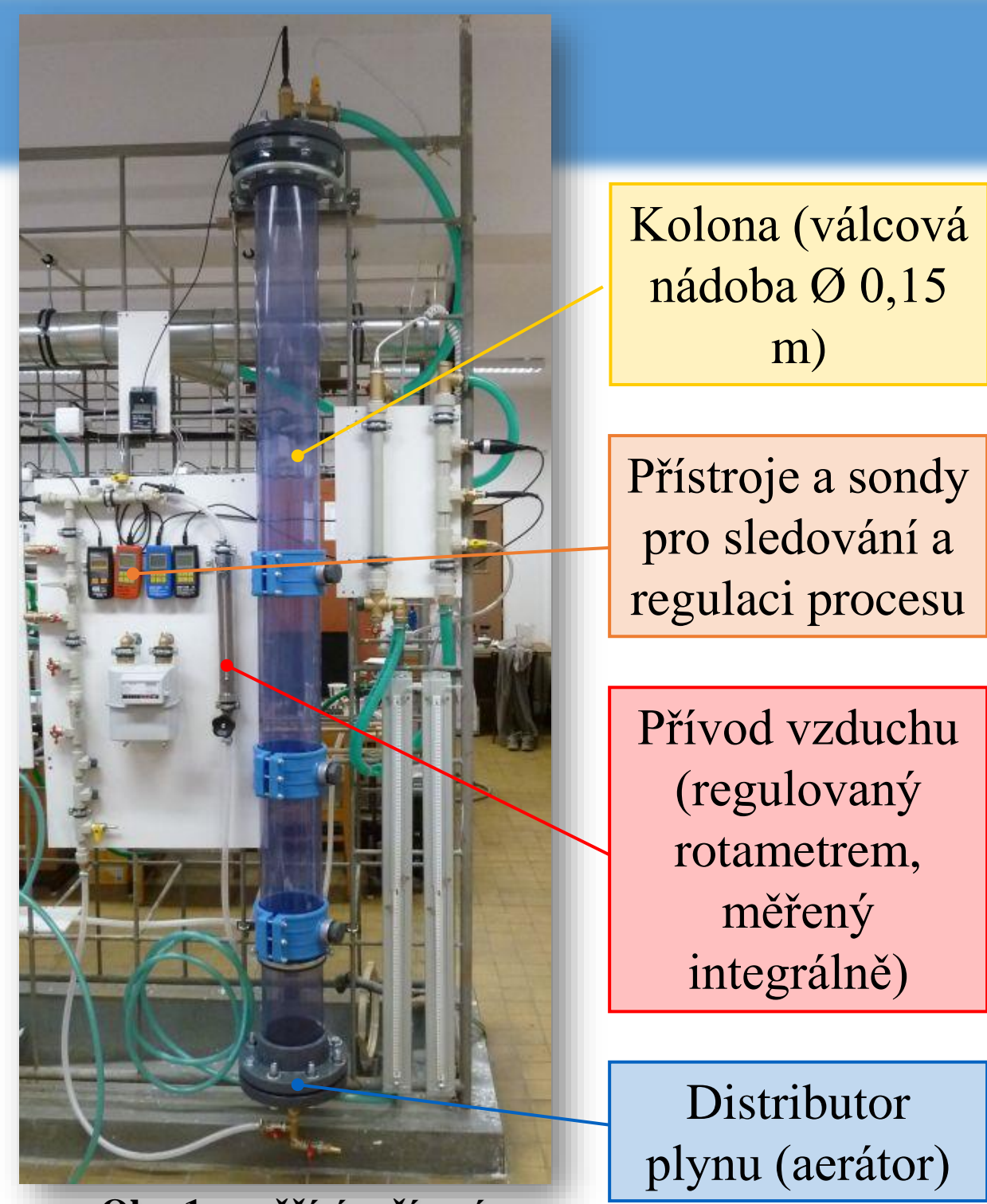
1. Byla provedena rozsáhlá kritická rešerše. Přestupu tepla v probublávaných kolonách se věnuje mnoho autorů, avšak autoři se převážně zaměřují na přestup hmoty mezi plynem a kapalinou, kde je kontrolním mechanismem přestup hmoty na straně kapaliny a tvorba mezifázové plochy.
2. Přestupem tepla mezi plynnou disperzí a stěnou kolony nebo vestavbami se věnuje více než 20 autorů. Výsledky těchto prací nejsou převoditelné na systém, kde dochází k přestupu tepla mezi bublinou plynu a kapalinou.
3. Přestupem tepla mezi bublinami plynu a kapalinou se zabývaly pouze dvě práce (Guy a kol. [1] a Uysal a kol. [2]) a v současné době byla publikována práce třetí (Panicker a Fox [3]) s CFD modelem. Tyto práce se zabývaly výpočtem kolony při současném sdílení přestupu tepla a hmoty a aplikací odvozených výpočtových vztahů pro vyhodnocení experimentů. Vlivem charakteristických parametrů na hodnotu objemového součinitele přestupu tepla ve formě rozměrových rovnic, či bezrozměrných kritériálních vztahů se autoři nezabývali.
4. Rešerše ukázala, že výsledky měření i teoretické výsledky stanovení velikosti bublin, zádrže, specifického povrchu a součinitelů přestupu tepla a hmoty získané jednotlivými autory se navzájem značně liší, a to zřejmě především v důsledku chyb měření a společného vyhodnocení experimentů v různých hydrodynamických režimech i režimech tvorby bublin, či nedokonalého respektování vlivu některých parametrů.

Cíle práce

1. Navrhnout a postavit experimentální zařízení umožňující experimentální stanovení objemového součinitele přestupu tepla pro různé provozní a fyzikální parametry.
2. Odvodit výpočtový algoritmus pro vyhodnocení objemového součinitele přestupu tepla, z provedených měření.
3. Pro systém (pitná voda – vzduch) provést sérii měření pro dva různé distributory plynu, různé výšky kapaliny, různé zádrže a pro zvyšující se průtok plynu a tím i mimovrstvové rychlosti.
4. Porovnat získané teoretické i experimentální výsledky s výsledky publikovanými v literatuře a porovnat teoreticky odvozené výsledky s vlastními experimenty.
5. Navrhnout výpočtové vztahy pro projekční výpočty přestupu tepla v probublávaných kolonách, umožňující inženýrský návrh kolon včetně stanovení teplot všech proudů vstupujících a vystupujících z/do kolony.
6. Ověřit možnost výpočtu výměny tepla mezi bublinou a kapalinou na základě současné teorie simultánního přestupu tepla a hmoty (vypařování kapaliny do prostoru bubliny), využívající t.zv. Ackermanův vztah. K tomu je třeba stanovit poměr koeficientů tepla a hmoty, α/β v závislosti na Lewisově čísle.

Měřicí zařízení

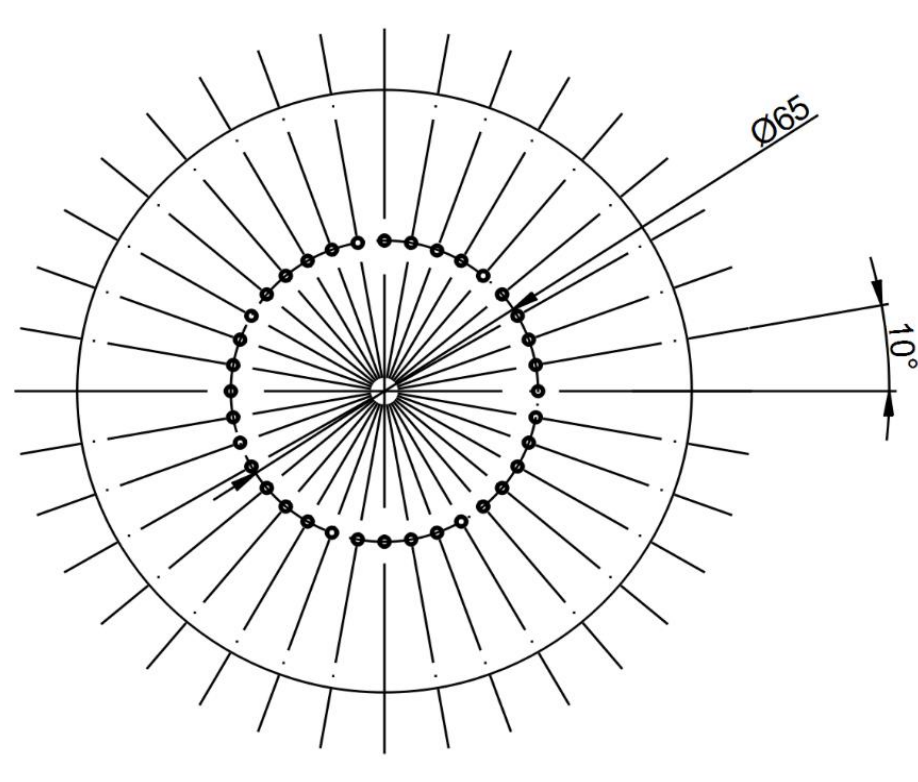
1. Provedené experimenty
 - Výška kapaliny - 0,5 m; 0,6 m; 0,85 m and 0,95 m
 - Průtok plynu - od 0,72 m³/h do 2,16 m³/h
 - Mimovrstvová rychlost plynu od 0,01 m/s do 0,1 m/s
2. Měřicí zařízení (obr. 1)
 - Kolona (válcová nádoba).
 - Probublávaná vrstva je vidět na obr. 2.
 - Přístroje a sondy pro sledování a regulaci procesu.
 - Přívod vzduchu (regulovaný rotametrem, měřený integrálně).
 - Distributor plynu (aerátor).
 - Typ SC na obr. 3.
 - Typ CC3 na obr. 4.



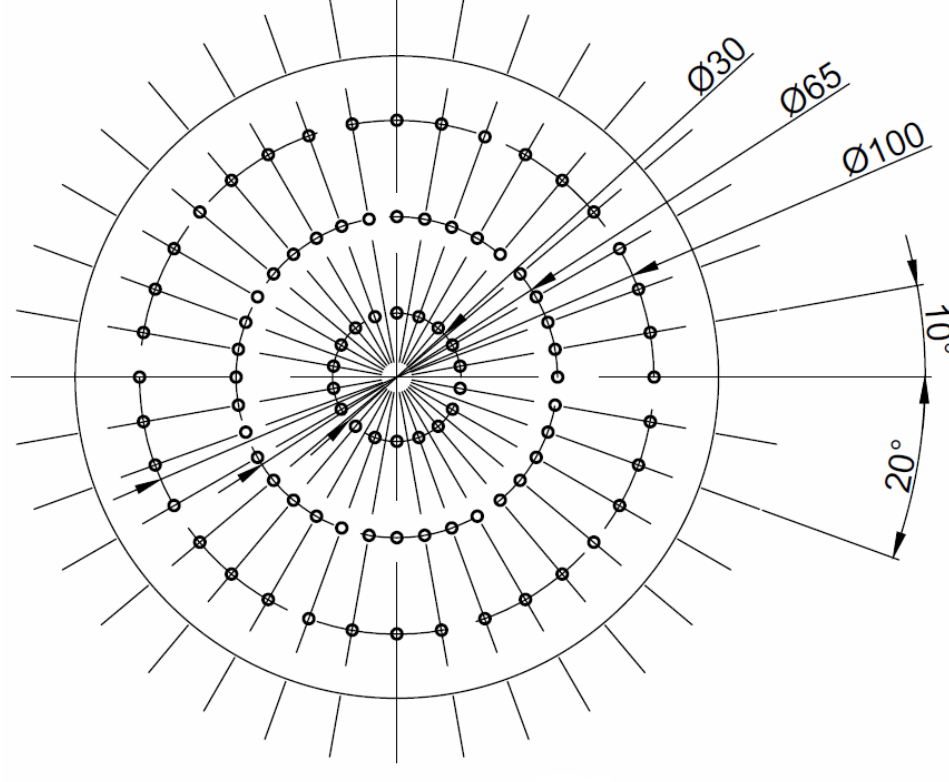
Obr. 1 – měřicí zařízení



Obr. 2 – Probublávaná vrstva.



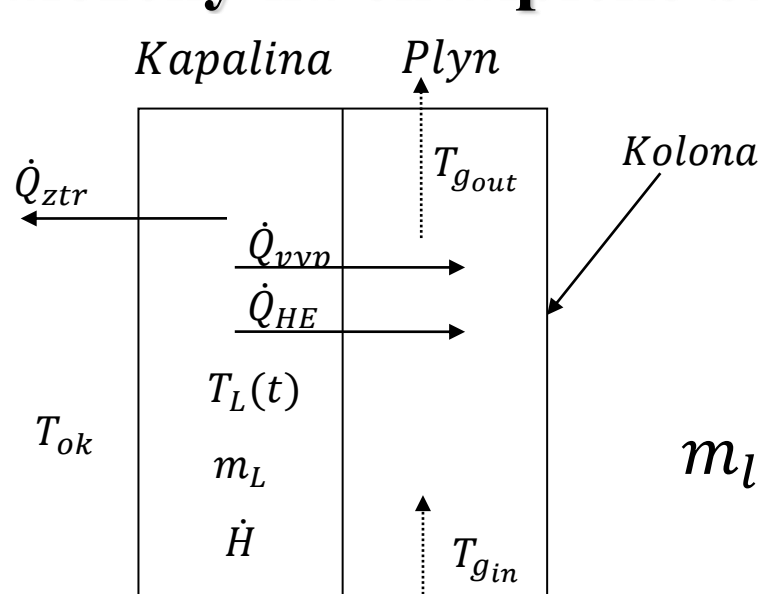
Obr. 3 – SC distributor plynu



Obr. 4 – CC3 distributor plynu

Teoretický model

Založený na entalpické bilanci kapaliny



Obr. 5 – bilanční schéma

► Entalpická bilance:

$$\dot{H} = \dot{Q}_{HE} + \dot{Q}_{evap} + \dot{Q}_{loss}$$

► Model přestupu tepla – Bilanční rovnice

$$m_l \cdot c_{pl} \cdot \frac{dT_l}{dt} = -k \cdot S_p \cdot (T_l - T_{surr}) - \dot{m}_{evap} \cdot \Delta h^{evap} - \alpha \cdot S_b \cdot (T_l - T_g)$$

Vlastní teoretická část

1. Posouzení přenosových mechanismů v systému kapalina-plyn

- Rozhodující odpor vůči přestupu tepla je na vnitřní straně povrchu bubliny. Na povrchu bubliny bude teplota rovna téměř teplotě kapaliny. Viz obr. 6.

2. Příspěvek k tvorbě bublin

- Při měření v koloně objevovaly eliptické bubliny.
- Elipsoidní bubliny při zachování stejného objemu pro malý rozptýl velikosti a/b_e od 0,51 do 2,2 nemají vliv na velikost povrchu větší než 12,5%.

3. Specifický povrch

- Specifický povrch hraje zásadní roli při stanovení součinitele přestupu tepla.
- Dle různých vztahů z literatury lze získat různé závislosti, použijeme ty nejběžnější a nejkompaktnější:

$$a \sim u_g^{1,15}$$
$$a \sim u_g^{0,9}$$

4. Objemový součinitel přestupu tepla

- Závislost objemového součinitele přestupu tepla na průměru bubliny odvozené ze závislosti stoupavé rychlosti na ekvivalentním průměru bubliny (viz obr. 7) lze vyjádřit úměrou níže. Hodnoty exponentu ω pro různé tvary bubliny jsou uvedeny v tabulce 1..

Tab. 1 – Zavedené koeficienty v závislosti na tvaru bubliny

| Tvar bubliny | ω |
|------------------|----------|
| sférické | 0,204 |
| elipsoidní | -0,272 |
| sférický šálkový | -0,16 |

5. Přestup tepla mezi bublinami plynu a kapalinou

- Pro provedená měření (a malé hodnoty mimovrstvové rychlosti) přibližně platí úměra:

$$\alpha a \sim u_g^{0,5}$$

6. Stanovení poměru α/β_V uvnitř bubliny

- Bylo shledáno, že v literatuře (Bedingfield a Drew [5]) uváděná rovnice $\alpha/\beta_V = C \cdot (Sc)^{0,56}$ pro přestup hmoty vně částice v systému voda – vzduch dobře vyhovuje i mým experimentům, pro sledovaný případ simultánního přenosu tepla a hmoty na vnitřní straně bubliny s vyhodnocenou hodnotou konstanty $C=0,434$ pro SC distr. plynu a $C=0,388$ pro CC3 distr. plynu.

Porovnání výsledků s literaturou

1. Porovnání s vlastním teoretickým rozбором

- Vlastní měření

$$\alpha a = 2524,2 \cdot u_g^{0,389}$$

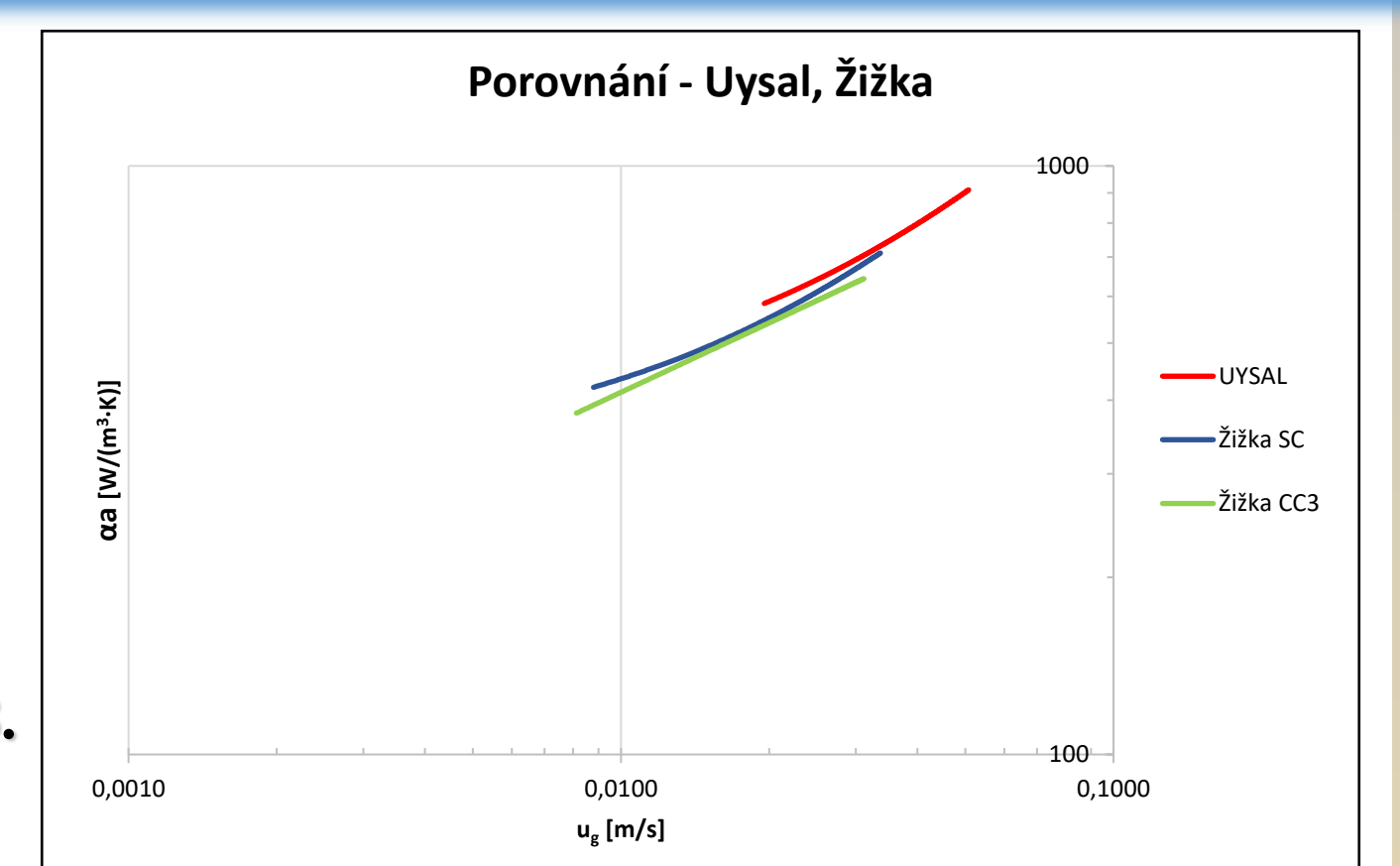
- Teoretický rozbor

$$\alpha a \sim u_g^{0,5}$$

- Mezi vlastním měřením a teoretickým rozбором je velice dobrá shoda

2. Porovnání s prací Uysal a kol. [2] je vidět na obr. 8.

Výsledky jsou ve shodě, přestože jsem došel k závěru, že práce Uysala obsahuje závažné chyby



Obr. 8 – Porovnání s prací Uysal a kol. [2]

Závěry

1. Práce umožňuje výpočet a dimenzování probublávaných kolon, ve kterých dochází k mezifázovému přestupu tepla.
2. Práce obsahuje výsledky měření pro koalescentní systém voda – vzduch. Série měření pro nekoalescentní systém byla provedena a výsledky jsou publikovány v Žiřka a kol. [VL3].
3. Ukazuje se, že provedená měření jsou ve shodě s výsledky jiných autorů a že leží v oblasti nižších mimovrstvových rychlostí plynu, kde lze závislost zádrže $\epsilon_g = f(u_g)$ linearizovat.
4. Výsledky měření objemového součinitele přestupu tepla mohly být porovnány jen s jednou prací, viz výše.
5. Ukazuje se, že distributor plynu CC3, tedy s více otvory, má oproti distributoru SC, s méně otvory, o cca 13% menší průměr bublin a dokáže tak účinněji plyn rozdělovat, což odpovídá předpokladům.
6. Vliv designu distributoru plynu na objemový součinitel přestupu plynu byl sledován nevýrazně. Naopak distributor plynu CC3, dokázal plyn více rozdispergovat a v koloně byly naměřeny menší bubliny o cca 10%.
7. Byl proveden teoretický rozbor výsledků měření. Byly odvozeny vztahy pro zádrž, specifický povrch a objemový součinitel přestupu tepla. Vztahy nejsou v rozporu s výsledky jiných autorů ani s experimenty.
8. Bylo prokázáno, že přestup tepla do bubliny je kontrolován přestupem tepla na vnitřní straně. Tento případ nebyl zatím podrobně teoreticky sledován. Moje úvahy jsem opřel o práci Colombeta a kol. [4], který prokázal, že přestup tepla uvnitř bubliny nemá pouze difúzní charakter, ale je ovlivněn i konvekcí pocházející z relativního pohybu bubliny vůči kapalině.
9. Navržená metodika vyhodnocení měření umožňuje nejen stanovení hodnoty objemového součinitele přestupu tepla, ale i stanovení poměru α/β_V na vnitřní straně bubliny. Výsledky jsou uvedeny výše.

Použitá literatura a vlastní publikace

Použitá literatura

- [1] GUY, C., F. J. CARREAU a J. PARIS. Heat and mass transfer between bubbles and a liquid. The Canadian Journal of Chemical Engineering [online]. 1992, 70(1), 55-60. DOI: 10.1002/cjce.5450700109. ISSN 0008-4034. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450700109>
- [2] UYSAL, B.Z., O.M. DOĞAN, D. UYSAL a S. DEMIRE. Heat Transfer in Bubble Columns. Strojárstvo, 52 (5), 2010, 543-548. ISSN 0562-1887. Dostupné z: <https://hrcak.srce.hr/file/99590>
- [3] PANICKER, Nitin a R.O. FOX. Computational study of the effect of homogeneous and heterogeneous bubble flows on bulk gas-liquid heat transfer. 2020. Journal of Fluids Engineering FE-20-1181-21, předběžně předloženo k review. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/342515123>. Computational study of the effect of homogeneous and heterogeneous bubble flows on bulk gas-liquid heat transfer
- [4] COLOMBET, D., D. LEGENDRE, A. COCKX a P. GUIRAUD. Mass or heat transfer inside a spherical gas bubble at low to moderate Reynolds number. International Journal of Heat and Mass Transfer [online]. 2013, 57, 1096-1105. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.069. ISSN 0017-9310. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001793101300721X>
- [5] BEDINGFIELD, Charles Hosmer a Thomas Bradford DREW. Analogy between Heat Transfer and Mass Transfer. Industrial & Engineering Chemistry [online]. 1950, 42(6), 1164-1173. ISSN 0019-7866. Dostupné z: doi:10.1021/ie50466a029.
- [6] AKITA, Kiyomi a Fumitake YOSHIDA. Bubble Size, Interfacial Area, and Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development [online]. 1974, 13(1), 84-91. DOI: 10.1021/i260049a016. ISSN 0196-4305. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/i260049a016>
- [7] BESAGNI, Giorgio, Fabio INZOLI, Giorgia DE GUIDO a Laura Annamaria PELLEGRINI. The dual effect of viscosity on bubble column hydrodynamics. Chemical Engineering Science [online]. 2017, 158, 509-538. DOI: 10.1016/j.ces.2016.11.003. ISSN 0009-2509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250916305824>
- [8] PERRY, Robert H. a Don W. GREEN. Perry's chemical engineers' handbook. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 0-07-142294-3.

Vlastní publikace

- [VL1] Žiřka, Martin. Hydrodynamika a přenos tepla v probublávané vrstvě. Diplomová práce. ČVUT v Praze, 2013.
- [VL2] Žiřka, Martin, Radek ŠULC a Pavel DITL. Heat transfer between gas and liquid in a bubble column. Chemical Engineering Transactions, 2017, 57, 1261-1266. ISSN 978-88-95608-48-8; ISSN 2283-9216. DOI: 10.3303/CET1757211. Dostupné z: <https://www.audic.it/cet/1757211.pdf>
- [VL3] Žiřka, Martin, Radek ŠULC a Pavel DITL. Heat Transfer Between Gas and Non-Coalescent Liquid in a Bubble Column. Chemical Engineering Transactions, 2019, 74, 1057-1062. ISSN 978-88-95608-71-6; ISSN 2283-9216. DOI:10.3303/CET1974177. Dostupné z: <https://www.audic.it/cet/1974177.pdf>
- [VL4] Žiřka, Martin, Pavel DITL a Radek ŠULC. Přestup tepla v mezifázových kontaktořech, Procesní technika 2014, Praha, Česká republika, 19.6.2014. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2014/index.html>
- [VL5] Žiřka, Martin, Radek ŠULC a Pavel DITL. Heat Transfer in Multiphase Contactors, 21st International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA 2014), ČSČHI, Praha, Česká republika, 23. - 27. srpen 2014, 653. ISBN: 978-1-5108-2813-1.
- [VL6] Žiřka, Martin, Radek ŠULC a Pavel DITL. Influence of aerators on heat transfer in multiphase contactors, 22nd International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA 2016), Praha, Česká republika, 27. - 31. srpen 2016, 376. ISBN: 978-1-5108-5962-3.