

30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky



22.-24.6. 2011

Špindlerův Mlýn

Jednotlivý příspěvek ze sborníku



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Experimentální a numerické modelování kavitační oblasti

Daniel BÍLÝ¹, Milada KOZUBKOVÁ²

- ¹ Ing. Daniel Bílý, Vysoká škola báňská - Technická Univerzita Ostrava, fakulta strojní, katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 17. listopadu 15/2172, 708 33, Ostrava-Poruba, danula.bily@seznam.cz
- ² prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc, Vysoká škola báňská - Technická Univerzita Ostrava, fakulta strojní, katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 17. listopadu 15/2172, 708 33, Ostrava-Poruba, milada.kozubkova@vsb.cz

Abstrakt: Článek se zabývá vývojem kavitační oblasti v zúžení Lavalovy dýzy, přitom použitými metodami jsou metody matematického a experimentálního modelování, které jsou následně mezi sebou porovnávány. Okrajové podmínky pro numerický výpočet vycházely z experimentálního měření, které proběhlo na pracovišti VŠB-TUO. Pro matematické modelování byly využity kavitační modely, které nabízí softwarové prostředí programu Ansys Fluent 13.0. Bylo testováno několik variant, které se lišily v modelovaných fázích (voda+pára popřípadě voda+pára+vzduch).

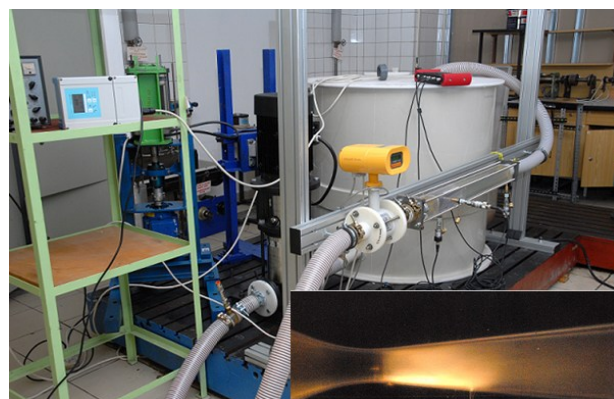
1. Úvod

Kavitace je nežádoucí jev známý dlouhou dobu. Již v roce 1754 popisuje Leonard Euler kavitační jev ve své teorii vodních turbín. Jedná se o děj, kterému je v dnešní době věnována velká pozornost, neboť je zaznamenán intenzivnější rozvoj různých hydraulických strojů a zařízení, pracujících při vysokých provozních podmínkách. *Kavitaci* nazýváme složitý jev vzniku a zániku dutin v proudící kapalině, kde účinky na materiál nazýváme *kavitačním napadením* nebo *rozrušením*. Kavitace vzniká při snížení tlaku kapaliny na tlak nasycených par, odpovídající teplotě kapaliny [1]. Z počátku, při poklesu tlaku na hodnotu tlaku nasycených par, vzniká tzv. počáteční kavitace. Kavitační oblast se periodicky zvětšuje nebo zmenšuje. Při popisu kavitačních oblastí se přihlíží k jejich tvaru, místu výskytu a stálosti. Podle tvaru jsou kavitační oblasti kapsovitě a vláknové [1]. Podle místa výskytu může být kavitační oblast uvnitř proudu kapaliny nebo v blízkosti, popřípadě na obtékané ploše.

2. Experiment pro vizualizaci kavitace

Kavitační jev byl zkoumán a testován na pracovišti VŠB-TUO na hydraulickém obvodu s Lavalovou dýzou, kde proudící kapalina je voda, viz obr 1. Nejdůležitějším prvkem je

Lavalova dýza, která je detailně znázorněna v obr 1.



Obrázek 1: Experimentální obvod (VŠB-TU Ostrava)

Vyvíjející se kavitační oblast byla pozorována v zúžení Lavalovy dýzy. Tryska byla vyrobena z průhledného materiálu Tecanat, díky kterému byla dobře viditelná kavitační oblast. Bylo možno pozorovat periodické kmitání této oblasti, hovoříme tedy o dynamickém chování kavitační oblasti. Celkem v šesti odběrných místech byly měřeny hodnoty statického tlaku a průtok byl měřen před vstupem do dýzy. Tyto snímané veličiny sloužily především jako podklad pro nastavení okrajových podmínek pro numerické modelování v softwaru Ansys Fluent 13.0 a následně byly porovnány s daty z numerického výpočtu [2].

3. Kavitační modely

Kavitace je jev, který vzniká při proudění v oblasti vysokých Reynoldsových čísel, tedy jde o turbulentní proudění. Kavitace byla modelována metodou konečných objemů s použitím dvourovnicového turbulentního modelu k-ε RNG [8]. Přitom modelovaná úloha byla časově závislá. Kavitace, díky jednotlivě modelovaným fázím vody a páry, je definována tzv. vícefázovým modelem proudění [2], [4] (viskózní model Mixture). Jednotlivě modelované fáze byly: voda, pára popřípadě další modelovanou fází může být vzduch. Softwarový program Ansys Fluent nabízí několik modelů kavitace, které jsou odlišné v přístupu řešení a zadávání vstupních parametrů. Přitom všechny kavitační modely jsou založeny na Rayleigho-Plessetově rovnici, viz rovnice (1).

$$\frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho_l} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho_l R} \quad (1)$$

kde: $p_B(t)$ je tlak v bublině, $p_\infty(t)$ je tlak v okolí bubliny, ρ_l je hustota kapaliny, ν_L je kinematická viskozita kapaliny, R je poloměr bubliny, S je plocha bubliny.

Při modelování úlohy je velmi důležité zvolit vhodné výpočtové metody a diskretizační schémata. Prvním testovaným modelem byl kavitační model **Singhal** [3]. Tento kavitační model je ve Fluentu založen na takzvaném „plně kavitačním modelu“, který vytvořil Singhal.

V Singhalově kavitačním modelu jsou zadávány tři základní parametry:

- Tlak nasycených par - hodnota tohoto tlaku se liší díky závislosti na teplotě (teplotě 20°C odpovídá tlak nasycených par 2368,7 Pa)
- Povrchové napětí - (0,0717 N·m⁻¹)
- Hmotnostní zlomek nekondenzujícího plynu - (1,5·10⁻⁸)

Další kavitační model, který nabízí software Ansys Fluent je model **Zwart-Gerber-Belamri**. Tento kavitační model vychází z předpokladu, že všechny bubliny v kapalině při kavitačním jevu mají stejnou velikost [5].

V tomto kavitačním modelu je zadáváno pět základních parametrů:

- Tlak nasycených par – (2368,7 Pa)
- Poloměr bublin – (1·10⁻⁶ m)
- Nukleační objemový zlomek – (0,0005)

- Odpařovací koeficient – (50)
- Kondenzační koeficient – (0,01)

Posledním nabízeným kavitačním modelem je model **Schneer-Sauer**. Model je kompatibilní jak s modelem směsi tak i navíc s Eulerovským vícefázovým modelem.

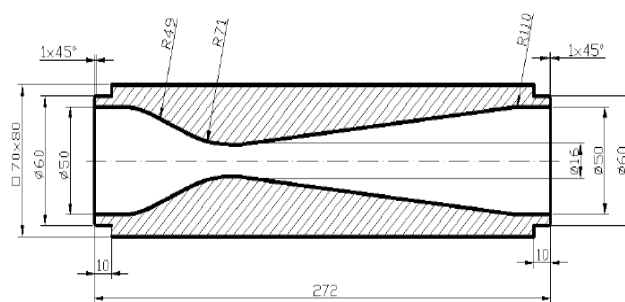
V tomto kavitačním modelu jsou zadávány pouze dva základní parametry:

- Tlak nasycených par – (2368,7 Pa)
- Počet bublin – (1·10¹³)

Modely Zwart-Gerber-Belamri a Schnerr - Sauer jsou stabilnější a tím můžeme předpokládat rychlejší konvergenci řešení. Proto uživatelská příručka tohoto softwaru ANSYS FLUENT 12.0.16 [5] doporučuje použití modelů Zwart-Gerber-Belamri a Schnerr - Sauer. Pro získání konvergentního řešení úlohy jsou velice důležitá tzv. diskretizační schémata. O tomto problému je pojednáno v literatuře [2]. V tomto článku byl využit pouze kavitační model Schneer-Sauer a to z důvodu stabilního konvergentního řešení v předchozích testovaných variantách.

4. Geometrie a okrajové podmínky

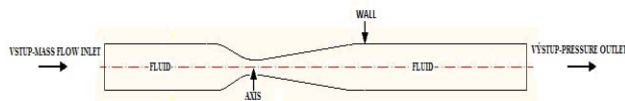
Geometrie Lavalovy dýzy je patrná na obr. 2. Úloha byla modelována jako osově symetrická z důvodu snížení počtu buněk výpočetní sítě. Přitom finální výpočetní síť měla 9600 buněk.



Obrázek 2: Geometrie Lavalovy dýzy

Všechny zmíněné kavitační modely nabízené v softwaru Ansys Fluent byly testovány na geometrii Lavalovy dýzy. Přitom u těchto variant bylo proudící médium směs vody a páry případně vzduchu. Na vstupu do Lavalovy dýzy byla nastavena průtoková podmínka (mass-flow-inlet) odpovídající průtoku 3 kg·s⁻¹, případně směs vody a vzduchu odpovídající měřené hodnotě. Na výstupu z trysky byla definována tlaková podmínka (pressure outlet)

105 000 Pa, viz. obr 3. Ostatní hranice byly definovány jako stěna (wall) a osa symetrie (axis).



Obrázek 3: Nastavení okrajových podmínek na výpočetní geometrii

Následující tabulka č.1 znázorňuje přehled testovaných variant. Vždy se jednalo o kavitační model Schneer-Sauer, kde bylo pouze měněno proudící médium. Hodnoty z numerického modelování byly následně porovnávány z experimentálními hodnotami viz. kapitola 5.

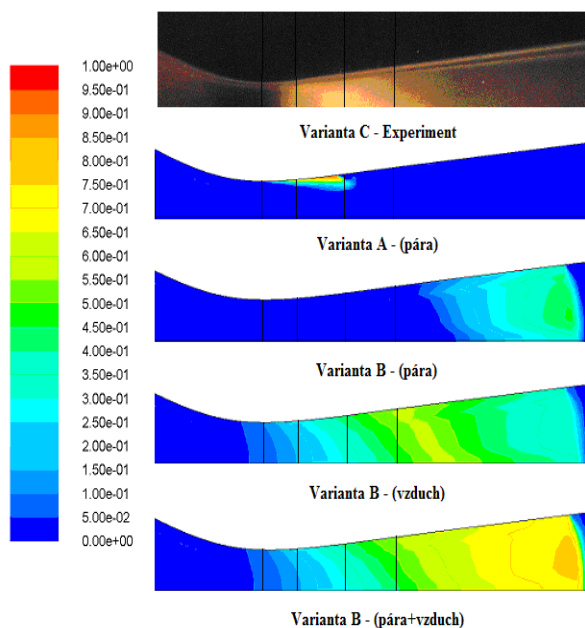
Tabulka 1: Přehled testovaných variant

Testované varianty	Kavitační model	Proudící médium
A	Schneer-Sauer	voda+pára
B	Schneer-Sauer	voda+pára+vzduch
C	Experiment	[-]

5. Izoplochy objemového zlomku páry a vzduchu

Důkazem vzniku kavitace v zúžení trysky je i oblast páry, která vznikne jen v důsledku poklesu tlaku na tlak nasycených par, viz obr. 4. Pro přehlednost je úloha zobrazena jako osově symetrická s vyznačenými odběrnými místy. Hodnoty objemového zlomku páry v zúžení trysky se u varianty A pohybovaly v rozmezí $0 \div 0,9152$, u varianty B v rozmezí $0 \div 0,4574$.

Objemový zlomek vzduchu se u varianty B v zúžení trysky pohyboval v rozmezích $0,014 \div 0,5721$. Přitom je zachováno minimum objemového zlomku vzduchu, který byl zadán v počáteční inicializaci. Toto odpovídá zhruba 2 % modelovaného objemového zlomku vzduchu z celkového množství hmotnostního průtoku, který byl zadán na vstupu do trysky. Pro zajímavost byl zřeslen dohromady na posledním snímku objemový zlomek páry a vzduchu.



Obrázek 4: Objemový zlomek páry a vzduchu u jednotlivých testovaných variant

6. Závěr

Tento článek byl zaměřen především na experimentální a numerické modelování kavitační oblasti v zúžení Lavalovy dýzy. Na vývoj a velikost kavitační oblasti má velký vliv obsah vzduchu. Okrajové podmínky byly voleny dle experimentálního měření, přitom modelovaným médiem byla směs vody, páry a vzduchu. Důležitým zjištěním při experimentálním měření bylo pozorování dynamického chování kavitační oblasti, která v průběhu času měnila svůj tvar i velikost a vykazovala periodické kmitání. O tomto dynamickém chování bylo blíže pojednáno v literatuře [2]. Při experimentálním měření byla voda delší dobu v nádrži odstátá, tedy z tohoto důvodu se ve vodě nerozpuštěný vzduch nevyskytoval a tedy kavitační oblast mohla být ovlivněna pouze rozpuštěným vzduchem. V článku jsou vyhodnocené jednotlivé izoplochy vzduchu a páry, které byly porovnávány s fotografií, která byla pořízena při experimentálním měření. Závěrem se dá říci, že varianta A se dobře shoduje s experimentem co se týče statického tlaku, viz. obr 4, kde oblast páry je mírně podhodnocena. Při uvažování obsahu vzduchu výsledky neodpovídají realitě, tedy rozpuštěný vzduch se nepřeměňuje v plynnou fázi.

7. Literatura

- [1] NOSKOJEVIČ J., A KOL.: KAVITACE V HYDRAULICÍCH STROJÍCH A ZARÍZENÍCH, 1.VYD., STNL PRAHA, 1989
- [2] KOZUBKOVA M.: MODELOVANI PROUDENI TEKUTIN FLUENT CFX, OSTRAVA: VSB-TU, 2008
- [3] SINGHAL A.K., ATHAVALE M. M., LI H.JIANG.Y: MATHEMATICAL BASIS AND VALIDATION OF THE FULL CAVITATION MODEL, JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING, 2002
- [4] KOZUBKOVA M.: MATEMATICKE MODELY KAVITACE A HYDRAULICKEHO RAZU, 1.VYD., OSTRAVA: VSB-TU, 2009
- [5] ANSYS FLUENT INC.: FLUENT 12.16 – USERS GUIDE, 2009, DOSTUPNÉ Z:
[URL: http://sp.1.vsb.cz/DOC/Fluent_12.0.16/html/ug/Main pre.htm](http://sp.1.vsb.cz/DOC/Fluent_12.0.16/html/ug/Main_pre.htm).