



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Stáž na Technische Universität Berlin, Institut für
Strömungsmechanik und Technische Akustik (ISTA),
Fachgebiet Experimentelle Strömungsmechanik**

*(Odbor experimentální mechaniky tekutin je součástí Institutu pro mechaniku
tekutin Technické univerzity v Berlíně)*

15.9. - 8.10.2014 a 16.3-17.4.2015

Vladislav Skála

červen 2015

V rámci projektu CZ.1.07/2.3.00/20.0139 „Budování excelentního vědeckého týmu pro experimentální a numerické modelování v mechanice tekutin a termodynamice“ jsem využil možnosti odcestovat na stáž na zahraničním výzkumném pracovišti. V mém případě byl tímto pracovištěm Odbor experimentální mechaniky tekutin, dříve známého jako Hermann Föttinger Institut, HFI). Odbor je součástí Institutu pro mechaniku tekutin a technickou akustiku (ISTA) Technické univerzity v Berlíně

O hostující pracovišti

Historický exkurz Ústavu mechaniky tekutin a inženýrství akustika (ISTA)

(zpracováno podle článku Von Hermann Föttinger zum Hermann-Föttinger-Institut, H.H. Fernholz und A. Leutz), zpracováno s využitím [1])

Hostující pracoviště Odbor experimentální mechaniky tekutin je součástí Institutu pro mechaniku tekutin Technické univerzity v Berlíně a nachází se v centru Berlína v areálu Technické univerzity.



Prof. Dr.-Ing. Hermann Föttinger¹



: Prof. Dr.-Ing. Rudolf Wille

Rozvoj mechaniky tekutin na Vysoké škole technické a Technická univerzita v Berlíně byl více než půl století spojen hlavně dvěma osobnostmi, mezi lety 1924 a 1945 s Hermannem Föttingerem a od dubna 1946 do roku 1973 s Rudolfem Willem.

Hermann Föttinger byl významným inženýrem a univerzitním učitelem a mimo jiné také tvůrcem hydrodynamického měniče točivého momentu a hydrodynamické spojky.

Rudolf Wille, který byl od roku 1935 spolupracovníkem Hermannem Föttingerem, od roku 1946 přednášel na TU Berlin mechaniku tekutin a v roce 1954 se stal Föttingerovým nástupcem jako vedoucí katedry mechaniky tekutin a ředitel Hermann Föttingerova institutu. Pod jeho vedení byla také v letech 1954-1956 postavena budova institutu v dnešní ulici Müller-Breslau-Str.



Hermann Föttinger se od roku 1924 stal řádným profesorem fyziky proudění Technické univerzity v Berlíně, vedl přednášky: Úvod do mechaniky tekutin obecně (Technická hydro- a aerodynamika) a zvláštní oblasti technické mechaniky tekutin.

V následujících letech vedl další přednášky, např. Mechaniku tekutin ve strojírenství a stavbě lodí, srovnávací testy odporu modelů lodí; Účinek Magnusova efektu a jeho využití pro pohon. • Hydraulické problémy (Göttingen 1924): Studie o kavitaci a korozi turbín, turbo čerpadel a vrtulí. • O všeobecné stabilitě potenciálního proudění s cirkulací a bez cirkulace (ICTAM, No. 2, Curych 1926). Vliv konečného počtu lopatek (viz. Weinig, 1935). Výpočet Kaplanovy turbíny a odstředivých čerpadel (Pantell 1933 - 1934). • Vývoj rychloběžného větrného motoru s dobrou rozbíhavostí (Conrad). • Turbopohony pro železniční vozy. Další výzkum byl směřován pracemi jeho kolegů, např. Fritz Weinig: O grafickém výpočtu poměrů v proudění a výkonost turbínového kola (1929). Fritz Gutsche: Experimentální výzkum vlastností profilu křídla a úseků vrtule a vliv na jejich konstrukci (1933). • Georg Vogelpohl: Příspěvky k výzkumu smykového tření (1936). • Ulrich Noetzel: Příspěvky k problematice měření větru, se zvláštním pojednáním o měření větrných poryvů (1939). • Rudolf Wille: Aplikace modelu procesu k objasnění netacionárního plnění a výplachu ve válci dvoudobého spalovacího motoru (1942). • Mincho Popoff: Podobnosti studie o rozprašování kapalin (1943). Dalšími řešenými tématy byl např. vývoj trysek motorů pro závod Daimler-Benz

nebo návrh hydraulického motoru pro přečerpávací elektrárny. Na základě Föttingerova patentu ve Spolupráci s Voithem (Heidenheim) byly navrženy a vyrobeny dvě Voith Föttingerovy spojky s přenášeným výkonem 35,000 hp každá, dále Föttinger pokračuje ve spolupráci s AEG kde rozvíjí hydraulické převodovky, V akademickém roce 1944/45 vedl Foettinger za asistence Hermanna přednášky: Turbostroje I a II, Projektování vodních zařízení a Turbostroje a mechaniky tekutin I až III. S koncem války a úmrtím (28/04/1945) Foettingera v důsledku válečného zranění a situaci ustává výzkum a výuka v oblasti mechaniky tekutin. Všichni akademičtí pracovníci propuštěni., cenné nástroje, dílenské vybavení a manometry byly při přesunu do Braunschweigu zadrženy a ztraceny během zmatků prvních měsíců po válce.

Wille byl členem ústředního přípravného výboru pro znovuotevření Technické univerzity v Berlíně (květen 1945-duben 1946). S otevřením Technické univerzity v Berlíně byl nově založený Hermann Föttingerův Institut, pokračovaly dva ze tří výzkumných ústavů starého Föttingerova ústavu. Výzkumný a zkušební ústav pro větrné turbíny zůstal opuštěný, protože jeho poslední vedoucí, Dipl.-Ing. E. Fitze, přijal nabídku zaměstnání v Lille.

V letech 1948-1949 je Wille činný jako člen rady British Fellow na Trinity College University of Cambridge. Na katedře inženýrství se setkal s G. K. Batchelorem, který se věnoval výzkumu turbulentního proudění. To mělo za následek rozvoj anemometrie se žhaveným drátkem i v Berlíně (O. - 66 - Wehrmann, 1955 1958). To byly, spolu s experimentálním studiem nenewtonských kapalin, problémy základního výzkumu této doby.

V prosinci 1956 Wille založil Institut pro výzkum turbulence na TU Berlin Důležitá témata výzkumu byly přenosové jevy v proudění (Wille, Wehrmann a Fabian, 1956) a měření žhaveným drátkem v mezních vrstvách (Karmanova vírová řada, Wille a Wehrmann, 1957). S rozvojem tranzistorových technologií v elektronice koncem 50. let byly zhotoveny první jednoduché a spolehlivé obvody pro žhavenou anemometrii s konstantní teplotou (CTA) V Základní studii Wehrmanna (1955, 1958) a Froebela (1964) a související elektronickou řídicí technologií byla vyvinuta Bergerem, Freymuthem a Fröbelem (1963). Jedním z dalších cílů byl vývoj nízkohlučného ventilátoru s vysokou účinností, Wille (1961) a Wikström (1964). Podmínky stability laminární proudění a laminární a turbulentní přechod byly dvě důležitá témata. Laminární přechod pomocí žhavené anemometrie vyšetřoval např. B. DOMM, 1956, dále Wille a Wehrmann (1957), a Wille (1963, 1966) a o něco později Michalke a Wille (1964) a Freymuth (1966). Důležité teoretické studie o stabilitě volných smykových vrstev publikoval Schade (1962), Michalke (1963), Michalke a Schade (1963), Michalke (1965, 1965), Freymuth (1966) a Michalke a Timme (1967). Z výzkumu stability a ovlivňováním laminárních proudů vzešla např. Studie o potlačení periodické vírové řady

Karmanovy vírové stezky (Berger, 1964). nebo např. Řízení roviny turbulentního volného proudu zvukem (Bechert, 1969). Wille byl jedním ze zakládajících členů European Mechanics Colloquia 1964, zorganizoval první setkání v roce 1965 na téma "Mezní vrstvy a stěnové proudy u ostře zakřivených stěn" (Wille a Fernholz, 1965). Výuka a výzkum se soustředily na následující oblasti: C. Schreck (Turbomachinery) H. Schade (Mechanika tekutin a teorie stability) H. Fernholz (teorie hraniční vrstvy) H. Fiedler (Vlné turbulentní proudění) E. Berger (Magnetohydrodynamika, MGD a proudění vyvolané vibracemi) a A. Michalke (dynamika plynů a aeroakustika). Wille byl jako profesor zproštěn některých povinností, ale jako ředitel dvou institucí byl plně zapojen v organizaci výzkumu až do své smrti.

Hermann Föttingerův Institut pro mechaniku tekutin, HFI, existoval až do 31.12.2006, kdy po rozhodnutí správní rady TU Berlin byl přejmenován na Ústav mechaniky tekutin a technické akustiky" (ISTA).

Ústav v současnosti

Na pracovišti se řeší aktuální otázky mechaniky tekutin a termodynamiky, jako je snižování emisí hluku z vozidel a letadel, ovlivňování spalovacích procesů, snižování jejich hluku a emisí, zvýšení účinnosti turbosoustrojí, zvyšování účinnosti křídel a lopatek rotorů. Důraz je kladen zejména na experimentální výzkum jevů v proudění, ale pro popis a modelování jsou pochopitelně také používány numerické a analytické metody.

Současná struktura pracoviště

V současnosti je ISTA rozdělena na 8 oddělení, mnohá z nich však spolu intenzivně kooperují:

Experimentelle Strömungsmechanik Prof. Dr.-Ing. C. O. Paschereit

Fluidsystemdynamik - Strömungstechnik in Maschinen und Anlagen Prof. Dr.-Ing. Paul-Uwe Thamsen

Numerische Fluidodynamik Prof. Dr. sc. techn. habil. Jörn Sesterhenn

Signale und Systeme der Akustik Prof. Dr.-Ing. M. Möser

Technische Akustik - Körperschall Prof. Dr. B.A.T. Petersson

Turbomaschinen- und Thermoakustik Prof. Dr. Lars Enghardt

Verbrennungsdynamik jun. Prof. Dr.-Ing. Jonas Moeck

Verbrennungskinetik jun. Prof. Dr.-Ing. N. Djordjevic

Oddělení dynamiky spalování

Od roku 2013, oblastí výzkumu je dynamika spalovacích procesů Oddělení působí jako samostatná tematická oblast v rámci ISTA. V čele oddělení působí Prof Dr.-Ing. Jonas Moeck. Oddělení kooperuje v úzké spolupráci s ostatními odděleními.

Náplň stáže

Náplní stáže byla účast na experimentu, který je součástí dlouhodobého a rozsáhlého výzkumného projektu hostujícího pracoviště - **Problematika tzv. SWACER (viz dále).**

Úkolem tohoto experimentu, jehož příprav i provedení jsem se účastnil, bylo vyšetření proudového pole v modelu spalovacího prostoru metodou rychlého PIV.

Problematika SWACER

Pulsně detonační spalovací komory (pulse detonation combustors , PDC) a cílený přechod od deflagrace k detonaci jsou nově se rozvíjející technologií, a to nejen v problematice propulzního pohonu ale rovněž se předpokládá uplatnění i jako stacionární pohonné jednotky v energetice, např. ve stacionárních plynových turbínách [2]. Samotná myšlenka není úplně nová, intenzivnější výzkum probíhá v posledním desetiletí. Použití tohoto spalovacího cyklu vyšetřoval analyticky už v polovině dvacátého století Zel'dovich [3], a později nezávisle na něm, Jacobs [4]. Předpokladem je využití termodynamicky účinného spalování při detonačním spalování.



Přímé vyvolání detonace vyžaduje značné množství energie a z tohoto důvodu jsou velmi často používány aerodynamické mechanické prvky, např. překážky nebo clonky k zavedení turbulence do proudu spalované směsi a tím urychlení deflagračního plamene. Pokud je uvolňování tepla a rychlost šíření turbulentního plamene dostatečně vysoká, tak může dojít k tzv. DDT, neboli Deflagration to Detonation Transition (přechodu od deflagrace k detonaci), podrobněji např. [5] nebo [6]) a SWACER (Shock Wave Amplification by Coherent Energy Release) mechanismus, viz [7]. Prostřednictvím turbulence může být podpořeno uplatnění SWACER mechanismu.

Dílčím úkolem výzkumu je ovlivnění proudového pole ve spalovacím prostoru pro vyvolání tzv. Deflagration to Detonation Transition, DDT. Předchozím experimentem bylo prokázáno, že tzv. pseudootvory oproti konvenčním mechanickým prvkům (clonkám) dovedou výrazněji ovlivnit proudové pole ve spalovacím prostoru, tedy zvýšit intenzitu turbulence a její prostorovou distribuci a tedy vytvořit příznivé podmínky pro DDT.

Tzv.pseudootvor vstřikuje tekutinu kolmo k hlavnímu proudu ve spalovacím prostoru, vytvoří se tedy výsledné prodění vzniklé interakcí hlavního proudu s přídavným příčným proudem (příčný proud má obvykle radiální charakter, viz dále popsany experiment).

Prováděný experiment

Cílem této práce je prozkoumat možnosti pomocí pseudootvorů nahradit mechanické otvory nebo mechanické „překážky“ (turbulizátory). Místo toho, aby byla v proudu umístěna mechanická překážka či turbulizátor, je vstřikována přídavná tekutina kolmo k hlavnímu proudu, což má za následek vznik příčného proudu (jetu) který interaguje s hlavním proudem.

Další výhoda pseudootvorů vyplývá ze skutečnosti, že v proudu není přítomna žádná mechanická překážka nebo clonka - snižuje se tepelné zatížení na životně důležitých součástech spalovací komory a tedy zvyšuje se celková životnost a spolehlivost zařízení. Takovýto pseudootvor byl v nedávné době navržen a úspěšně testován, Knox et al. [8] pro směs vodíku a vzduchu v trubici s vnitřním průměrem zhruba 53 mm.

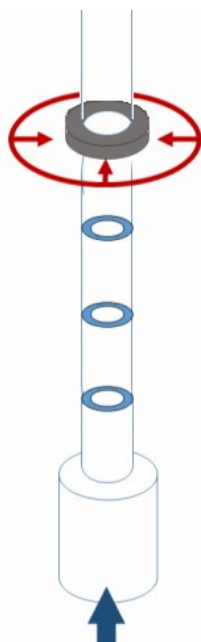
Úvodní experimenty byly na hostujícím pracovišti provedeny kolegy již v minulosti, kdy byla poprvé zkoumána efektivnost použití tzv. pseudootvorů. Experimenty byly prováděny ve zkušební vodní trati na hydrodynamickém modelu s cílem posoudit dopad pseudootvorů na proudové pole. Testovací model byl vyrobený z akrylátového skla (plexi) a je schematicky znázorněn na následujícím obrázku. Měření proudové pole probíhalo v podélné rovině ve směru kolmém k hlavnímu proudu v úseku spalovacího prostoru za místem vstřikování pomocného proudu.

Experimentální model

Vnitřní průměr potrubí reprezentujícího detonačního komoru byl 40 mm. Byly použity sady různých prstenců s různými typy a rozměry trysek pro zvýšení turbulence v proudu. Prstenec byl umístěn před vyšetřovanou oblastí (ve směru hlavního proudu).

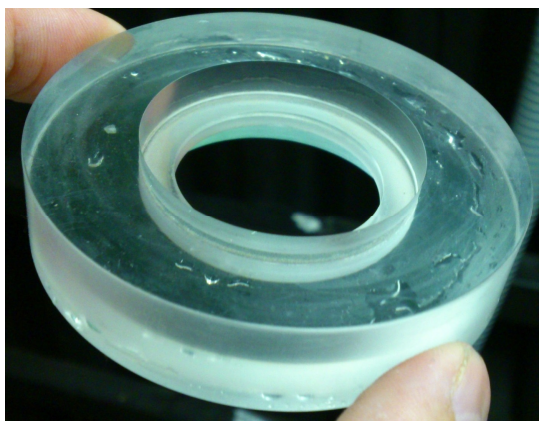
Z předchozích experimentů byla zjištěna délka separační oblasti 85 mm.

Aby byly získány reprodukovatelné detonace, je používána směs vodíku se vzduchem ve stechiometrickém poměru smísení [10]. Mechanická clonka nebo prstenec s různými typy trysek byl instalováno na původním místě čtvrté clonky.

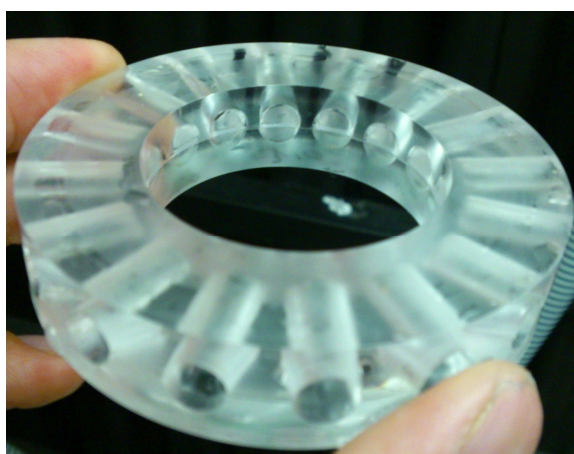


V první části stáže byl proveden vlastní měřicí experiment v tzv. vodní laboratoři Institutu pro hydromechaniku. V přípravné fázi experimentu byl zhotoven průhledný plexi model spalovacího prostoru. Rozebíratelný model se skládal z několika částí spojených šrouby a utěsněných těsněním. Dovnitř modelu bylo možné vkládat různé systémy vstřikovacích trysek. Trysky byly umístěny ve výměnném prstenci, výměnou prstence bylo tedy možné změnit typ trysek. V modelu spalovací komory bylo testováno několik variant vstřikování paliva do vstupu spalovacího prostoru (různé typy trysek a štěrbin a také trysky s fluidickými prvky pro nestacionární vstřikování včetně základního případu bez vstřikování, tedy štěrbinová tryska (kontinuální štěrbina po vnitřním obvodu obvodu), dvě různé velikosti kruhových trysek, celkem 10 kruhových trysek o průměru 1 a 2 mm), a také trysky osazené fluidickými generátory.

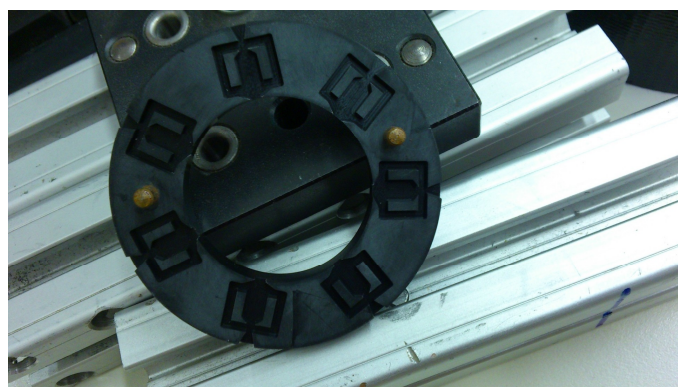
Základním případem byl prstenec pro měření bez přívodu vstřikované tekutiny, prstenec byl namísto trysek opatřen zúžením průřezu, clonkou, viz následující obrázek.



Na následujícím obrázku je zachycen výměnný prstenec se štěrbinovou tryskou,

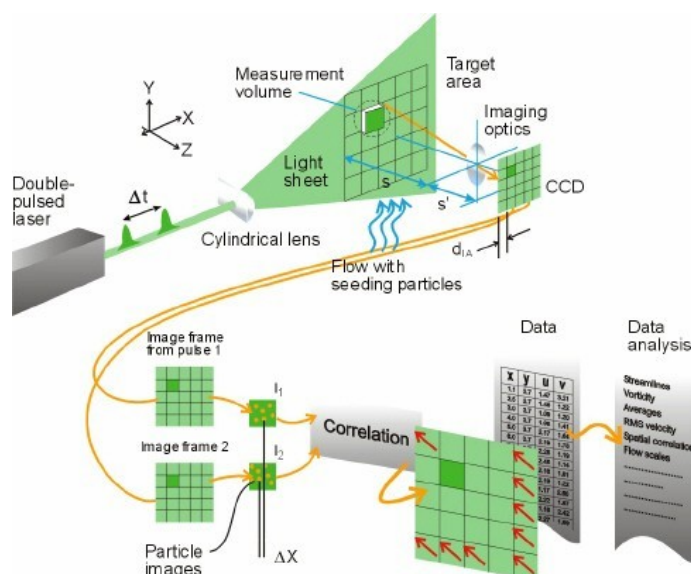


a na následujícím obrázku polovina výměnného prstence s pohledem na vnitřní uspořádání a geometrii fluidického generátoru nestacionárního proudu.



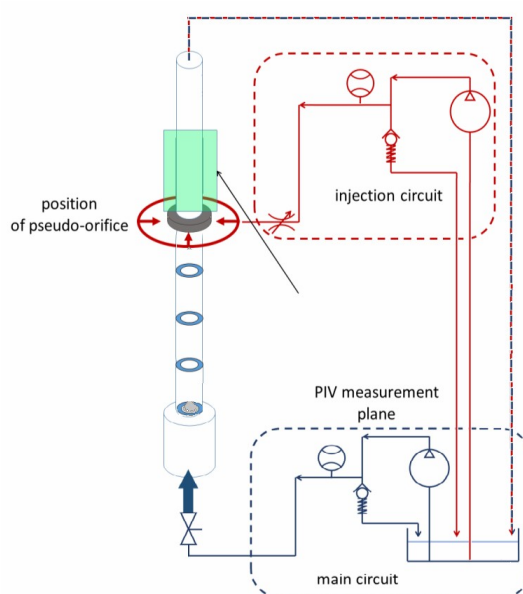
Postup experimentálních prací

Experimentální práce probíhaly ve spolupráci zejména s Joshuou Grayem Sestaveno experimentální zařízení pro metodu PIV. Pouze ve stručnosti zmiňuji princip metody PIV (viz následující obrázek, Dantec Dynamics), podrobnější informace o této experimentální metodě lze získat z dostupné literatury.



Experimentální trať

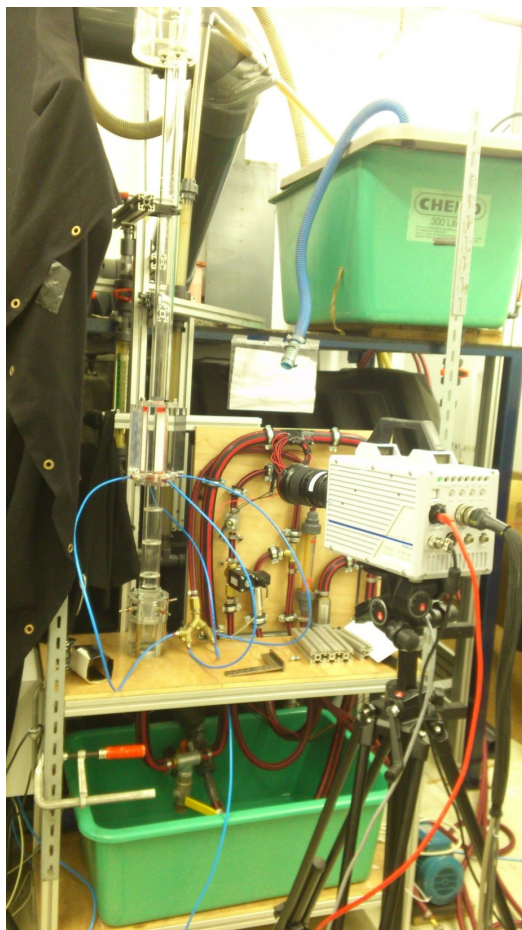
Hydrodynamický model spalovacího prostoru byl zapojen do adaptované cirkulační hydrodynamické tratě. Trať sestávala z vodního zásobníku, pohonného čerpadla a vedení. K vodnímu zásobníku byl dále připojen pomocný okruh napájející systém trysek. Okruh byl poháněný samostatným čerpadlem a ovládán soustavou elektronicky ovladatelných ventilů. Z profilové montovaného systému byla vytvořena opěrná konstrukce, která sloužila jako opora a také jako nosič ochranného opláštění laserového světla. Sestavená vodní trať byla naplněna vodou. Byly proměřeny průtokové charakteristiky obou okruhů. K měření průtoku byla zvolena objemová metoda. Ovládání čerpadla hlavního okruhu bylo elektronické, ovládání pomocného okruhu napájejícího trysky bylo manuální. Ve vodě byly rozptýleny značkové částice - stříbrem-potažené duté skleněné kuličky, které mají střední velikost částic 15 μm .



Dále bylo nainstalováno a seřízeno zařízení pro metodu (rychlého) PIV – vysokorychlostní kamera Photron, pulsní laser s optikou, synchronizační jednotka a také ovládací a měřicí počítače. K ovládání experimentu a měřicí aparatury a ke sběru dat bylo použito softwarového prostředí Labview. Před zprovozněním PIV aparatury bylo nejprve třeba se dobře seznámit s ovládáním laseru. Po důkladném seřízení celé aparatury byla nejprve provedena sada testovacích měření pro ověření správnosti nastavení. Následovalo kýžené proměření proudových polí pro různé provozní režimy modelu spalovací komory metodou PIV. Získaná obrazová data jdou ve formě dvojsnímků ve formátu TIFF. Každé jednotlivé měření obsahovalo soubor 5000 dvojsnímků s frekvencí snímání 1000 Hz. Dále bylo provedeno měření s plynulým zvětšováním průtoku tryskami a také proběhlo několik dynamických měření, kdy byl sledován dynamický děj během zahájení. V modelu spalovací komory bylo testováno několik variant vstřikování (paliva) do vstupu spalovacího prostoru (různé typy trysek a štěrbin a také trysky s fluidickými prvky pro nestacionární vstřikování včetně základního případu bez vstřikování). Měření metodou PIV je časově velmi náročné. Mnoho času si vyžádá samotné seřízení polohy kamery a laseru, které bylo nutné provést po každé výměně kroužku s tryskami. Přehled měřených konfigurací je shrnut v následující tabulce:

Name	mes	Massflow	Kroužek	Injesction	Pulse sepa	Notice			Name	r	Massflow	Kroužek	Injesction	Pulse sep	Notice
MechOri03	0.318		Orifice	-	50				PIV25	0.704	Fluidik_15		5	50	
MechOri05	0.509		Orifice	-	50				PIV26	0.704	Fluidik_15		10	50	
MechOri07	0.704		Orifice	-	50				PIV27	0.704	Fluidik_15		10	50	Non-Steady
PIV4	0.704		Slot03	2	50				PIV28	0.704	Fluidik_15	RAMP 0-1		50	Non-Steady
PIV5	0.704		Slot03	5	50				PIV29	0.704	Fluidik_15		5	50	
PIV6	0.704		Slot03	10	50				PIV30	0.704	Fluidik_15		2	50	
PIV7	0.704		Slot03	10	50	Non-Steady			PIV31	0.704	Fluidik_15		10	50	
PIV8	0.704		Slot05	2	50				PIV32	0.704	Fluidik_15		10	50	Non-Steady
PIV9	0.704		Slot05	5	50				PIV33	0.704	Fluidik_15	4 (350)			
PIV10	0.704		Slot05	10	50				PIV34	0.704	Fluidik_15	6.5 (450)			
PIV11	0.704		Slot05	10	50	Non-Steady			PIV35	0.704	Fluidik_15	3.9 (350)			
PIV12	0.704		Jets19	2	50				PIV36	0.704	Fluidik_15	6.5 (450)			
PIV13	0.704		Jets19	5	50				PIV37	0.704	Fluidik_15	4.2 (350)			
PIV14	0.704		Jets19	10	50				PIV38	0.704	Fluidik_15	9 (450)			
PIV15	0.704		Jets19	10	50	Non-Steady			PIV39	0.704	Round Jet	3.5 (350)			
PIV16	0.704		Jets24	2	50				PIV40	0.704	Round Jet	5.8 (450)			
PIV17	0.704		Jets24	5	50				PIV41	0.704	Round Jet	3.8 (350)			
PIV18	0.704		Jets24	10	50				PIV42	0.704	Round Jet	6.1 (450)			
PIV19	0.704		Jets24	10	50	Non-Steady			PIV43	0.704	Slot05	3.7 (350)			
PIV20	0.704		Fluidik_15	2	50				PIV44	0.704	Slot05	5.8 (450)			
PIV21	0.704		Fluidik_15	5	50				PIV45	0.704	Slot03	3.8 (350)			
PIV22	0.704		Fluidik_15	10	50				PIV46	0.704	Slot03	6.1 (450)			
PIV23	0.704		Fluidik_15	10	50	Non-Steady			PIV47	0.704	Fluidic2_1	3.8 (350)			
PIV24	0.704		Fluidik_15	2	50				PIV48	0.704	Fluidic2_1	6.4(450)			

Rovněž ukládání záznamu z vysokorychlostní kamery je poměrně zdlouhavý proces (desítky minut pro jedno měření). Výsledkem první části stáže tedy byla nasnímaná obrazová data



Získaná obrazová PIV data byla v průběhu druhé části stáže dále softwarově zpracována pomocí programu PIVview. Po seznámení se se softwarem byla nejprve obrazová data opatřit maskou, která odfiltruje (odřízne) nežádoucí části obrazu, které neodpovídají oblasti proudění. Masku bylo třeba nastavit individuálně pro každé měření, při výměně výměnných prstenců s tryskami totiž vždy došlo k demontáži modelu. Dále bylo potřebné u každého měření „odfiltrovat pozadí“. Pro každé měření byl ze všech jednotlivých snímků příslušejících danému měření spočítán tzv. středovaný snímek. Odečtením středovaného snímku dojde k vyčištění obrazových dat od nežádoucích odlesků a dalších statických nečistot.

Dalším krokem bylo nalezení optimálního nastavení parametrů PIV algoritmu a jejich ověření na obrazových datech z několika vybraných měření. Poté bylo možné provést vlastní analýzu všech obrazových dat. Program PIVview umožňuje spolupráci s prostředím Matlab, ve kterém je vytvořen spustitelný batch file soubor a pro každé měření také zvláštní soubor obsahující veškeré parametry výpočtu (parametry korelace, adresy obrazových souborů, cílové adresáře), který zajistí vyvolání výpočtu okamžitých vektorových rychlostních polí. Tento proces je opět poměrně časově náročný.

Dále byla pomocí programu Matlab vyhodnocena okamžitá rychlostní pole a jejich

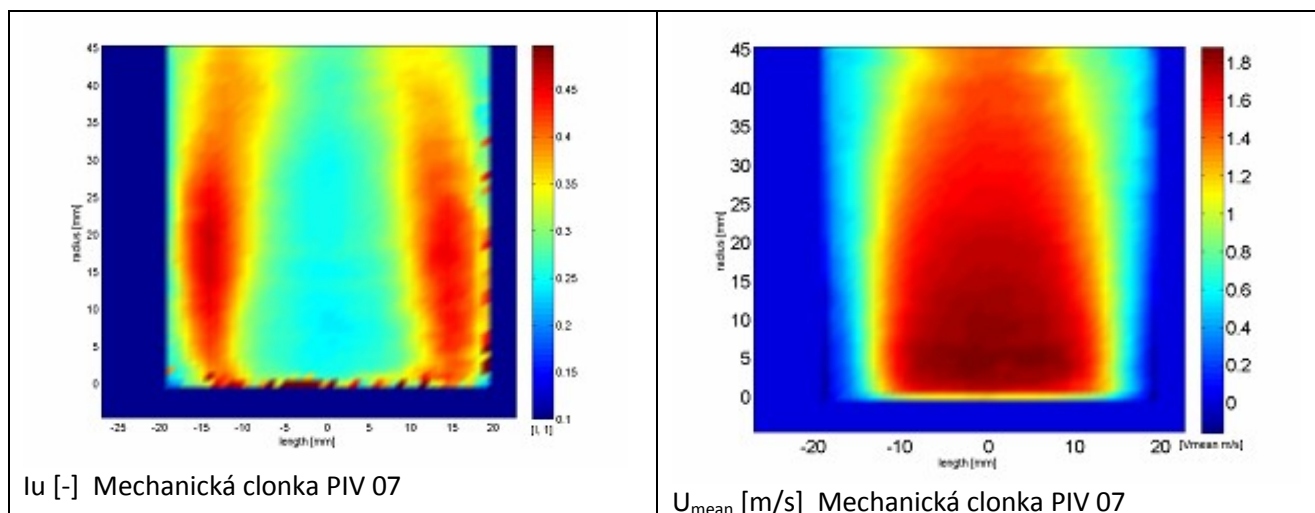
statistiky, časově středovaná rychlostní pole a pole intenzity turbulence vybrané výsledky provedených analýz jsou v grafické podobě k nahlédnutí v příloze. Provedení dalších pokročilejších analýz proudových polí (např. metoda POD) budou ještě následovat.

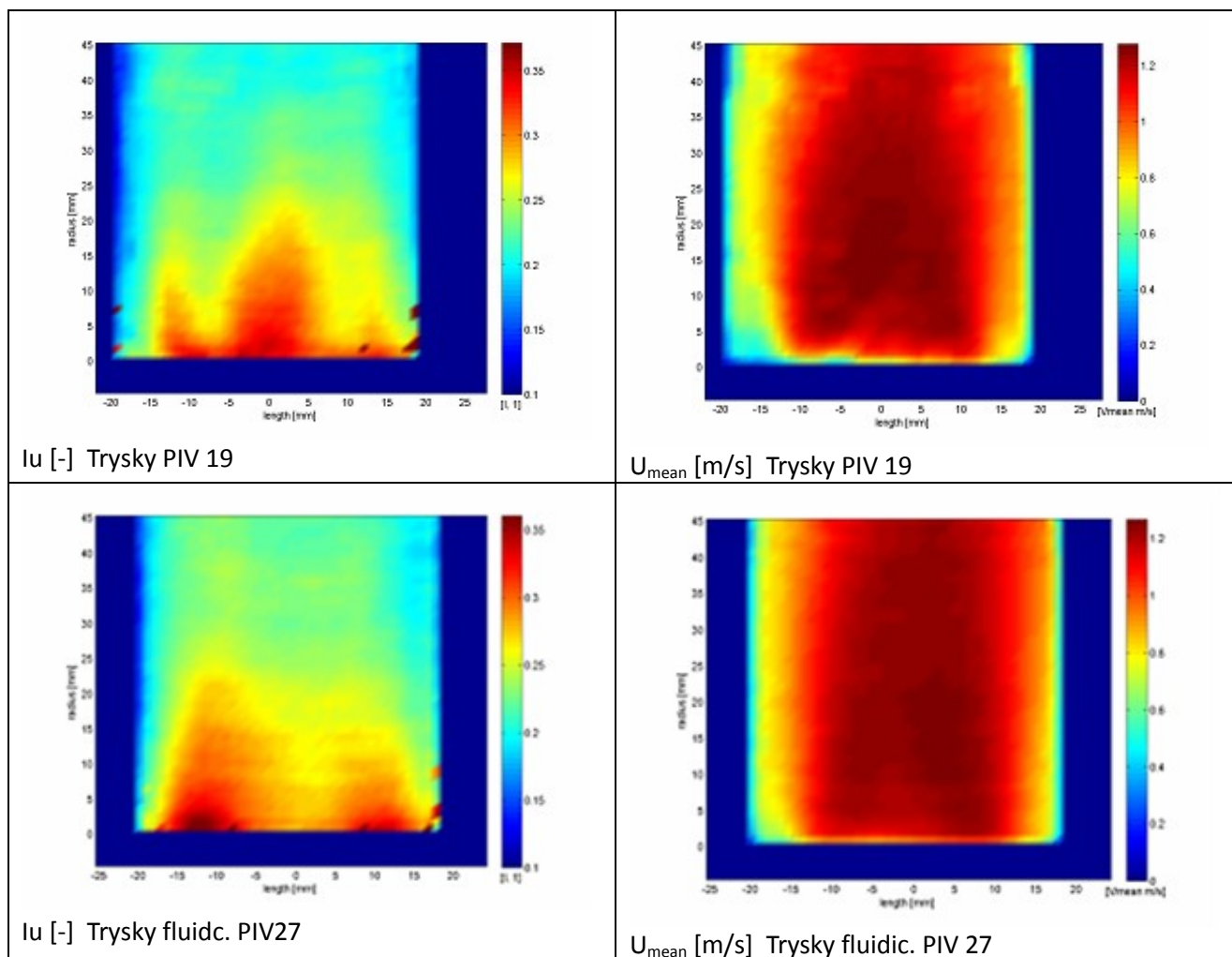
Výsledky

Mechanické ústí (clonka) vytváří turbulentní smykovou vrstvu, a dosahuje intenzity turbulence cca 0,45. Rychlostní profil (časově středovaný, U_{mean}) má parabolický charakter, intenzita turbulence (I_u) proudu v osově oblasti modelu spalovacího prostoru se jeví pomocí mechanické clonky spíše nedotčena.

V porovnání s tímto základním případem, kdy je použita mechanická clonka, mohou trysky produkovat v proudu mnohem větší objem turbulence s lepší distribucí po průřezu, i když dosahované maximální hodnoty jsou nižší. Tryskami je mnohem lépe ovlivněna osová oblast, je využito koncentrace energie od několika paprsků směrem do středu trubice, přestože intenzita jednotlivého proudu od každé trysky se zvětšující se vzdáleností od vyústění trysky klesá, paprsky interagují s hlavním proudem. Intenzita turbulence dosahuje hodnoty až cca 0,6. V axiálním směru se tryska typu obvodové štěrbiny chová pravděpodobně nestabilně, vykazuje výrazně nesymetrický účinek, patrně se projevila nesymetrie napájecího přívodu. V případě trysek s fluidickými prvky je turbulence distribuována více u stěn, ve srovnání s mechanickou clonkou však dovedou zvýšit turbulenci i v osově oblasti. Dosahované hodnoty intenzity turbulence jsou srovnatelné, ovlivněna je větší část průřezu, celkový objem vnesené turbulence je vyšší. Jako nejúčinnější se tedy jeví trysky osazené fluidickými prvky. Ovlivnění všemi typy trysek se projevuje na výrazně kratší vzdálenosti po proudu od místa vyústění trysek.

Na následujících obrázcích jsou příklady změřených intenzity turbulence a časově středovaných rychlostních polí.





Závěry

Z výsledků experimentu vyplývá, že trysky mohou produkovat mnohem vyšší hodnoty turbulence zejména v blízkosti osy hlavního proudu. Na základě výše uvedených výsledků se zdá, že použití tzv. pseudootvorů pro podporu mechanismus generování turbulence může být zajímavé pro vyvolání DDT a uplatnění SWACER mechanismu. Otázkou pro další bádání zůstává oblast, ve které má turbulence největší vliv, v centru nebo podél stran. Její zodpovězení je ale už mimo možnosti výše popsaného experimentu provedeném na hydrodynamickém modelu. Mnohé jevy související se spalovacími procesy však nemohou být v tomto modelu zahrnuty. V laboratořích hostujícího pracoviště již nyní probíhají i experimenty v těžké laboratoři s reálnými modely spalovací komory.

Specifika pobytu

Rozhodnutí se vyjet na pobyt v zahraničí je třeba uskutečnit s dostatečným předstihem. Je nutné se s hostujícím pracovištěm předem dohodnout na budoucí spolupráci. V mém případě tyto přípravy proběhly už v průběhu května 2014 během krátkodobé osobní návštěvy, proběhlo krátké seznámení se s pracovištěm a s budoucími kolegy. Experimentální práce probíhala ve spolupráci zejména s Joshuou Grayem pod vedením Prof. Dr. J. P. Moecka. Získal jsem základní informace o plánovaném experimentu a byl dohodnut termín pobytu. Na tomto místě bych velice rád poděkoval Prof. Václavu Urubovi, který mi tuto spolupráci pomohl dohodnout. V případě, že je předmětem činnosti stáže experiment, je třeba respektovat dlouhodobý harmonogram pracoviště. V mém případě bylo třeba zarezervovat měřicího vybavení pro PIV. A ve druhé části stáže bylo také třeba se dohodnout na poskytnutí, resp. uvolnění softwarových licencí, často bývá sdílený omezený počet licencí v rámci univerzity.

Před odjezdem do Německa je potřebné vyřídit potřebné formality a další náležitosti, jako je cestovní pojištění (na pracovní cestu), příkaz k pracovní cestě, cizojazyčné potvrzení o studiu.

Pro cestu z Prahy do Berlína je možné využít velmi dobrého vlakového spojení. Jízdenky jsem si zakoupil před odjezdem u společnosti České dráhy pro cestu tam i zpět. Při včasném nákupu je možné získat výraznou slevu. Cestování vlakem mohu doporučit, spojení je rychlé a pohodlné, není problém si vzít rozměrnější zavazadla. První den po příjezdu do Berlína jsem během dopoledne absolvoval nezbytné školení bezpečnosti práce a bezpečnosti práce s lasery a tak byl seznámen se všemi kolegy na ústavu.

Samostatnou otázkou je včasné zajištění si ubytování, v Německu a zejména v Berlíně není vzhledem k atraktivitě tohoto města obecně snadné ubytování získat. Pokoušel jsem se dohodnout si ubytování na koleji pro zahraniční studenty, ale vzhledem k termínu a délce mého pobytu jsem se nakonec rozhodnul pro využití jiné formy tzv. WG, tedy pronájem místnosti v soukromém bytě v Německu a v samotném Berlíně velmi rozšířeném způsobu studentského bydlení. Ubytování jsem si rezervoval přes portál [airbnb.com](https://www.airbnb.com). Je třeba si zde zřídit účet. Výhodou je také to, že odpadají formality spojené se zařizováním ubytování na koleji. Nevýhodou může být menší míra soukromí, zde ale velmi záleží na výběru hostitele. Ten je vždy prověřený a i z mé osobní opakované zkušenosti se myslím není třeba obávat. Tento ubytovací portál umožňuje provést platbu za ubytování online elektronickým bankovním převodem z běžného CZ účtu platba za ubytování předem je výhodná i proto, že v Německu je bezhotovostní platební systém EC, karty VISA/Maestro

jsou akceptovány jen v některých velkých obchodech a hotelích. Je dobré mít k dispozici alespoň část finančních prostředků v hotovosti nebo si v případě dlouhodobějšího pobytu zřídit konto u německé banky. Pro dlouhodobější studentské pobyty je nutná též registrace na místním městském úřadě (tzv. „Einwohnermeldeamt“). V mém případě toto nebylo vzhledem k délce pobytu nutné. Ihned po příjezdu na univerzitu jsem absolvoval bezpečnostní školení, seznámil jsem se s kolegy. Stravování je možné v univerzitní menze. Výběr jídel je pestrý, samoobslužný výdej jídel je také velkou výhodou. Pobyt v zahraničí je také dobrou příležitostí k získání dovedností v kuchařském umění.

V Berlíně žije mnoho přistěhovalců z celého světa a je tak jedinečným místem k poznávání nejrůznějších kultur ale i životních stylů. Berlín je také živým kulturním městem a městem soudobé moderní architektury. Velkou výhodou Berlína je také velmi dobře fungující, i když poněkud dražší městská hromadná doprava, devět linek metra (tzv. U-Bahn) a síť nadzemní městské železnice (tzv. S-Bahn). Areál Technické univerzity se nachází na západním okraji centrálního parku Tiergarten. MHD je areál univerzity je dostupný ze stanice linek S-Bahn Zoologischer Garten. Oblíbeným dopravním prostředkem v Berlíně je jízdní kolo, město je protkané sítí velmi frekventovaných cyklostezek. Při pohybu po ulicích města je třeba být velmi ostražitý. Během pobytu v Berlíně jsem využil možnosti navštívit mnohá zajímavá místa (např. známá Braniborská brána Brandenburger Tor nebo Berlínský dóm, Alexanderplatz, ulice Unter den Linden), k navštívení je možné doporučit některá ze známých muzeí a galerií, kterých je v Berlíně víc než stovka, např. slavná muzea na tzv. muzejním ostrově („Museuminsel“) Doporučuji návštěvu Pergamonmuzea, Neues Muzea nebo Technického muzea Berlin případně muzea německých ozbrojených sil. Volný čas je možné aktivně trávit např. v areálu Tempelhofer Feld rozkládajícího se na ploše bývalého letiště Tempelhof., ale i pouhá pěší procházka po městě ať už ve dne nebo po setmění je zážitkem.

Strávil jsem v Berlíně celkem dva měsíce naplněné nejen prací v laboratoři, kde jsem získal nové zkušenosti s metodou PIV ve vodě. Získal jsem také mnoho inspirativních podnětů do odborného ale i osobního života. Pobyt v cizojazyčném prostředí rozhodně prospěl i vyjadřovací schopnostem v anglickém a německém jazyce. Na hostitelském pracovišti se běžně v pracovní komunikaci používají oba jazyky, i když je pochopitelně německý jazyk vhodnější pro běžnou komunikaci. Během pobytu jsem také měl možnost zúčastnit se několika odborných přednášek a setkat se s mnoha kolegy a načerpal mnoho zkušeností a poznatků souvisejících s prováděným experimentem ale i s tematikou týkající se disertační práce - na pracovišti se mimo jiné řeší problematika fluidických prvků a jejich použití pro řízení proudění.

Nezbývá, než poděkovat všem, kteří mi byli během pobytu i při přípravě výjezdu pomohli. Pobyt na hostitelském pracovišti byl jednoznačně přínosný. Stáž byla realizována v rámci projektu CZ.1.07/2.3.00/20.0139 „Budování excelentního vědeckého týmu pro experimentální a numerické modelování v mechanice tekutin a termodynamice.

Citovaná a použitá literatura:

- [1] Fernholz, H.H., Leutz, A.: Von Hermann Föttinger zum Hermann-Föttinger-Institut, http://www.hermann-foettinger.de/preprints/Fernholz%20Leutz_050508.pdf. (20.6.,2015)
- [2] Rasheed, A., Furman, A.H., and Dean, A.J.: Experimental investigations of the performance of a multitube pulse detonation turbine system. *Journal of Propulsion and Power*, **27** (3), 586-596 (2011).
- [3] Zel'dovich, Y.B.: To the question of energy use of detonation combustion. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, **10** (17), 1453-1461 (1940).
- [4] Jacobs, S.J.: The energy of detonation. NAVORD Report 4366, U.S. Naval Ordnance Laboratory, White Oak, MD. Available as NTIS AD113271 Old Series. (1956).
- [5] Lee, J.H., Knystautas, R. and Chan, C.K.: Turbulent flame propagation in obstacle-filled tubes. Symposium (International) on Combustion **20** (1), 1663-1672 (1985).
- [6] Guirao, C.M., Knystautas, R., and Lee, J.H.: A summary of hydrogen-air detonation experiments. NUREG/CR-4961, SAND87-7128. Sandia National Laboratories. (1989).
- [7] Lee, J.H.S. and Moen, I.O.: The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapor cloud explosions. *Progress in Energy and Combustion Science* **6**, 359-389 (1980).
- [8] Knox, B.W., Forliti, D.J., Stevens, C.A., Hoke, J.L., and Schauer, F.R.: A comparison of fluidic and physical obstacles for deflagration-to-detonation transition. AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2011-587. (2011).
- [9] Dorofeev, S.B., Sidorov, V.P., Kuznetsov, M.S., Matsukov, I.D., and Alekseev, V.I.: Effect of scale on the onset of detonations. *Shock Waves* **10**, 137-149 (2000).
- [10] Gray, J.A.T., Moeck, J.P, Paschereit, C.O.: Investigations of the dynamics of a propagating flame using high-speed imaging and laser sheet tomography. *International Colloquium on the Dynamics of Explosions and*
- [11] Gray, J.A.T., J.P. Moeck and C.O. Paschereit. Non-reacting investigations of a pseudo-orifice for the purpose of enhanced deflagration to detonation transition. In Roy, G.D. and Frolov, S.M. ed., *International Conference on Pulsating and Continuous Detonations 2014*. Torus Press Combustion and Detonation Series. 176-181. *Transient Combustion and Detonation Phenomena*, 2014