

# DYNAMIKA VÍCEFÁZOVÉHO PROUDĚNÍ V MAZACÍM KANÁLKU KLIKOVÉHO HŘÍDELE S PŘERUŠOVANÝM TOKEM

Kozák Jan

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 2. ročník

Navazující magisterský studijní program – AUTOMOBILOVÉ INŽENÝRSTVÍ

**Abstrakt:** Práce se zabývá dynamikou vícefázového proudění v mazacím kanálku klikové hřídele s přerušovaným přívodem oleje. Cílem je analyzovat rozložení olejové a vzduchové fáze během jedné otáčky klikové hřídele. Pro tento účel byl vytvořen numerický model v programu Ansys Fluent a provedena experimentální měření v laboratořích společnosti Škoda Auto a.s. na speciálně navrženém zkušebním zařízení. Výsledky experimentu a CFD simulace jsou následně porovnány a vyhodnoceny.

**Klíčová slova:** mazání motorů, numerické simulace, zavzdušnění oleje, vzduchová kapsa

## 1 Úvod

V současné době jsou na spalovací motory kladeny stále vyšší požadavky z hlediska účinnosti, hospodárnosti a snižování emisí. Přestože se v automobilovém průmyslu stále více prosazují alternativní druhy pohonů, zůstávají spalovací motory významnou součástí osobní i užitkové dopravy. Z tohoto důvodu je i nadále věnována značná pozornost optimalizaci jejich jednotlivých systémů s cílem snížit energetické ztráty a zvýšit celkovou provozní účinnost.

Jedním z prostředků vedoucích ke snížení těchto ztrát je optimalizace mazacího systému. Jeho úkolem je zajistit dostatečný přívod maziva k pohybujičím se součástem motoru, snížit tření a opotřebení kontaktních ploch a současně přispívat k odvodu tepla vznikajícího během provozu. Významnou součástí mazacího systému spalovacího motoru je klikový mechanismus, jehož ojnicní ložiska jsou zásobována olejem prostřednictvím soustavy vrtaných kanálků v klikové hřídeli.

Proudění oleje těmito kanálky je ovlivněno řadou fyzikálních jevů. Mezi nejvýznamnější patří přítomnost vzduchu v mazivu, působení odstředivých sil vyvolaných rotací klikové hřídele a přerušovaný přívod oleje způsobený konstrukcí hlavního ložiska klikové hřídele. Vzájemné působení těchto faktorů vede ke vzniku složitého nestacionárního vícefázového proudění, při kterém dochází ke změnám rozložení olejové a vzduchové fáze uvnitř kanálku. Tyto změny mohou ovlivňovat množství oleje dopravovaného k ložiskům i celkovou spolehlivost mazacího systému.

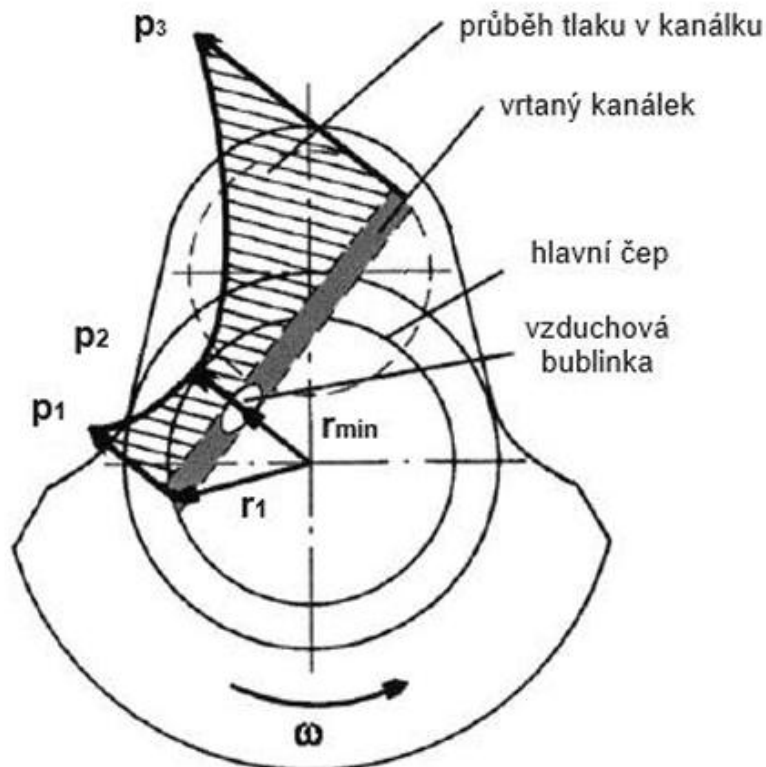
Pro studium podobných dějů jsou v současnosti stále častěji využívány metody výpočetní dynamiky tekutin (CFD), které umožňují detailně analyzovat proudění v obtížně přístupných oblastech a sledovat časový vývoj rozhraní mezi jednotlivými fázemi. Významnou výhodou numerických simulací je možnost získání informací, které nelze experimentálně měřit nebo pozorovat pouze v omezené míře. Pro zajištění věrohodnosti numerických modelů je však nezbytné jejich ověření pomocí experimentálních dat.

Cílem této práce je experimentálně a numericky analyzovat vícefázové proudění v mazacím kanálku klikové hřídele při přerušovaném přívodu oleje. Experimentální měření byla realizována na speciálně navrženém zkušebním zařízení v laboratořích společnosti Škoda Auto a.s., zatímco numerická část byla řešena pomocí CFD simulací v programu Ansys Fluent. Pozornost je zaměřena především na rozložení olejové a vzduchové fáze během jedné otáčky klikové hřídele a na porovnání výsledků získaných experimentálním měřením a numerickou simulací.

## 2 Průtok mazacího oleje skrz rotující kanálky klikové hřídele

Proudění mazacího oleje v rotujících kanálcích klikové hřídele ovlivňuje řada faktorů souvisejících s provozem spalovacího motoru. Jedním z nich je zavzdušnění oleje. Vzduch se v motorovém oleji může vyskytovat ve třech základních formách – jako rozpuštěný vzduch, vzduchové bubliny a pěna. Rozpuštěný vzduch je přímo vázán v kapalině a za běžných podmínek významně neovlivňuje její vlastnosti. Naopak vzduchové bubliny a pěna mohou negativně ovlivňovat mazání a tlakové poměry v mazacím systému. [1]

Dalším faktorem jsou odstředivé síly působící na mazivo v důsledku rotace klikové hřídele. Ty způsobují vznik tlakového gradientu podél osy kanálku a současně vedou k radiálnímu rozvrstvení jednotlivých fází. Olej s vyšší hustotou je vytlačován směrem k vnějším částem kanálku, zatímco vzduch se hromadí v oblasti nejbližší ose rotace. V důsledku tohoto jevu vzniká uvnitř kanálku vzduchová kapsa, jejíž velikost a poloha závisí na provozních podmínkách mazacího systému. Teoretický průběh tlaku a vznik vzduchové kapsy v rotujícím kanálku jsou znázorněny na obrázku 1. [2, 3]

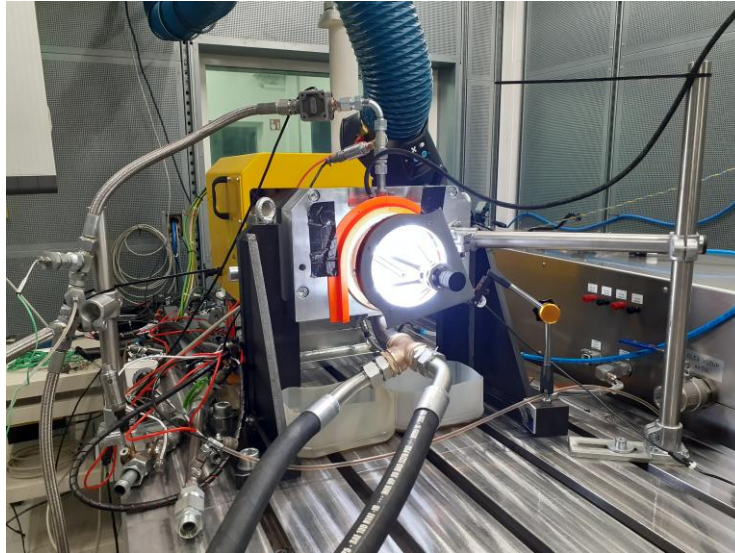


Obrázek 1: Vznik vzduchové kapsy ve vrtaném kanálku [2]

Kromě přítomnosti vzduchu a působení odstředivých sil ovlivňuje proudění oleje v mazacích kanálcích také způsob jeho přívodu. U hlavních ložisek opatřených částečnou obvodovou drážkou dochází během jedné otáčky klikové hřídele ke střídání otevřené a uzavřené fáze přívodu oleje. Tato periodická změna okrajových podmínek ovlivňuje rozložení jednotlivých fází uvnitř kanálku a vede ke vzniku nestacionárního vícefázového proudění. Jeho charakter závisí především na otáčkách klikové hřídele, tlaku oleje v mazacím systému a míře zavzdušnění oleje. Právě analýza rozložení olejové a vzduchové fáze během jedné otáčky klikové hřídele představuje hlavní cíl experimentálních měření a numerických simulací prezentovaných v této práci. [4]

### 3 Experimentální zařízení a metodika měření

Pro experimentální analýzu vícefázového proudění v mazacím kanálku klikové hřídele bylo využito speciálně navržené zkušební zařízení vyvinuté ve společnosti Škoda Auto a.s. Zařízení umožňuje sledovat proudění směsi oleje a vzduchu v transparentním modelu mazacího kanálku při definovaných provozních podmínkách.



Obrázek 2: Experimentální zařízení

Základem experimentálního zařízení je dutá rotační hřídel uložená v ložiskové skříni, která byla pevně uchycena k nosné konstrukci pracovního stolu. Hřídel je pevně spojena s měřicí patronou obsahující model mazacího kanálku klikové hřídele. Čelní část patrony byla opatřena průhledným krytem s labyrintovým těsněním, který umožňoval optické sledování proudění a vývoje rozložení jednotlivých fází během rotace. Pro záznam proudění byla k rotující části zařízení instalována kamera snímající děje probíhající uvnitř kanálku. Součástí sestavy byl rovněž telemetrický systém umožňující přenos signálů od tlakových snímačů umístěných v patroně, přičemž elektrické vodiče byly vedeny dutinou hřídele.

Přívod oleje do kanálku byl realizován prostřednictvím napájecího ložiska opatřeného obvodovou drážkou o rozsahu 180°. Toto konstrukční řešení způsobuje periodické střídání otevřené a uzavřené fáze přívodu oleje během jedné otáčky hřídele a simuluje podmínky reálně se vyskytující v klikovém mechanismu spalovacího motoru.



(a)



(b)

Obrázek 3: Součásti experimentálního zařízení: (a) Napájecí ložisko, (b) patrona s kanálkem.

Přípravu zavzdušněného oleje zajišťovalo zařízení Air-X společnosti DSI, které umožňuje řízené napěnění maziva před jeho vstupem do experimentálního systému. Po průchodu měřicím zařízením byl olej odváděn zpět do zavzdušňovacího přístroje. Součástí experimentálního stavu byl také elektromotor o výkonu 22 kW a rozvody sloužící k přívodu provozních kapalin.

### 3.1 Parametry měření

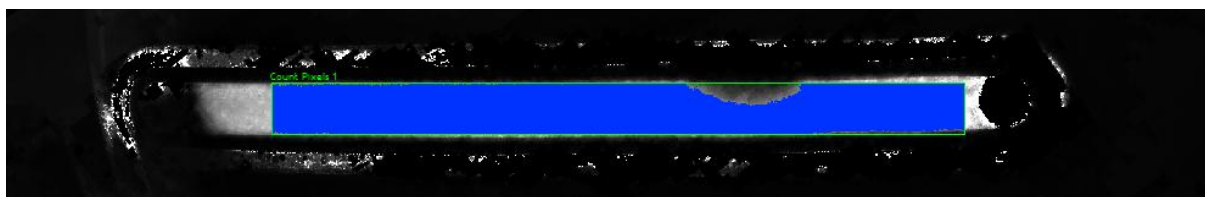
Celkem bylo realizováno šest měření pro dvě otáčkové hladiny hřídele a tři různé hodnoty vstupního tlaku oleje. Ve všech provedených měřeních byla udržována stejná teplota oleje a stejná míra zavzdušnění. Jako pracovní kapalina byl použit motorový olej SAE 0W-20. Parametry jednotlivých měření jsou zobrazeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Vstupní parametry experimentálního měření

	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	Měření 6
Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	1800	3600	1800	3600	1800	3600
Tlak [bar]	2	2	3	3	4	4
Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	50	50	50	50	50	50
Zavzdušnění [%]	5	5	5	5	5	5
Olej	SAE 0W-20					

### 3.2 Způsob vyhodnocení experimentálních měření

Pro vyhodnocení rozložení fázi byla použita obrazová data pořízená kamerou umístěnou na rotující části zařízení. Ze zaznamenaných videosekvencí byly extrahovány jednotlivé snímky, které byly následně podrobeny obrazové analýze. Ve vybrané oblasti kanálku bylo stanoveno procentuální zastoupení olejové fáze během jedné otáčky hřídele. Sledovaná oblast použitá pro vyhodnocení je zobrazena na obrázku 4. Z důvodu omezení vlivu okrajových oblastí nebyly do vyhodnocení zahrnuty části kanálku v blízkosti vstupu a výstupu. Analýza byla proto provedena pouze v modře označené části kanálku, kde byly získány reprezentativní výsledky pro sledované vícefázové proudění. Vyhodnocení bylo založeno na světlosti obrazu. Do vzduchové fáze byly zahrnuty nejen zcela světlé oblasti, ale také částečně zesvětlené oblasti odpovídající směsi oleje a vzduchu.



Obrázek 4: Zvolená oblast kanálku pro vyhodnocení fázi v rámci experimentálního měření

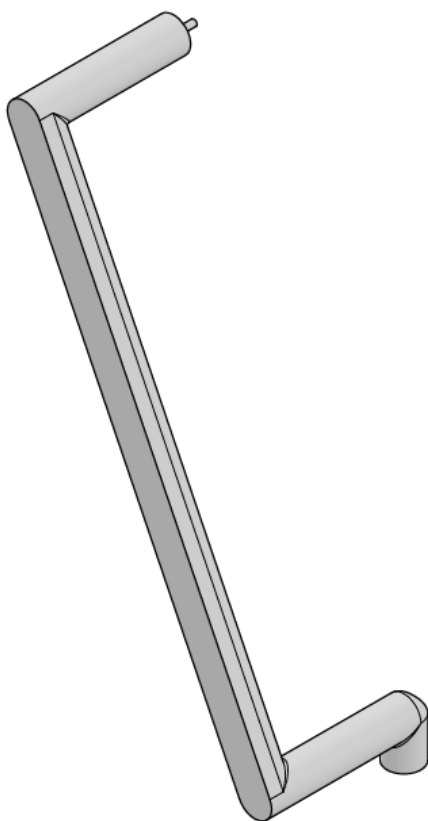
## 4 Numerická simulace

Numerický model byl vytvořen v programu Ansys Fluent s cílem analyzovat rozložení olejové a vzduchové fáze během jedné otáčky klikové hřídele a umožnit porovnání výsledků se získanými experimentálními daty. Návrh simulace vychází z dříve realizovaných výpočtů, přičemž hlavní rozdíl spočívá v implementaci přerušovaného přívodu oleje odpovídajícího reálnému napájení skrz drážku hlavního ložiska.

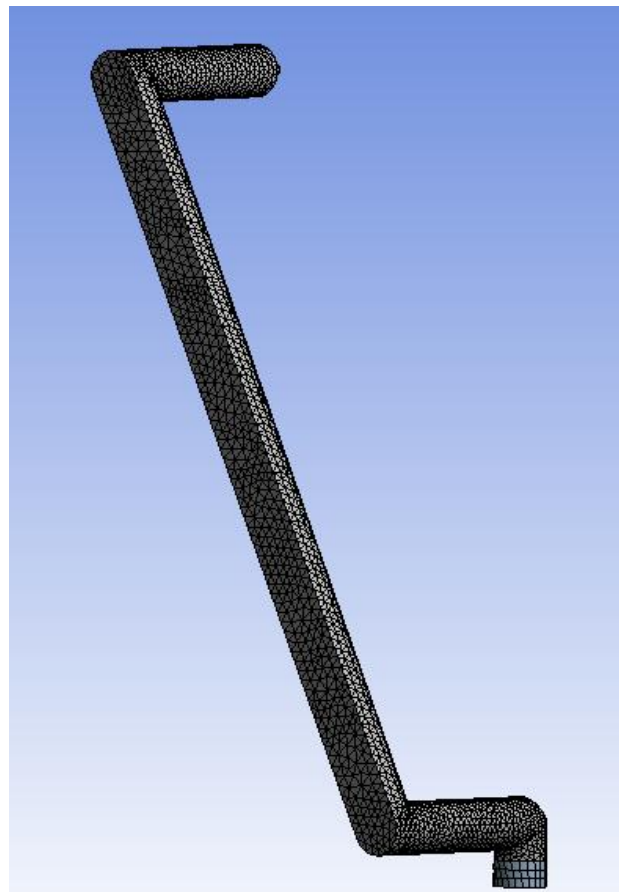
#### 4.1 Geometrie kanálku a výpočetní síť

Geometrie modelu byla vytvořena v programu *Autodesk Inventor Professional* na základě konstrukčních podkladů experimentálního zařízení. Následně byla exportována ve formátu *STEP* do prostředí *Ansys Workbench*, kde proběhla tvorba výpočetní sítě.

Výpočetní síť byla vytvořena v modulu *Ansys Mesher* a následně exportována do programu *Ansys Fluent*. Většina výpočetní oblasti byla diskretizována pomocí nestrukturované tetrahedronové sítě. V oblasti vstupu do kanálku byla vytvořena samostatná výpočetní zóna s hexagonální sítí, která sloužila pro modelování přerušovaného přívodu oleje. Tato oblast byla vytvořena rozdělením původního objemu na dvě samostatné části v prostředí *DesignModeler*.



(a)



(b)

Obrázek 5: (a) Geometrický model kanálku, (b) výpočetní síť.

#### 4.2 Nastavení simulace

Pro popis vícefázového proudění byl použit model *VOF (Volume of Fluid)*, který umožňuje sledovat rozhraní mezi olejovou a vzduchovou fází. Výpočet byl řešen jako nestacionární pomocí *pressure-based solveru*. Pro vazbu mezi tlakem a rychlostí bylo využito schéma *PISO* a turbulence byla popsána pomocí modelu *realizable  $k-\epsilon$* .

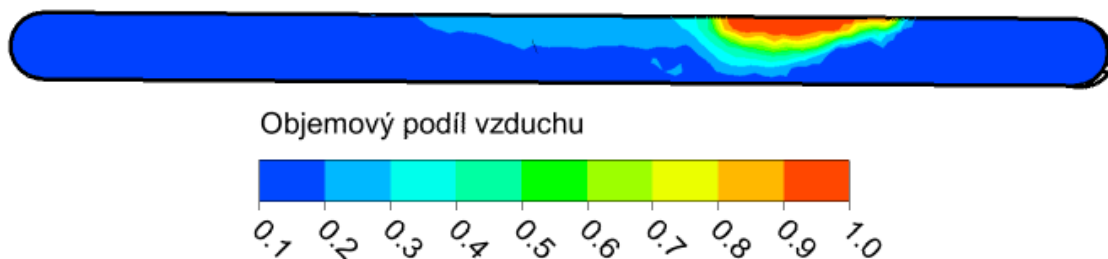
Přerušovaný přívod oleje byl modelován prostřednictvím samostatné výpočetní oblasti umístěné za vstupem do kanálku. Hodnota hydraulického odporu této oblasti byla řízena uživatelskou funkcí (*UDF*), která periodicky střídala otevřený a uzavřený stav v souladu s funkcí napájecího ložiska s obvodovou drážkou o rozsahu  $180^\circ$ . Tím bylo dosaženo simulace periodického přerušování přívodu oleje odpovídajícího podmínkám experimentálního měření.

Rotace kanálku byla definována pomocí rotující referenční soustavy odpovídající zvoleným otáčkám hřídele. Na vstupu do modelu byl předepsán konstantní tlak oleje odpovídající měřenému stavu, zatímco na výstupu byla použita tlaková okrajová podmínka s hodnotou odpovídající atmosférickému tlaku okolí.

V rámci vyhodnocení byly zaznamenávány hodnoty objemového podílu vzduchu na sledované ploše. Pro zkrácení výpočetního času byla v oblasti kanálku nacházející se nejbližší ose rotace předdefinována vzduchová kapsa. Celková doba simulace činila 2,5 s.

#### 4.3 Způsob vyhodnocení simulačních výpočtů

Obdobně jako v rámci experimentálního měření bylo i zde hlavním cílem sledování rozložení olejové a vzduchové fáze během jedné otáčky klikové hřídele. Pro vyhodnocení byl využit export objemového podílu vzduchu ze středu každé buňky na sledované ploše. Za vzduchovou fázi byly považovány buňky s objemovým podílem vzduchu vyšším než 0,65. Tato mezní hodnota byla stanovena empiricky tak, aby co nejlépe odpovídala způsobu vyhodnocení experimentálních snímků, při kterém byly do vzduchové fáze zahrnovány nejen zcela světlé oblasti, ale i částečně zesvětlené oblasti odpovídající směsi oleje a vzduchu. Na rozdíl od experimentálního vyhodnocení byla v případě simulace analyzována celá plocha kanálku zobrazená na *obrázku 6*, protože vymezení identické oblasti jako u experimentu nebylo v rámci použitého vyhodnocení možné realizovat.



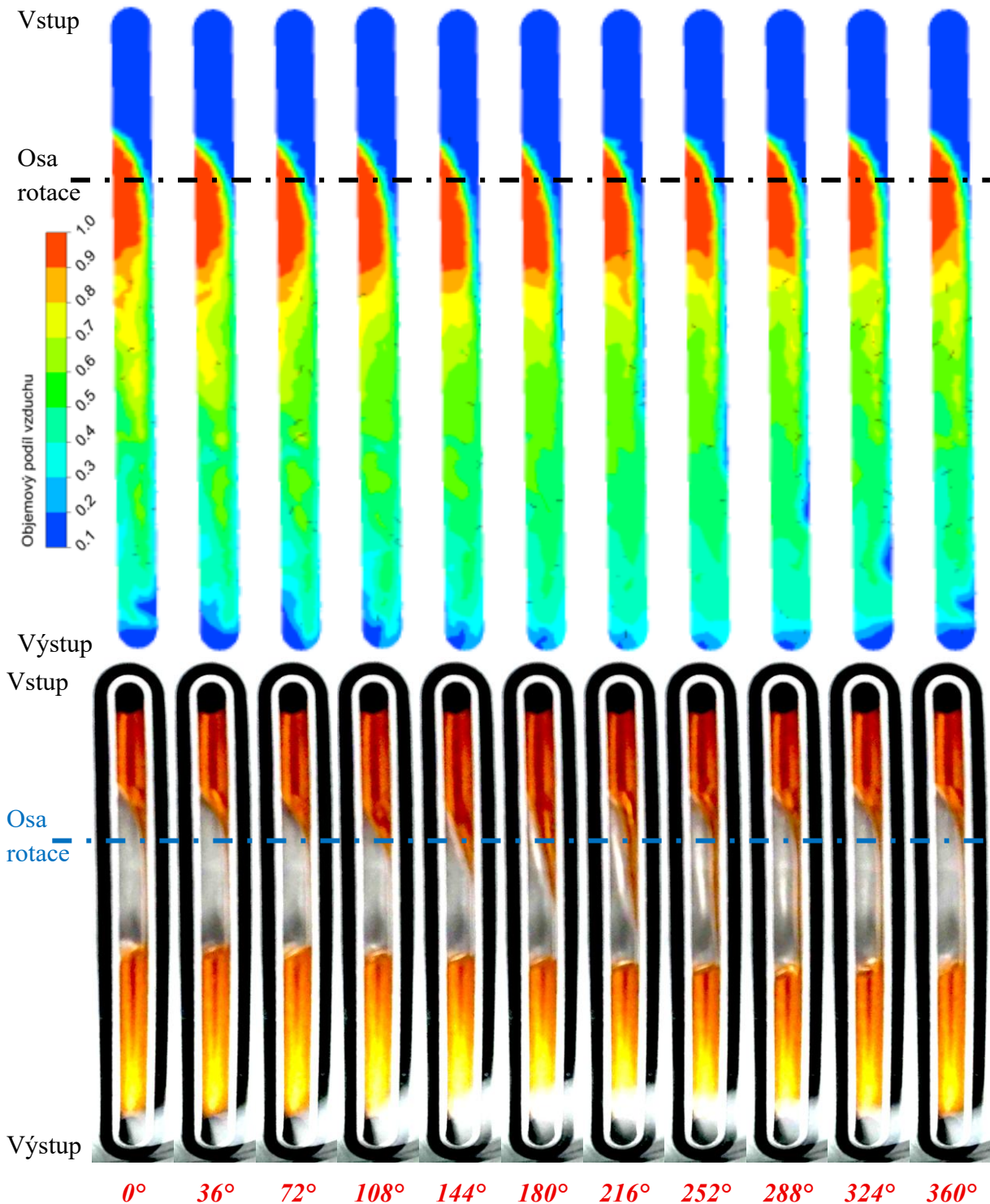
Obrázek 6: Sledovaná plocha kanálku v rámci simulace

## 5 Výsledky a diskuse

Na základě experimentálních měření a simulačních výpočtů byly identifikovány dva charakteristické typy chování lišící se především velikostí vznikající vzduchové kapsy. Následující část uvádí výsledky pro vstupní parametry 3600 ot/min – 3 bar a 1800 ot/min – 2 bar. První případ je charakteristický pro skupinu výsledků, u kterých došlo k vyvinutí větší vzduchové kapsy, naopak u druhého případu kapsa zůstala relativně malá.

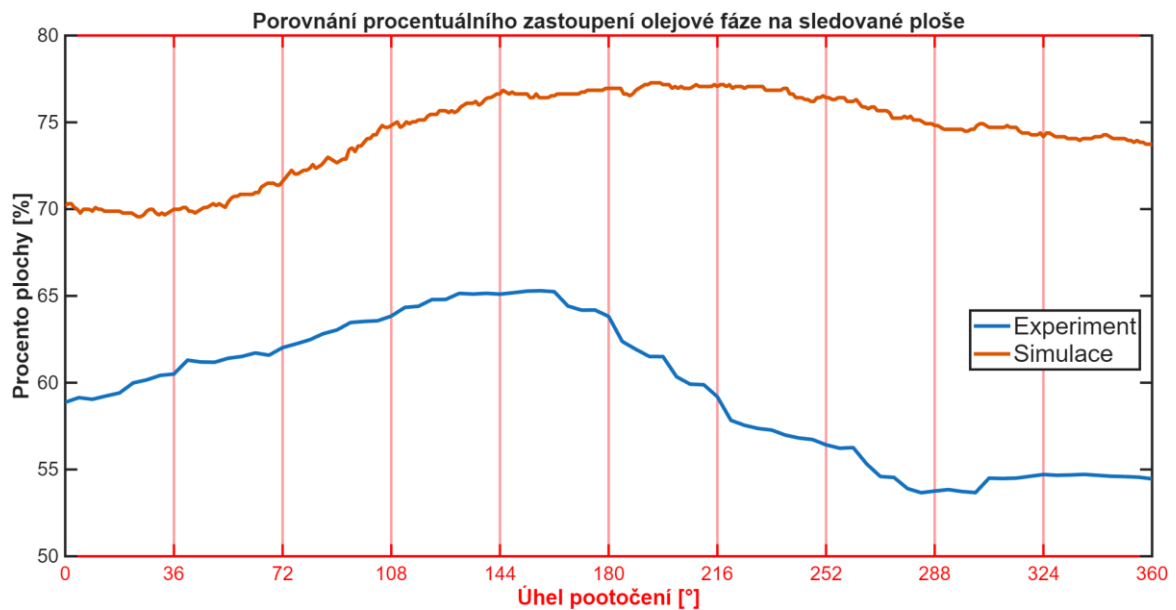
### 5.1 Výsledky pro parametry 3600 ot/min – 3 bar

Na *obrázku 7* je vyobrazeno porovnání obrazových záznamů pořízených během experimentálního měření a kontur zobrazujících objemový podíl vzduchu získaných simulačním výpočtem. Jednotlivé snímky zobrazují jednu otáčku klikové hřídele s krokem 36°. Numerická simulace umožňuje detailnější zobrazení rozložení jednotlivých fází, které nemusí být z experimentálních snímků pořízených kamerou vždy jednoznačně patrné. Je tedy nutné brát získané výsledky s určitou rezervou. V případě uvažování dříve definované podmínky, kdy vzduchové fázi odpovídají oblasti s objemovým podílem vzduchu větším než 0,65, však lze prohlásit, že rozložení fází získané simulačním výpočtem vykazuje dobrou podobnost s experimentálním měřením.



Obrázek 7: Porovnání rozložení fází experimentu a simulace (3600 ot/min - 3 bar)

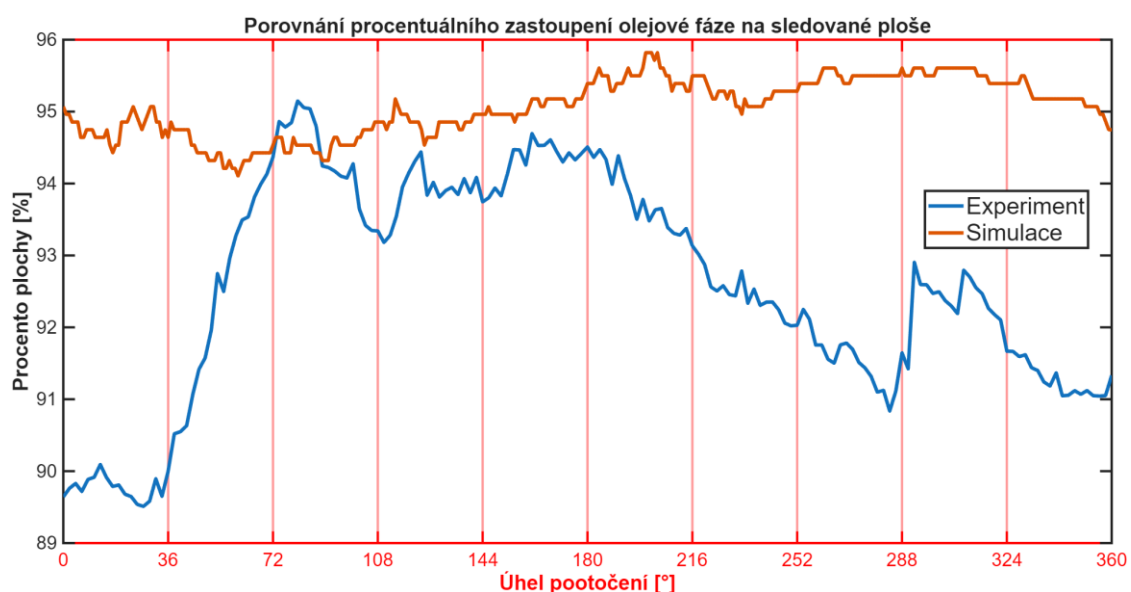
Obrázek 8 zobrazuje grafické porovnání průběhů zastoupení olejové fáze na sledované ploše v rámci experimentu a simulace během jedné otáčky. I zde lze pozorovat určitou podobnost mezi oběma způsoby vyhodnocení. V obou případech je zjevný postupný nárůst procentuálního zastoupení olejové fáze, přičemž ke konci otáčky dochází k poklesu. Rozdílné absolutní hodnoty jsou pravděpodobně způsobeny odlišnou velikostí vyhodnocované plochy v rámci simulace a experimentálního měření.



Obrázek 8: Porovnání procentuálního zastoupení olejové fáze na sledované ploše v rámci experimentu a simulace (3600 ot/min – 3 bar)

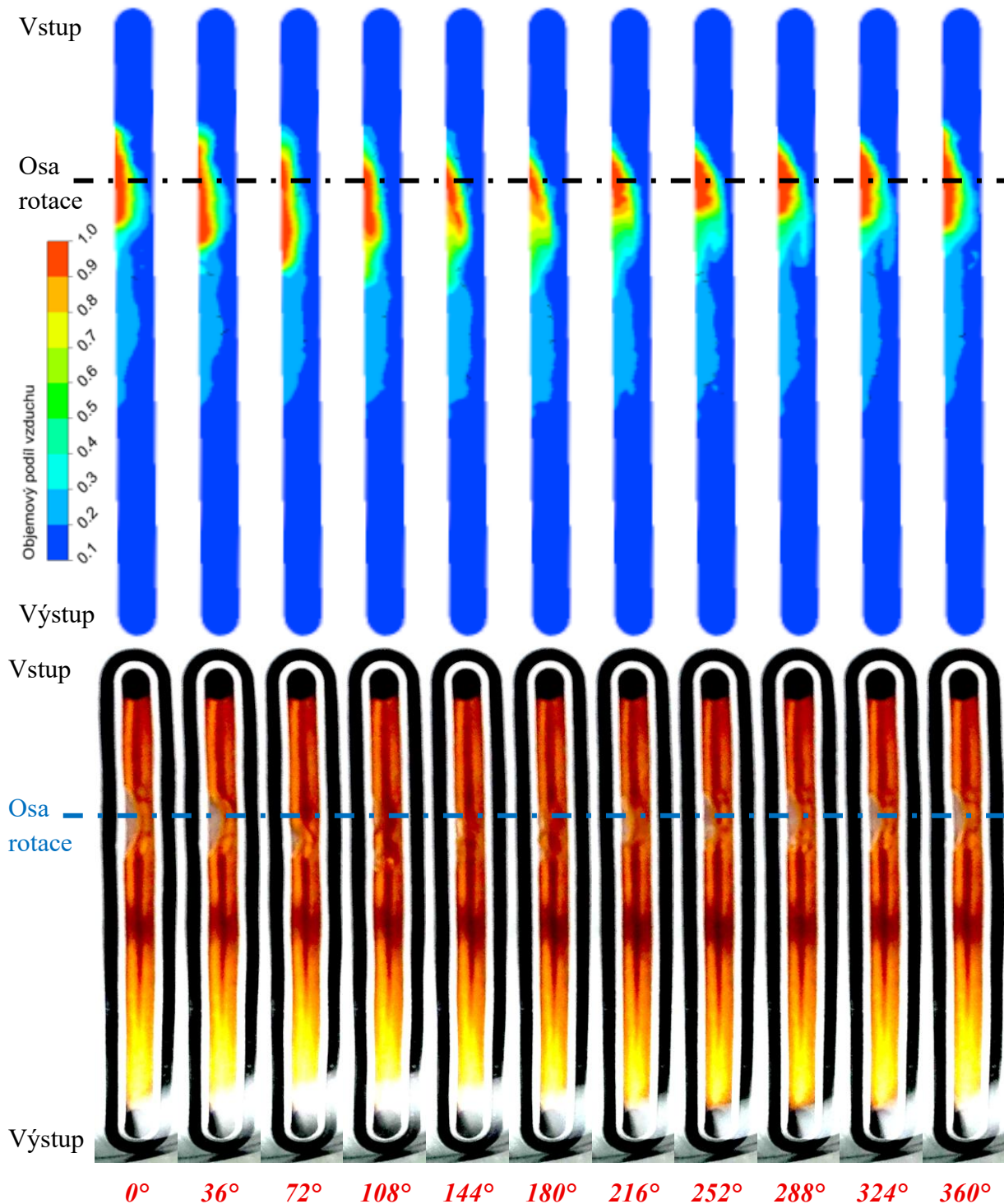
## 5.2 Výsledky pro parametry 1800 ot/min – 2 bar

Graf procentuálního zastoupení olejové fáze na sledované ploše kanálku pro parametry 1800 ot/min – 2 bar je zobrazen na *obrázku 9*. Oproti předchozí variantě je na první pohled patrné, že zastoupení olejové fáze v rámci simulace i experimentálního měření dosahuje vyšších procentuálních hodnot. To odpovídá menší vzduchové kapse, která byla pro tyto parametry zaznamenána. V rámci porovnání experimentu a simulace je pak patrný lehce odlišný charakter změny průběhu. V experimentálním měření lze v oblasti mezi 72° a 180° pozorovat výraznější nárůst procentuálního zastoupení olejové fáze než v případě numerické simulace. Rozdíl absolutních hodnot je kromě odlišného rozložení fází ovlivněn stejně jako v předchozím případě rozdílnou velikostí vyhodnocované oblasti použité při experimentálním a numerickém vyhodnocení.



Obrázek 9: Porovnání procentuálního zastoupení olejové fáze na sledované ploše v rámci experimentu a simulace (1800 ot/min – 2 bar)

Při porovnání obrazových záznamů lze největší rozdíl pozorovat v již zmíněné oblasti mezi  $72^\circ$  a  $180^\circ$ . V rámci experimentálního měření zde dochází téměř k zániku vzduchové kapsy a sledovaná oblast je převážně vyplněna olejovou fází. Tento jev nebyl během numerické simulace pozorován a vzduchová kapsa si zachovala souvislý charakter, přičemž docházelo především ke změně jejího tvaru. Určité zmenšení kapsy je však patrné i v případě simulace. Ve zbývajících částech otáčky vykazují výsledky experimentu a numerického modelu dobrou shodu z hlediska velikosti i polohy vzduchové kapsy.



Obrázek 10: Porovnání rozložení fází experimentu a simulace (1800 ot/min - 2 bar)

## 6 Závěr

Práce se zabývala experimentální a numerickou analýzou vícefázového proudění v mazacím kanálku klikové hřídele při přerušovaném přívodu oleje. V laboratořích společnosti Škoda Auto a.s. byla provedena experimentální měření na speciálně navrženém zkušebním zařízení a současně byl vytvořen numerický model v programu Ansys Fluent umožňující simulaci proudění směsi oleje a vzduchu v rotujícím kanálku.

Porovnání experimentálních a numerických výsledků ukázalo, že vytvořený CFD model dokáže reprodukovat základní charakter rozložení olejové a vzduchové fáze během jedné otáčky klikové hřídele. V případě obou sledovaných provozních stavů byla dosažena dobrá kvalitativní shoda zejména z hlediska velikosti a polohy vznikající vzduchové kapsy. Současně bylo potvrzeno, že charakter vícefázového proudění je významně ovlivněn provozními podmínkami, především otáčkami klikové hřídele a tlakem oleje.

Přestože byly mezi experimentem a simulací zaznamenány určité rozdíly v absolutních hodnotách zastoupení jednotlivých fází a v průběhu jejich změn během otáčky, lze vytvořený numerický model považovat za vhodný nástroj pro analýzu vícefázového proudění v mazacích kanálcích klikových hřídelí. Výsledky práce přispívají k lepšímu pochopení vlivu zavzdušnění oleje a přerušovaného přívodu oleje na rozložení jednotlivých fází uvnitř mazacího kanálku. Získané poznatky mohou přispět k budoucím návrhům a optimalizaci mazacích systémů spalovacích motorů s cílem zvýšení jejich účinnosti, spolehlivosti při současném snížení energetických ztrát.

## Literatura

- [1] BARAN, Bridget A. (Bridget Anne). *Engine lubrication oil aeration* [online]. B.m., 2007 [vid. 2026-03-13]. Thesis. Massachusetts Institute of Technology. Dostupné z: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/38713>
- [2] NIGRÍN, Jiří. *STUDIE PRŮTOKU OLEJE MAZACÍM KANÁLKEM ROTUJÍCÍHO KLIKOVÉHO HŘÍDELE* [online]. B.m., 2024 [vid. 2026-02-12]. b.n. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/176336>
- [3] JERMANN, Filip. *Analýza proudění oleje v mazacím kanálku klikového hřídele* [online]. B.m., 2022 [vid. 2026-02-12]. b.n. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/166690>
- [4] *MAHLE Catalogue, The Influence of Main Bearing Grooves on Bearing Performance, Technical Information* [online]. 2. únor 2018 [vid. 2026-03-08]. Dostupné z: <https://marmotorsport.com/downloads-links/>