

# KLASTR A SIMULACE PROUDĚNÍ S POHYBLIVOU ZÓNOU

## CLUSTER AND FLOW SIMULATION WITH A MOVING ZONE

Milan Schuster

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

### Abstrakt

V energetických strojích je řada konstrukčních uzlů, ve kterých dochází k vzájemnému pohybu tekutiny a pevného tělesa, např. palivové tyče a klastry reaktorů nebo ventily a regulační armatury parních turbín. V příspěvku je stručně naznačena metodika sestavení a řízení simulací proudění v případě s pohyblivou zónou ve výpočtové oblasti, součástí pohyblivé zóny je pevné těleso, jehož pohyb ovlivňuje tlakové poměry v celé výpočtové oblasti. Pro demonstraci postupu simulačních výpočtů byl sestaven výpočtový model zjednodušeného tvaru pohyblivého palivového klastru ve vodící trubce reaktoru, který umožnil zkoumat základní souvislosti vzniku tlakového zatížení tělesa klastru a časový vývoj tlakových pulsů při pohybu klastru.

### Abstract

In power machines, there are a number of structural units in which fluid and solids move relative to each other, such as fuel rods and reactor clusters or valves and steam turbine control valves. The paper briefly outlines the methodology of compiling and controlling flow simulations in the case of a moving zone in the computational area, part of the moving zone is a solid body, whose motion affects the pressure conditions in the entire computational area. To demonstrate the procedure of simulation calculations, a computational model of a simplified shape of a moving fuel cluster in the reactor guide tube was built, which allowed to investigate the basic context of pressure loading of the cluster body and the time evolution of pressure pulses during cluster movement.

### Úvod

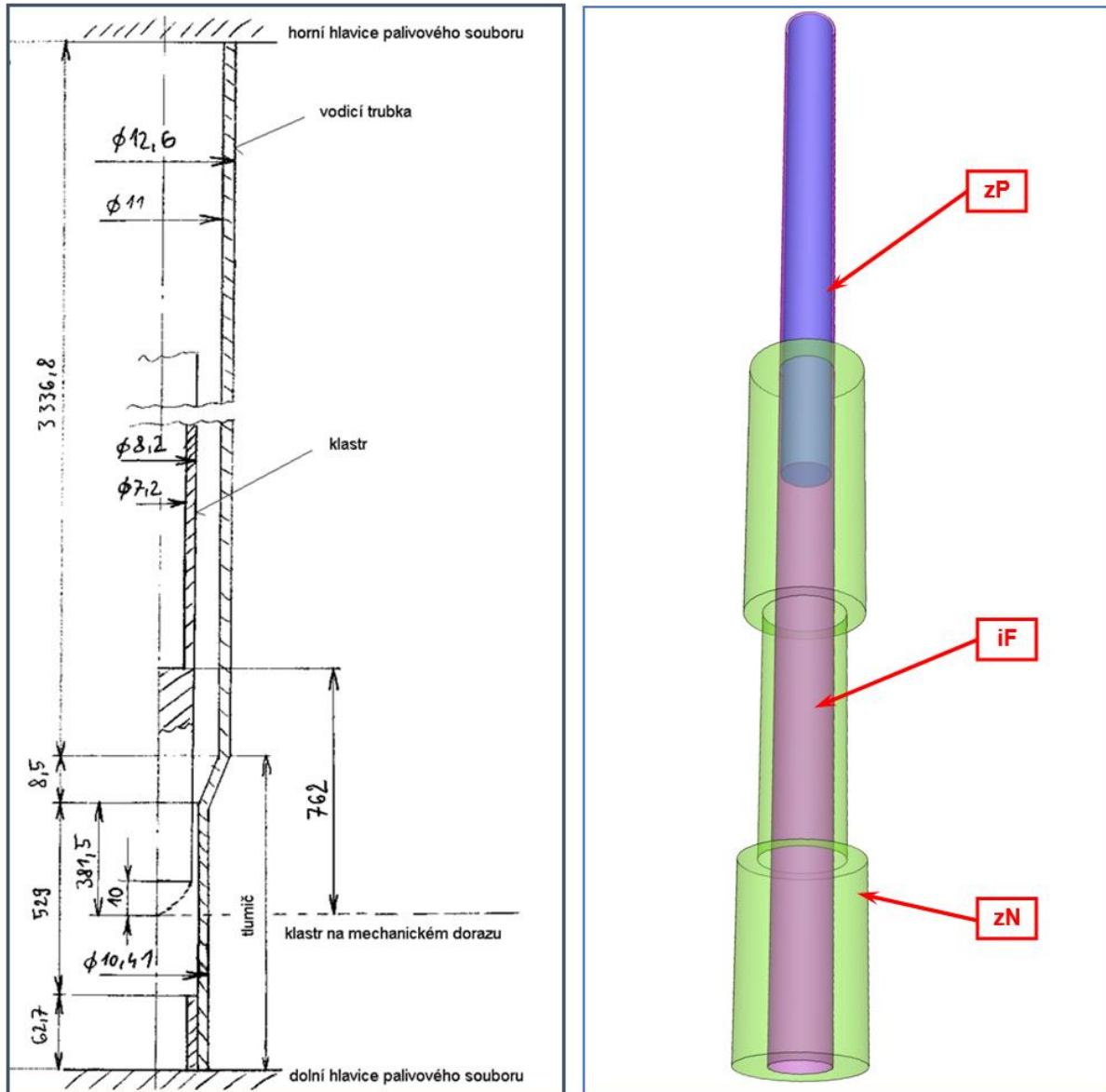
Provoz klasických tepelných i jaderných energetických zařízení je založen na složitých fyzikálně-chemických procesech s nutností řízení a regulace hodnot řady technických veličin. Výpočetní simulace (CFD) umožňují provozní situace modelovat a tím pomáhat zlepšit řídicí a regulační systémy. Příspěvek se věnuje popisu tvorby metodiky řešení CFD simulací tlakového zatížení vybraných komponent regulačních systémů energetického zařízení. Vybraným regulačním systémem pro simulace je pohyb (pád) havarijní tyče (klastru) do aktivní zóny reaktoru při seismické události.

### Základní problematika řešeného jevu s pohybem klastru

Pro potřeby simulací proudění (CFD) je pohyb havarijní tyče při seismické události do aktivní zóny jaderného reaktoru modelován jako pohyb pevného tělesa v odporujícím prostředí proudící kapaliny o vysokém tlaku a teplotě (interval tlaků 12–16 MPa a interval teplot 270–320 °C, pro tlakovodní reaktory typu PWR). Výsledkem pohybu je tlakové zatížení povrchu pohybujícího se tělesa. Lze předpokládat, že velikost tlakového zatížení bude mít časový vývoj ve spojitosti s proměnností regulačního (havarijního) zásahu v důsledku jevů spojených se seismickou událostí.

Zkoumanou úlohou je simulace pohybu regulačního klastru v prostředí vodící trubky vyplněné tlakovou vodou. Na obr. 1 vlevo jsou základní rozměry jedné z variant konstrukčního provedení klastru. Pro simulace byl tvar a rozměry upraveny a zjednodušeny (obr. 1 vpravo). Klaster je modelován jako válcovité těleso zakončené hlavicí s kuželovým, polokulovým nebo plochým čelem (obr. 3). Tekutinové okolí je dáno vnitřním tvarem vodící trubky se stěnou válce se skokovou změnou průměru (modelování seismického zákmitu). Rozměry a tvar geometrie, typ elementů a hustota výpočetní sítě byly voleny také s ohledem na výpočetní náročnost úlohy

nestacionárního výpočtu časově proměnných tlakových polí při pohybu klastru ve vodící trubce. Cílem simulací je získání výsledků popisujících vývoj tlakového pole a rozvoj tlakových pulsů, které mohou vzniknout změnou velikosti tekutinové mezery mezi zasunutým se klastrem a vodící trubkou při vzájemném relativním (příčném) pohybu při seismické události. Příčný pohyb klastru je modelován zúžením vodící trubky.



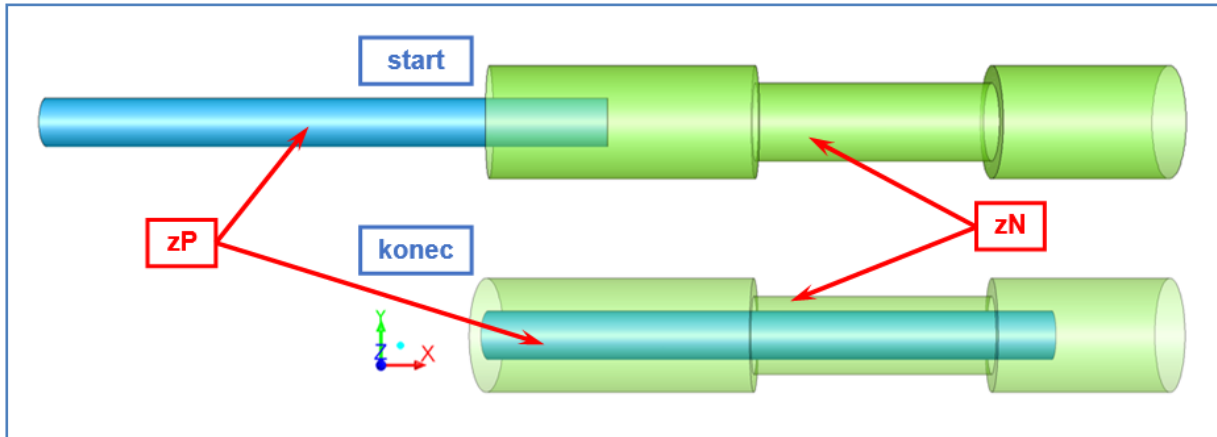
Obr. 1: Model klastru pro simulace – vlevo schématický náčrt varianty klastru pro simulační testy [1], vpravo výpočetní oblast jedné z variant modelu klastru (ploché čelo) [2], naznačena pohyblivá zóna („zP“), nepohyblivá zóna („zN“) a plocha interface („iF“) oddělující obě zóny

### Metodika pohyblivých zón

Cílem je vývoj metodiky CFD simulací pro řešení časových změn v tlakovém poli, které jsou způsobeny pohybem tělesa v tekutině. Očekávaným výsledkem simulací je zjištění vlivu pohybujícího se tělesa na okolí anebo zjištění tlakového zatížení vybraných částí (povrchu) pohybujícího se tělesa.

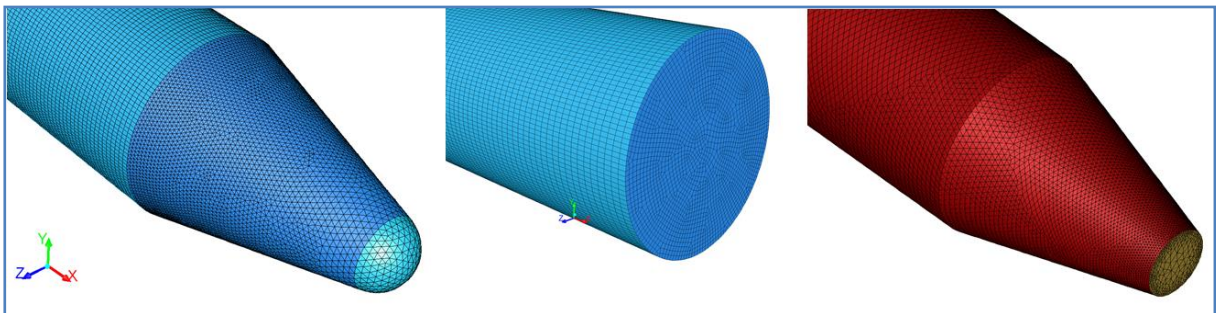
Výpočtový model pro CFD simulace proudění s pohybem vždy obsahuje nepohyblivou zónu tekutinového okolí a jednu (nebo několik) pohyblivých zón. Pohyblivá zóna zahrnuje povrch tělesa – v našem případě klastru. Pohyblivá zóna je v tomto případě dlouhý „tubus“, který je při

simulaci postupně zasouván do objemu nepohyblivé zóny po plochách „interface“ (situace při startu a na konci simulace jsou ukázány na obr. 2). „Virtuální“ plocha interface (na obr. 1 vpravo) zajišťuje přenos dat o vývoji tlakových polí při simulaci mezi oběma typy zón v jednotlivých časových krocích. Simulace přímo řeší probíhající změny tlakových polí při vzájemném postupném pohybu obou zón ve výpočtové oblasti.



Obr. 2: Výpočtový model pohybujícího se klastru – nahoře situace při startu simulace (pohyblivá zóna „zP“ s klastrem vysunuta) a dole situace při konci simulací (pohyblivá zóna „zP“ zasunuta do vodící trubky nepohyblivé zóny „zN“), plocha interface „iF“ není z důvodu přehlednosti zobrazena

Charakter procesu a všechny vlastnosti simulovaného děje jsou pro výpočet zadány pomocí vybraných vhodných typů okrajových podmínek a zvolených hodnot jejich parametrů. Pro vývoj metodiky pohyblivých posuvných zón jsou dále výpočetními testy laděny specifická zadání vzájemného pohybu zón a přenosu dat mezi oběma zónami, zejména kombinace okrajových podmínek na čelech tubusů pohyblivé zóny, umístění a velikost plochy „interface“. Testy byla laděna i startovací a koncová pozice klastru v kanálu při začátku a při ukončení simulace (obr. 2), to je velikost vysunutí pohyblivé zóny s klastrem vzhledem k nepohyblivé zóně.



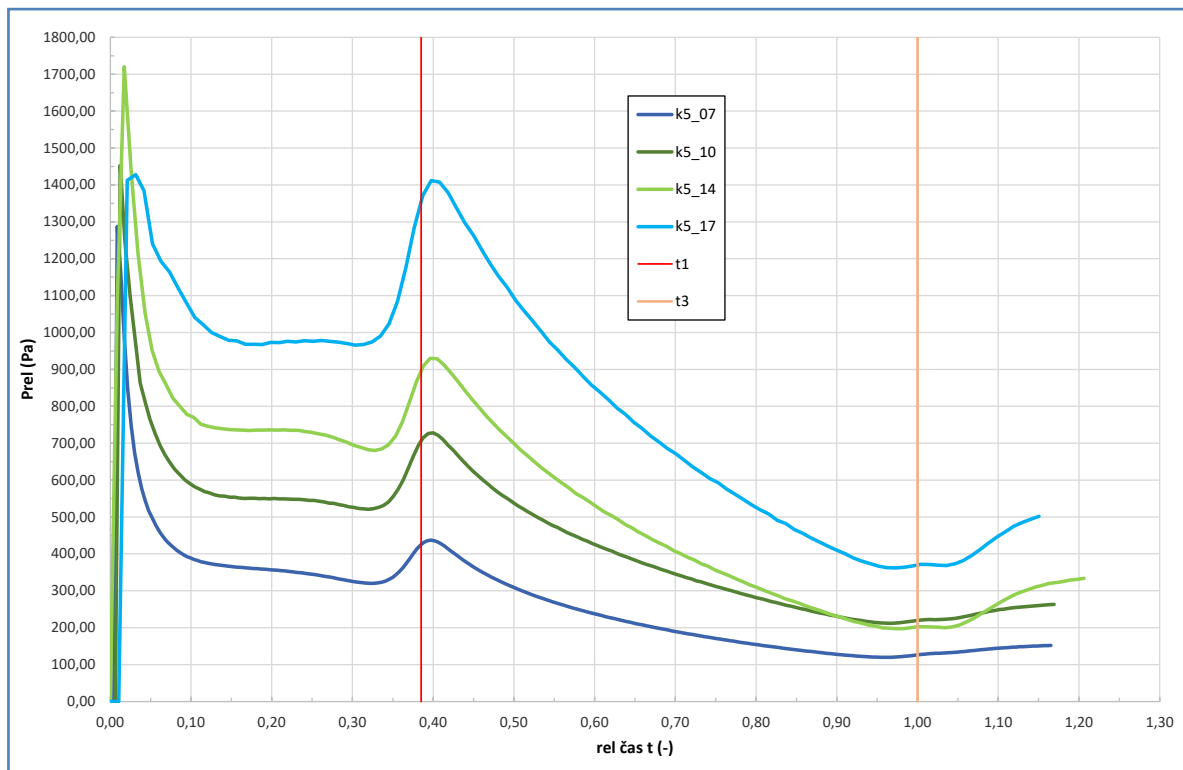
Obr. 3: Varianty tvaru hlavice klastru

Intenzivní proudění kapaliny v úzké mezeře mezi klastrem a vodící trubkou vyvolané relativně rychlým pohybem klastru vytváří další podněty pro studium a zpřesňování způsobu zadávání simulací se zahrnutím výpočetní sítě tzv. mezní (prismatické) vrstvy a případně se zahrnutím tzv. „stěnové funkce“ vhodného typu a parametrů.

### Příklady řešení simulací

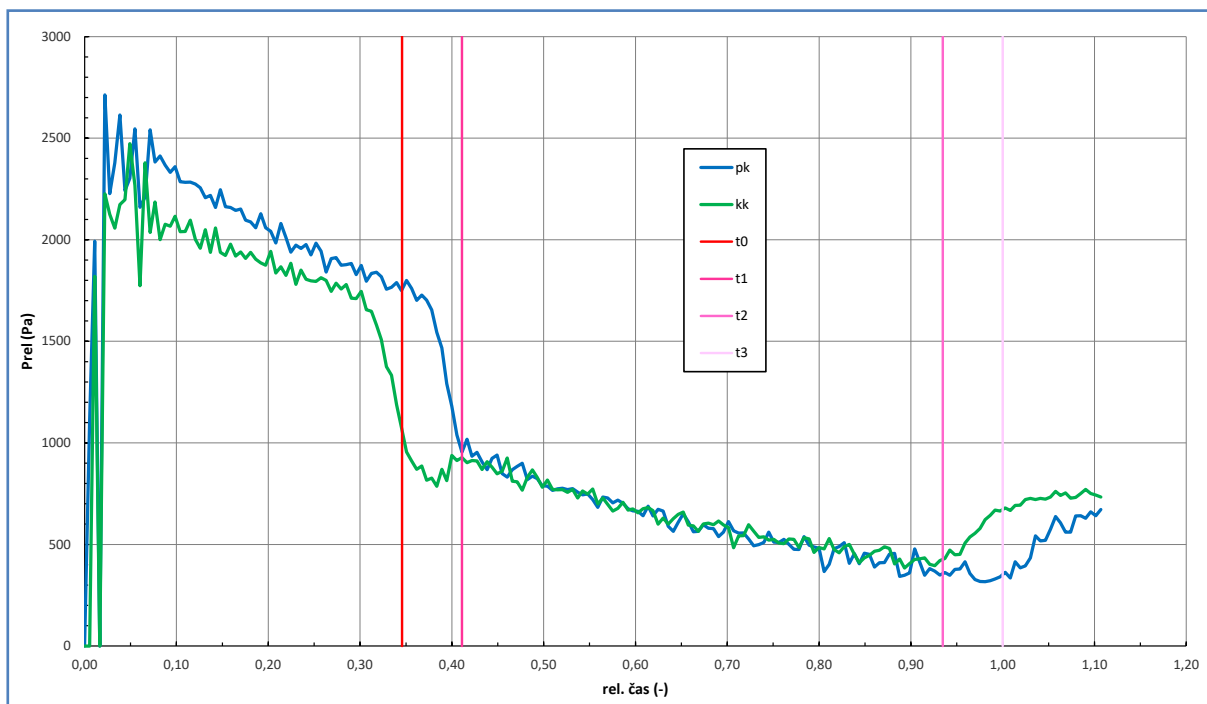
V rámci řešení výzkumného projektu byla vyvíjena metodika „posuvných zón“ použita a testována na několika variantách uspořádání výpočtové oblasti. Cílem ladicích testů bylo ověřit zadání klíčových „kroků“ metodiky simulací. Testy se orientovaly jednak na numerické a simulační parametry a jednak na inženýrsko-technické parametry charakterizující zkoumaný děj chování klastru seismické události.

Různá ověřovací uspořádání výpočtové oblasti s oběma zónami zahrnovala jednak několik tvarů a rozměrů klastru a vodicí trubky (např. obr. 3) a jednak několik variant velikosti, vzájemného umístění a pozic obou zón při startu a při konci simulačních výpočtů. Součástí ověřovacích výpočtů byl test nastavení parametrů okrajových podmínek na hranicích obou zón, test velikosti časového kroku nestacionárních numerických výpočtů vzhledem k velikosti jednotlivých elementů výpočetní sítě a vzhledem k parametrům pohybu klastru, test délky posunu klastru a rozměrů zúžení vodicí trubky. Specifickým testem je nalezení vyhovující velikosti plochy interfejsu pohyblivé zóny, která není v kontaktu s protiplochou interfejsu nepohyblivé zóny.



Obr. 4: Časový vývoj tlakového zatížení čela klastru pohybujícího se ve vodicí trubce kanálu s jedním typem zúžení ( $t_1$  a  $t_3$  jsou časy pohybu v zúžení), výsledky pro několik vybraných hodnot velikosti rychlosti posuvu klastru s plochým čelem ( $k_5$ ) a ukázán vliv rychlosti pohybu na velikost tlakového zatížení

CFD simulace výpočetně řešily pohyb posuvné zóny s klastrem v nepohyblivé zóně vodicí trubky. Výsledkem simulací jsou tlaková pole v celé výpočtové oblasti v každém časovém kroku simulace. Jako jedním výsledkem z mnoha možných výstupů CFD simulací je tlakový puls, který je časovým průběhem tlaku na povrchu klastru při jeho pohybu ve vodicí trubce se zúžením. Pro ilustraci jsou na obr. 4 a obr. 5 uvedeny průběhy tlakových pulsů pro některé varianty testovacích výpočtů. Na obr. 4 je průběh tlaku na čele plochého klastru při jeho pohybu ve vodicí trubce s různými hodnotami rychlosti posuvu. Na obr. 5 je ukázán vliv tvaru čela klastru na hodnoty a časový průběh tlaku na čele klastru po dobu jeho posunu v trubce. Obdobné grafy jsou i výsledkem simulací i ostatních variant a kombinací výpočtových modelů pohybujícího se klastru. Další možnosti pro popis interakce klastru s okolím mohou být například výsledky ve formě map (izočar) tlakových polí v různých částech výpočtové oblasti, hodnoty tlaku ve vybraných místech klastru a vodicí trubky atd.



Obr. 5: Časový průběh tlakového zatížení pro dvě varianty modelu klastru pohybujícího se přes zúžení ve vodící trubce kanálu stejnou rychlostí, dva typy čela klastru (kk – kuželové čelo, pk – ploché čelo), časy  $t_0$  až  $t_3$  určují okamžiky posunu obou modelů v zúžení vodící trubky, graf ukazuje vliv tvaru čela klastru na průběh tlakového zatížení na čelní ploše klastru, příčiny vzniku drobných nepravidelných změn hodnot tlakových průběhů (pilovitost) jsou předmětem dalších výzkumů

### Další postupy řešení

Vyvíjená metodika posuvných zón klastru a jeho okolí, která využívá možností CFD simulací pomocí komerčního software, je využitelná i pro studium dalších obdobných jevů v energetických zařízeních, ve kterých nastává vzájemný pohyb jeho částí. Jedná se například o pohyb regulačních armatur (ventilů ap.), kde za určitých tvarových a rozměrových podmínek lze pohyb kuželky simulovat pomocí posuvných zón.

### Závěr

V příspěvku jsou shrnuty průběžné výsledky výzkumného projektu zaměřeného na vývoj metodiky simulací tlakového zatížení regulačního klastru aktivní zóny reaktoru při seismické události. Dosavadní poznatky při vývoji a ladění metodiky simulací modelů s posuvnými zónami a ověřovací testy simulací ukazují na relativní složitost zkoumaného děje simulacemi. Dokazuje to např. obr. 5, kde oba grafy tlakových zatížení jsou neuhlazené, mají určité nepravidelné průběhy a vyskytují se u nich drobné náhodné změny jejich hodnot (pilovitost). Další testy se proto zaměřují na sledování možného vlivu souhry velikosti elementů sítě, velikosti časového kroku a jevů proudění kapaliny v úzké mezeře mezi povrchy klastru a vodící trubky.

Postupný výzkum problematiky přinesl průběžné výsledky: odladěný výpočtový model pohyblivého klastru ve vodící trubce pro několik variant tvaru a rozměrů klastru a pro několik variant rychlosti pohybu klastru. Dále přinesl sadu výsledkových dat popisujících časový vývoj tlakového zatížení a pulsů vznikající při pohybu klastru při simulované seismické události pomocí proměnného zúžení vodící trubky.

Výsledky výzkumů CFD simulací pohybu klastru metodou posuvných zón jsou využitelné při dalším výzkumu dynamických procesů a namáhání klastru při seismické události. Užitečnost vyvíjené metodiky simulací a jejích výsledků je jednoznačně dána požadavky MBS simulací dynamiky klastrů v navazujících výzkumných projektech [1]. Výsledky CFD simulací nejčastěji ve formě časového průběhu hodnot tlaku na povrchu klastru při daném seismickém výkmitu jsou nutné jako vstupní data pro vytváření sofistikovaných multibody modelů palivových kazet a klastrů.

Z výzkumnického hlediska by byla přínosná konstruktivně pojatá konfrontace výsledků CFD simulací pohybu klastru s výsledky experimentů – ideálně přímo experimentálně podchytené seismické události.

### **Poděkování**

Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného projektu Institucionální podpory na rozvoj výzkumné organizace.

### **Literatura**

- [1] Polach, P., Hajžman, M. (2006): *Multibody model pohonu LKP-M/3 jaderného reaktoru VVER 1000 pro určení limitních deformací vodících trubek palivového souboru*. Výzkumná zpráva, VYZ 0880/06, ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Plzeň.
- [2] Schuster, M. (2018): *Simulace proudění v regulačních orgánech energetických strojů – I. Vymezení problému*. Výzkumná zpráva, VYZ-VZ-36/18/027, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Plzeň.