

# KONTROLY JADERNÉHO PALIVA

## NUCLEAR FUEL INSPECTIONS

Martina Malá <sup>a)</sup>, Marcin Kopec <sup>a)</sup>, Vítězslav Matocha <sup>b)</sup> a Ondřej Pašta <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Centrum výzkumu Řež s.r.o.

<sup>b)</sup> ÚJV Řež, a. s.

### Abstrakt

Ke komponentám a zařízením, které prochází pravidelnými kontrolami během odstávek bloků jaderných elektráren, patří i jaderné palivo. I když je palivo v reaktoru jen několik let, je velmi důležité monitorovat jeho stav a chování, neboť má vliv na bezpečný a spolehlivý provoz bloku. Předložený článek popisuje, jakým způsobem je palivo monitorováno během odstávek bloků jaderných elektráren. Ke sledovaným parametrům patří rozměrová stabilita palivových souborů, korozní stav pokrytí palivových proutků a komponent palivových souborů a celkový vzhled palivových souborů.

### Abstract

Nuclear fuel belongs to components and installations that are inspected during refuelling outages of nuclear power plants. The nuclear fuel stays in a reactor core only few years, but it is still important to monitor its status and behavior, because it influences a safe and reliable operation of the unit. Given paper describes the way of nuclear fuel monitoring during the outages of power plants. Among monitored parameters, there are dimensional stability of fuel assemblies, corrosion status of a fuel rod cladding and fuel assembly components, and overall looks of fuel assemblies.

### Důvody monitorování paliva během odstávky bloku

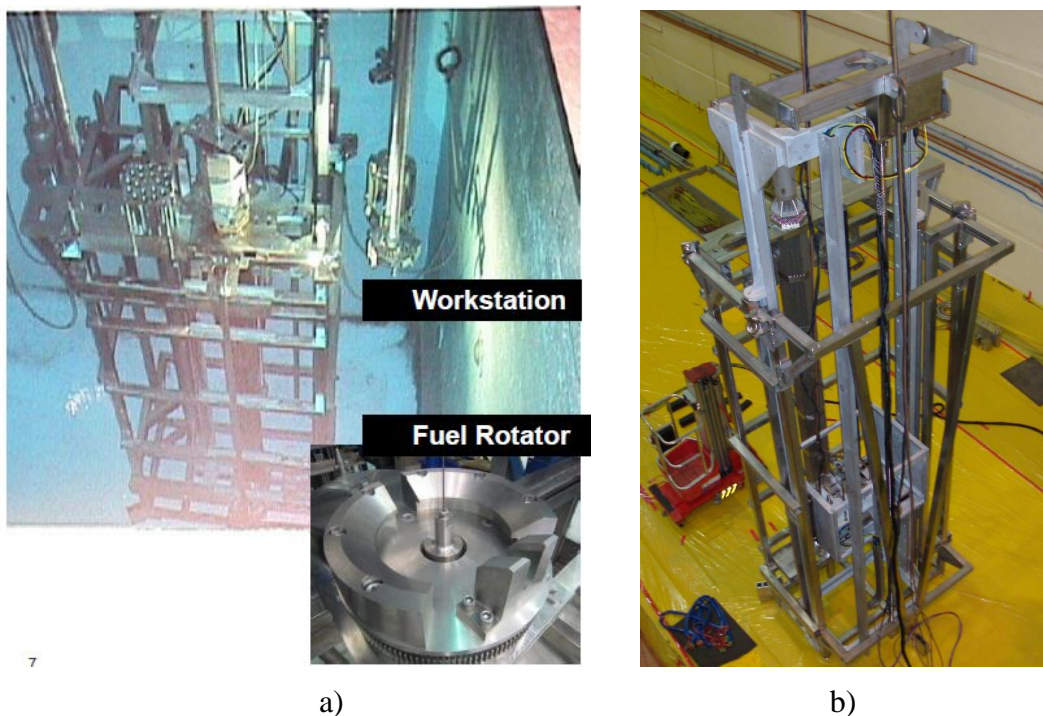
Pro provoz jaderné elektrárny je důležité zajistit bezpečný a spolehlivý provoz reaktoru, a proto je důležité efektivně monitorovat také stav paliva, které se v reaktoru nachází a které během provozu pracuje za vysokých teplot, tlaků a průtoku chladiva reaktorem. U reaktorů provozovaných v ČR, tedy VVER-440 (V213) se jedná o parametry 267-297 °C, tlak 12,3 MPa a průtok aktivní zónou 42.000 m<sup>3</sup>/h a u VVER-1000 (V320) o parametry 290-320 °C, tlak 15,7 MPa a průtok aktivní zónou 85.000 m<sup>3</sup>/h [1].

V průběhu provozu dochází k vyhořívání paliva a souvisejícím změnám, dochází nejenom k úbytku štěpného materiálu uvnitř palivových tablet, ale také ke změnám souvisejícím s obdrženou dávkou (změny na úrovni mikrostruktury materiálu), které ovlivňují také rozměrovou stabilitu palivových souborů. Ozáření ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu pokrytí palivových proutků (pevnost v tahu, tvárnost, creep) i rozměrovou stabilitu palivových souborů. Dochází k průhybu, zkrutu a růstu palivových souborů. Svůj vliv má také okolní prostředí, tedy chladivo. Během provozu dochází na pokrytí paliva k tvorbě oxidické vrstvy, která snižuje přestup tepla z paliva do chladiva a ovlivňuje mechanické vlastnosti pokrytí. Na pokrytí může docházet k úsadám, které mohou ovlivňovat rozložení výkonu v aktivní zóně, tvorbu oxidické vrstvy a přestup tepla z paliva do chladiva (tedy výslednou teplotu pokrytí). Průtok chladiva aktivní zónou způsobuje vibrace palivových souborů a také proutků, což může vést až k poškození palivových proutků (tj. prodření pokrytí a únik štěpných produktů do chladiva). I když palivo v reaktoru pracuje jen několik let a je pak skladováno v bazénech a následně suchých obalových souborech, je důležité monitorovat jeho stav a chování, neboť jeho stav pak může ovlivňovat další nakládání s palivem, např. zavezení do další kampaně či zavezení do suchých obalových souborů. Monitorování stavu paliva má také přímou souvislost se zajištěním jaderné bezpečnosti a radiační ochrany elektrárny.

## Metody monitorování paliva na jaderných elektrárnách

Způsobů monitorování stavu paliva je několik a závisí na typu paliva, způsobu provozování reaktoru, chování paliva během provozu a požadavcích jaderného dozoru. Dalším důvodem k provádění inspekcí paliva je např. zavezení testovacích souborů, tzv. LTA (Lead Test Assembly) [2] nebo zavezení nového typu paliva do tzv. pilotního provozu [3]. V případě, že palivo pracuje dle očekávání a nevyskytují se netěsnosti, tedy úniky štěpných produktů z paliva do chladiva, či jiné anomálie, stačí provádět průběžný monitoring pro ověřování jeho stavu. To zahrnuje např. měření rozložení výkonu v reaktoru, měření doby pádu regulačních orgánů, měření třecích sil během pádu regulačních orgánů a měření aktivity chladiva primárního okruhu. Během vyvážení paliva z reaktoru je prováděn online sipping, který slouží k posouzení, zda je palivový soubor těsný.

Na některých jaderných elektrárnách jsou prováděny také pravidelné inspekce paliva s cílem průběžně sledovat jeho stav. Takový program je zaveden např. na elektrárně Temelín [4], dalšími elektrárnami jsou např. Jihoukrajinská (Ukrajina), Loviisa (Finsko), bloky v USA. Inspekce paliva jsou prováděny pomocí speciálních zařízení, tzv. inspekčních stendů, např. stendy pro palivo typu VVER-1000 používané na elektrárně Jihoukrajinská (obr. 1a) a Temelín (obr. 1b). Vzhled a vybavení stendu pak závisí na výrobci a typu paliva, pro který je určen. V základu tak inspekční stend umožňuje vizuální kontrolu palivového souboru a kontrolu geometrie (průhyb, zkrut a růst). To vše pomocí podvodního a radiačně odolného vybavení.



Obr. 1: a) Inspekční stend firmy Westinghouse na JE Jihoukrajinská [5]; b) inspekční stend na JE Temelín [6]

V případě, že se vyskytnou neočekávané stavy, je průběžný monitoring paliva doplňován o další způsoby, jak zjistit příčiny pozorovaného stavu a stanovit možná nápravná opatření. Inspekční stendy tak mohou být doplněny o možnost nalezení netěsného palivového proutku v konkrétním palivovém souboru, rozebrání palivového souboru a vyjmutí palivového proutku ze souboru, detailní vizuální kontrolu vyjmutého palivového proutku, změření tloušťky oxidické vrstvy na pokrytí palivového proutku, změření průměru palivového proutku a další. Možností je více, avšak záleží také na možnostech elektrárny, neboť ne každá metoda kontroly paliva je aplikovatelná v dané odstávce bloku. Některé specifické analýzy jsou prováděny až po dochlazení palivového souboru a jeho převozu do horkých komor [7].

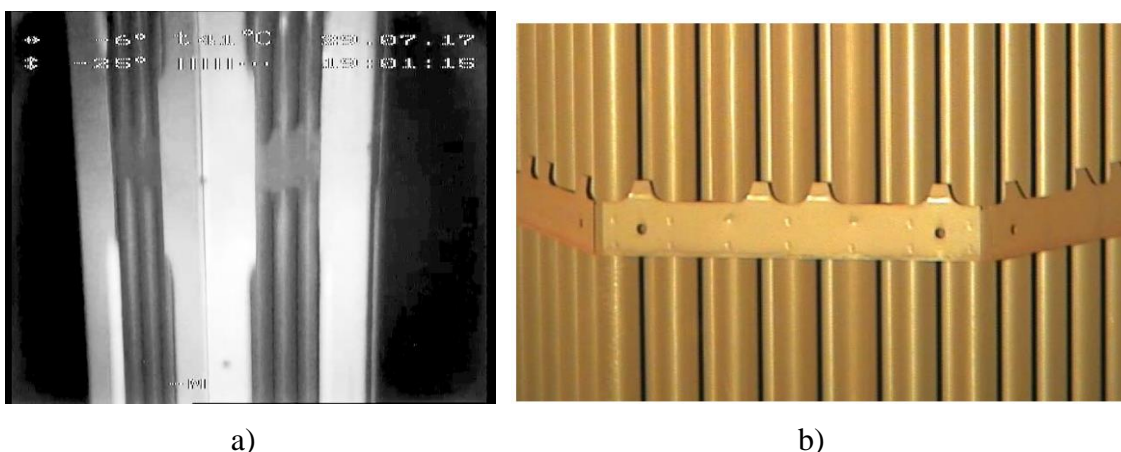
## Vizuální kontrola palivových souborů

Vizuální kontrola zahrnuje kontrolu celkového vzhledu palivového souboru, viditelných periferálních palivových proutků, distančních mřížek a dalších komponent souboru. Kontrolován je také korozní stav, případná přítomnost úsad, nečistot, cizích předmětů a jiných anomálií. Cílem základní vizuální kontroly je tedy zjistit, v jakém stavu se palivový soubor po (další) odpracované kampani nachází a zda jeho stav odpovídá očekávání. Pakliže je vizuální kontrola zaměřena na palivové soubory vykazující nějaké anomálie v chování (např. netěsnost, delší doba pádu klastru, potíže při vyvážení z aktivní zóny, nerovnoměrnost v rozložení výkonu atd.), je cílem vizuální kontroly zjistit příčinu anomálního chování (např. identifikovat netěsný proutek, najít poškození pokrytí netěsného proutku, najít úsady na pokrytí proutku, zjistit větší průhyb souboru či proutků, najít poškozené části souboru atd.). Korozní stav palivových proutků, distančních mřížek a dalších komponent souboru může být monitorován z důvodu zjišťování výskytu významných anomálií, které by bez změny výrobního procesu nebo chemického režimu chladiva vedly ke vzniku netěsností paliva.

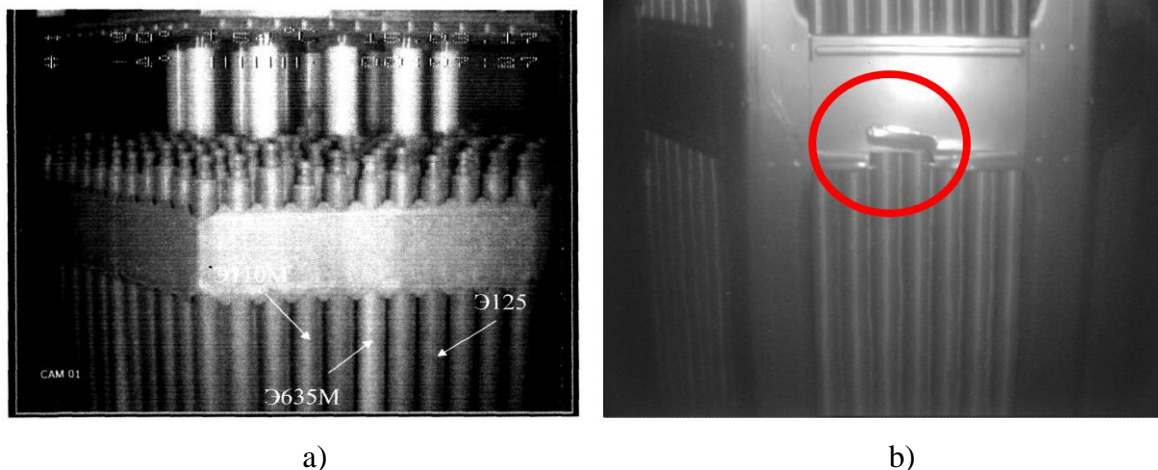
Včasně odhalení mechanického poškození na proutcích a dalších komponentách souborů může zamezit vzniku netěsnosti nebo vzniku cizích předmětů (např. odlomený kus distanční mřížky), které by mohly poškodit palivo či další části primárního okruhu. Bez povědomí o tom, zda je na palivovém souboru nějaké poškození a jaké, není možné navrhnout ani provést relevantní nápravná opatření.

Vizuální kontroly jsou prováděny pomocí podvodní radiačně odolné kamery. Obvykle jsou používány černobílé kamery, neboť obsahují součásti s vyšší radiační odolností, tj. neobsahují CCD prvky, které jsou na záření citlivější. Barevné kamery jsou také používány, ale většinou mají nižší radiační odolnost, za to pak větší zoom.

Vizuální kontrola je prováděna převážně u těch souborů, které mají viditelné proutky, tj. nemají obálku. Palivo typu VVER-1000 je bezobálkové, palivo typu VVER-440 je obojího typu, tedy s obálkou i bez obálky (viz obr. 2a). U paliva typu VVER-440 s obálkou je možné provést vizuální kontrolu až po demontáži obálky (viz obr. 2b), jak je prováděno na JE Loviisa ve Finsku [8, 9]. Na obr. 3 jsou znázorněny příklady kontrol paliva typu VVER-1000 na ruských blocích Balakovo a Kalinin, kde na Balakovské byl kontrolován palivový soubor s novými typy proutků [10] a na Kalininské bylo identifikováno poškození distanční mřížky z manipulací s palivem vedoucí k následné modifikaci designu paliva (použití mřížek s tzv. kremelskou stěnou) [11].



Obr. 2: a) Palivový soubor VVER-440 bez obálky [2]; b) kontrola paliva na elektrárně Loviisa – palivový soubor po demontáži obálky [9]



Obr. 3: a) Kontrola palivového souboru VVER-1000 na JE Balakovo s novými typy proutků [10]; kontrola palivového souboru VVER-1000 na JE Kalinin s identifikací poškození [11]

Výstupem vizuální kontroly paliva je jednak porovnání stavu s očekáváním a ověření, že je palivový soubor vhodný pro zavezení do další kampaně, ale také např. návrh nápravných opatření či dalších kroků pro zlepšení stavu paliva. Výstupy jsou důležité nejenom pro provozovatele elektrárny (např. zmírnění konzervatismu v provozu bloku, optimalizace chemického režimu, optimalizace manipulací s palivem či překládkových schémat), ale také pro výrobce paliva, který může na základě těchto kontrol provést např. úpravy v designu paliva [12].

#### **Kontrola rozměrové stability palivových souborů**

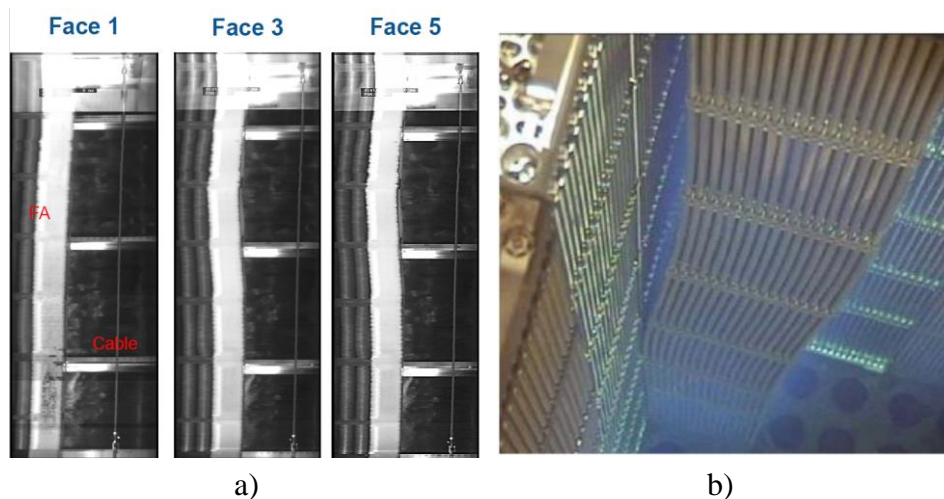
Průhyb a zkrut bývají monitorovány z důvodu sledování rezerv do poškození paliva během manipulací, dále pro sledování mezer mezi palivovými soubory v aktivní zóně během provozu, které mají vliv na průtok chladiva, a dále také mohou podpořit optimalizaci vsázek tam, kde je potřeba přistoupit ke snížení průhybů palivových souborů jejich umístěním do vybraných pozic v aktivní zóně.

Růst palivových souborů je monitorován např. pro optimalizaci polohy bloku ochranných trub reaktoru, který během provozu přitlačuje soubory shora a brání jim ve volném růstu směrem nahoru. To má pak vliv na jejich průhyb. Růst palivových proutků může být sledován z důvodu optimalizace neurčitosti uvažované při prověřování kritérií palivového proutku vstupujících do bezpečnostního hodnocení vsázek.

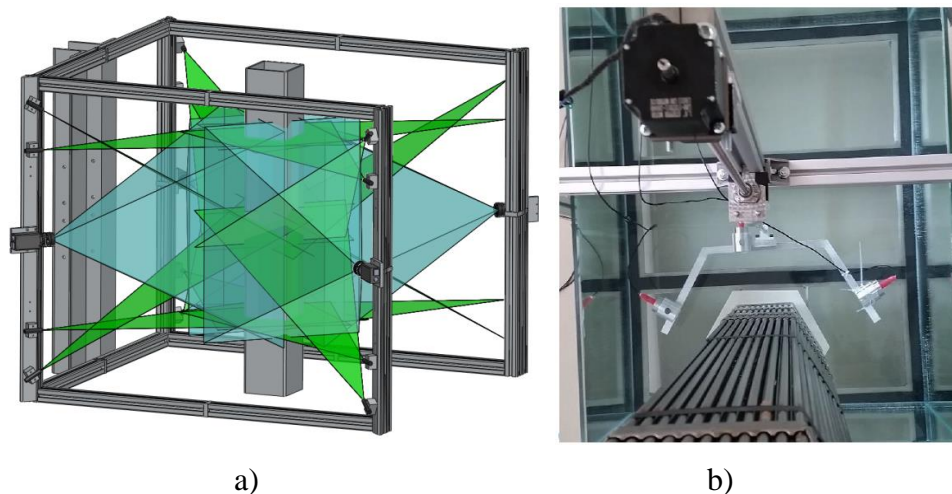
Kontrola rozměrové stability palivového souboru je prováděna během odstávky bloku v bazénu buď pomocí kamerového systému (viz obr. 4), nebo pomocí měřicích zařízení, např. na bázi ultrazvuku či laseru (viz obr. 5).

V obou případech měření geometrie je nutné provést správné vyhodnocení naměřených dat. Pokud je měření prováděno pomocí kamerového systému, vyhodnocení je pak prováděno z obrazu. V takovém případě je většinou poblíž palivového souboru umístěné buď pravítko, nebo jiný předmět sloužící jako referenční hodnota. Pokud je měření prováděno pomocí měřicích sond (ultrazvuk, laser), jsou pak zapotřebí SW nástroje pro vyhodnocení naměřených dat (např. ve formátu \*.txt). Výsledkem jsou průhybové křivky, jak je zobrazeno v obr. 4.

Výsledkem měření rozměrů palivových souborů jsou tedy informace vstupující do analýz vsázek, neboť např. růst palivových souborů má vliv na jejich průhyb a směr a velikost průhybu palivových souborů má vliv na velikost mezer mezi soubory a na rozložení výkonu v aktivní zóně.



Obr. 4: Měření průhybu palivového souboru pomocí kamery: a) tři strany palivového souboru v obraze kamery [13]; b) kamerový záběr na prohnutý palivový soubor na JE Ringhals [14]



Obr. 5: a) Zařízení Newton Labs QUAD400UW pro kontrolu rozměrů palivového souboru [15]; b) měření geometrie makety souboru pomocí ultrazvuku v Centru výzkumu Řež [16]

## Shrnutí

Předložený článek shrnuje základní způsoby kontrol jaderného paliva na jaderných elektrárnách, které jsou důležité jednak z důvodů sledování stavu paliva po odpracovaných kampaních v porovnání s očekávanými danými výrobcem paliva a provozní zkušeností, a jednak z důvodů zjištění příčin anomálního chování paliva a ke stanovení možných nápravných opatření pro další provoz.

## Literatura

- [1] Heraltová, L.: *Jaderné reaktory a jak to vlastně vše funguje*. Prezentace, Katedra jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení v Praze.
- [2] Höglund, J., Riznychenko, O., Latorre, R., Lashevych, P. (2011): Performance of the Westinghouse WWER-1000 Fuel Design. *9th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Burgas (Bulgaria), pp. 196-202. ISSN 1313-4531
- [3] Simonov, A. N., Polyakova, Y., Marakulin, K. (2019): The Results of the Expanded Pilot Operation of Assemblies of Third Generation at Unit 4 of Kola NPP. *13th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute

- for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 229-239. ISSN 1313-4531
- [4] Malá, M., Kopeć, M., Pašta, O., Matocha, V., Ernst, D., Dzurus, M. (2020): *Monitorování stavu paliva během životnosti jaderné elektrárny*. *Jaderná energie*, roč. 1 (66), č. 4, str. 66-68. ISSN 2336-4157
- [5] Önnby, C. (2015): Performance of the Westinghouse WWER-1000 fuel design. *11th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Varna (Bulgaria), presentation.
- [6] Malá, M. (2016): An Overview of the PIIP program on TVSA-T fuel at Temelín NPP. *International Conference VVER 2016 Power Uprates, Long Term Operation and New Builds*, ČNS, Praha, poster.
- [7] Lafchiev, K., Johnson, K., Jädernäs, D., Shevyakov, A., Ugryumov, A. (2019): PIE of Three TVEL Fuel Rods Irradiated in Ringhals 3, Sweden. *13th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 341-352. ISSN 1313-4531
- [8] Peri, V. (2017): Recent Fuel Related Activities at the Loviisa Nuclear Power Plant, *12th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 71-76. ISSN 1313-4531
- [9] Lehtinen, I.-V. (2015): Poolside Inspections at Loviisa NPP. *11th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Varna (Bulgaria), presentation.
- [10] Vasilchenko, I. N. (2017): Objectives of further development of WWER reactor cores. *12th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 125-130. ISSN 1313-4531
- [11] Molchanov, V. (2017): Project “Zero Failure Level” Status, Problems, Tasks for Future. *12th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Nesebar (Bulgaria), pp. 405-414. ISSN 1313-4531
- [12] Ernst, R., Ernst, D., Milisdörfer, L. (2010): *Palivo Westinghouse – r. 2000 až 2010*. *Bezpečnost jaderné energie*, roč. 18, č. 11/12, str. 349-356. ISSN 1210-7085
- [13] Malá, M., Klouzal, J., Dostál, M. (2015): CVR / UJV Support to Fuel Inspections at Temelín NPP. *11th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Varna (Bulgaria), presentation.
- [14] Franzén, A. (2017): *Evaluation of Fuel Assembly Bow Penalty Peaking Factors for Ringhals 3 – Based on a Cycle Specific Core Water Gap Distribution*. Master Thesis, Uppsala Universitet, Uppsala (Sweden). ISSN 1650-8300
- [15] Newton Labs (2021): *Detecting Twisted and Bowed PWR and BWR Fuel Assemblies*, [online]. Available at: [https://newtonlabs.com/nuke\\_QUAD400.htm](https://newtonlabs.com/nuke_QUAD400.htm)
- [16] Kopeć, M., Malá, M., Klouzal, J. (2018): Ultrasonic System for Nuclear Fuel Geometrical Changes Evaluation. *TOPFUEL 2018 Reactor Fuel Performance*, Praha, poster.