

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-16-0288****Nové metódy pre systémy zvyšovania bezpečnosti jadrového palivového cyklu**Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD.**Príjemca **Slovenská technická univerzita v Bratislave - Fakulta elektrotechniky a informatiky**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Na projekte priamo nespupracovalo zahraničné pracovisko.

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

Počas projektu neboli udelené ani podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory.

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

[1] OSUSKÝ, Filip - ČERBA, Štefan - LÜLEY, Jakub - VRBAN, Branislav - NEČAS, Vladimír. Experimental measurement of gamma ray energy spectrum of the Pu-Be neutron source. In Power engineering 2018. Energy-Ecology-Economy 2018 : 14th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. June 5-7, 2018. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2018, S. 39-43. ISBN 978-80-89402-98-4. V databáze: WOS: 000485101200007.

[2] LÜLEY, Jakub - VRBAN, Branislav - ČERBA, Štefan - OSUSKÝ, Filip - ILIŤ, Tomáš - NEČAS, Vladimír. Characterization of moderation properties of demiwater. In Power engineering 2018. Energy-Ecology-Economy 2018 : 14th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. June 5-7, 2018. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2018, S. 23-27. ISBN 978-80-89402-98-4. V databáze: WOS: 000485101200004.

[3] VRBAN, Branislav - ČERBA, Štefan - LÜLEY, Jakub - NEČAS, Vladimír. Current status of the WWER-440 engineering core calculations at the Slovak University of Technology in Bratislava : Comparison of ANDREA and KASKAD package results. In Power engineering 2018. Energy-Ecology-Economy 2018 : 14th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. June 5-7, 2018. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2018, S. 13-17. ISBN 978-80-89402-98-4. V databáze: WOS: 000485101200002.

[4] LÜLEY, Jakub - ČERBA, Štefan - VRBAN, Branislav - OSUSKÝ, Filip - ILIŤ, Tomáš - NEČAS, Vladimír - HAŠČÍK, Ján. Verification of neutron source spectrum definition with diffusion length and fermi age. In NUPP 2018 : 2nd International conference on nuclear

- power plants: Structures, risk and decommissioning. London, United Kingdom. June 11-12, 2018. Glasgow : ASRANet Ltd, 2018, S. 7-13. ISBN 978-1-9996144-0-9.
- [5] OSUSKÝ, Filip - ČERBA, Štefan - LÜLEY, Jakub - VRBAN, Branislav - HAŠČÍK, Ján - NEČAS, Vladimír. Efficiency estimation of NaI(Tl) detector for the purpose of manganese sulphate bath experiment. In NUPP 2018 : 2nd International conference on nuclear power plants: Structures, risk and decommissioning. London, United Kingdom. June 11-12, 2018. Glasgow : ASRANet Ltd, 2018, S. 34-39. ISBN 978-1-9996144-0-9.
- [6] OSUSKÝ, Filip -- VRBAN, Branislav -- ČERBA, Štefan -- LÜLEY, Jakub -- NEČAS, Vladimír, Effective dose calculation in the VVER-440 reactor maintenance area. In Proceedings of the twenty-sixth symposium of AER. Budapest: AER, 2018, ISBN 978-963-7351-30-3.
- [7] OSUSKÝ, Filip - ČERBA, Štefan - LÜLEY, Jakub - VRBAN, Branislav - NEČAS, Vladimír. Estimation of the gamma emission spectrum of Pu-Be source. In NENE 2018 [elektronický zdroj] : 27th International conference nuclear energy for new Europe. Portorož, Slovenia. September 10-13, 2018. Ljubljana : Nuclear Society of Slovenia, 2018, DVD, Art. no. 404 [9] s. ISBN 978-961-6207-45-4.
- [8] LÜLEY, Jakub - VRBAN, Branislav - ČERBA, Štefan - OSUSKÝ, Filip - NEČAS, Vladimír. Measurement of the neutron emission rate by the manganese sulphate bath technique. In NENE 2019 [elektronický zdroj] : 28th International conference nuclear energy for new Europe. Portorož, Slovenia. September 9-12, 2019. Ljubljana : Nuclear Society of Slovenia, 2019, Art. no. 619 [8] s. ISBN 978-961-6207-47-4.
- [19] LÜLEY, Jakub - ČERBA, Štefan - VRBAN, Branislav - OSUSKÝ, Filip - SLUKA, Ondrej. Radiation monitoring system using unmanned aerial vehicles. In Radiation Protection Dosimetry. Vol. 186, Iss. 2-3 (2019), s. 337-341. ISSN 0144-8420 (2019: 0.773 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.363 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85082881443 ; CC: 000530582200039 ; DOI: 10.1093/rpd/ncz229.
- [10] VRBAN, Branislav - LÜLEY, Jakub - ČERBA, Štefan - OSUSKÝ, Filip - NEČAS, Vladimír. The measurement of diffusion length of demi water by neutron activation of foils vs. helium-3 neutron detector. In APCOM 2019 : 25th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 19-21, 2019. 1. ed. Melville : AIP Publishing, 2019, Art. no. 020053 [5] s. ISBN 978-0-7354-1873-8. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85070558382 ; WOS: 000535987500053.
- [11] ČERBA, Štefan - VRBAN, Branislav - LÜLEY, Jakub - OSUSKÝ, Filip - FLAMÍKOVÁ, Dorota - NEČAS, Vladimír. Optimization of the operation process at the diffusion length and fermi age measurement facility. In Journal of nuclear research and development. No. 18 (2019), s. 43-48. ISSN 2247-191X.
- [12] ČERBA, Štefan - LÜLEY, Jakub - VRBAN, Branislav - OSUSKÝ, Filip - NEČAS, Vladimír. Verification of radiation doses at the diffusion length measurement facility of STU. In NUPP 2019 : 3rd International conference on nuclear power plants: Structures, risk and decommissioning. London, United Kingdom. June 10-11, 2019. Glasgow : ASRANet Ltd, 2019, [7] s. ISBN 978-1-9996144-4-7.
- [13] ČERBA, Štefan - LÜLEY, Jakub - VRBAN, Branislav - OSUSKÝ, Filip - NEČAS, Vladimír. Estimation of tritium production in VVER-440 reactor core during normal operation. In VINANST-13 : The Vietnam Conference on Nuclear Science and Technology. Ha Long City, Vietnam. August 7-9, 2019. Hanoi : Vietnam Atomic Energy Institute, 2019, S. 81-82.
- [14] LÜLEY, Jakub - ČERBA, Štefan - NEČAS, Vladimír, Determination of the dosimetry situation in reactor physic laboratory of SUT in Bratislava. In Transactions of the American Nuclear Society : Vol. 123, Virtual Winter Meeting. November 16-19, 2020. Illinois : American Nuclear Society, 2020, S. 1269-1273. ISSN 0003-018X.
- [15] ČERBA, Štefan - LÜLEY, Jakub - VRBAN, Branislav - OSUSKÝ, Filip - NEČAS, Vladimír. Unmanned radiation-monitoring system. In IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 67, Iss. 4 (2020), s. 636-643. ISSN 0018-9499 (2020: 1.679 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.537 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: IEEE: 8977474 ; CC: 000538154200014 ; SCOPUS: 2-s2.0-85083759370 ; DOI: 10.1109/TNS.2020.2970782.
- [16] VRBAN, Branislav - ČERBA, Štefan - LÜLEY, Jakub - OSUSKÝ, Filip - NEČAS, Vladimír, Evaluation of cross section and fission yields induced uncertainty in the VVER-440 burnup calculation. In Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, <https://doi.org/10.1115/1.4051613>, ISSN 2332-8983
- [17] VRBAN, Branislav -- ČERBA, Štefan -- OSUSKÝ, Filip -- LÜLEY, Jakub -- NEČAS,

Vladimír -- KATOVSKÝ, Karel -- ŠTASTNÝ, Ondřej -- GLOGINJIĆ, Marko -- ERICH, Marko -
- MRAVIK, Željko -- PETROVIĆ, Srdjan, The Mini Labyrinth – a Simple Benchmark for
Radiation Protection and Shielding Analysis, In 7th International Conference on
Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications –
ANIMMA2021, EPJ Web of Conferences, 2021, in press

Uplatnenie výsledkov projektu

Uplatnenie výsledkov projektu sa odvíja hlavne od možností novovytvorených experimentálnych stanovísk v rámci Laboratória reaktorovej fyziky na ÚJFI FEI STU. Novovytvorené zariadenie umožňujúce určenie emitancie neutrónových zdrojov je okrem výskumného potenciálu (napr. vývoj nových detektorov ionizujúceho žiarenia) a pedagogiky, významné aj z metrologického hľadiska. Jedným z etalónov uchovávaných SMÚ je Národný etalón neutrónov č. NE 016/98, pomocou ktorého je zabezpečená nadväznosť meraní pre strategické subjekty v SR, akými sú napríklad jadrové elektrárne, zložky Ministerstva vnútra SR, Ministerstva obrany SR, Civilnej obrany, či hygienické stanice. Tento etalón vyžíva rádionuklidové zdroje, ktoré sú základom metrologie neutrónov a je nevyhnutné ich čo najpresnejšie charakterizovať, čo je dosiahnuteľné práve novovybudovaným pracoviskom. Na novom pracovisku boli implementované riešenia znižujúce prislúchajúce neistoty merania. Postup tvorby metodiky a úpravy experimentálneho pracoviska bol publikovaný na vedeckých konferenciách, kde bol podrobený konštruktívnej kritike. Vzhľadom na uvedené možno konštatovať, že projekt vyvolal intenzívnu spoluprácu medzi ÚJFI FEI STU a SMÚ čo vyústilo aj do prípravy projektových žiadostí v rámci schémy APVV-VV.

Vytvorené pracovisko na určenie difúznej dĺžky a Fermiho veku neutrónov okrem významného pedagogického prínosu spočívajúcom v experimentálnom určení základných parametrov významných v reaktorovej fyzike umožňuje bezpečné testovanie potenciálnych detektorov neutrónov a tieniacich materiálov v rôznych prostrediach s možnosťou použitia kvapalných moderátorov pri rôznych teplotách a parného prostredia. Pracovisko taktiež prispelo k testovaniu použiteľnosti alternatívnych tzv. „low cost“ detektorov neutrónov, kde bola preukázaná ich obmedzená použiteľnosť v praxi. Zároveň pracovisko umožňuje experimentálne meranie anizotropie neutrónových zdrojov.

Tretie vytvorené pracovisko, ktoré nesie názov Mini Labyrinth a slúži na overenie tieniacich vlastností perspektívnych materiálov pre hlbinné ukladanie RAO a VJP, prešlo počas riešenia projektu dvoma modifikáciami. Prvé výsledky už boli prezentované na odborných konferenciách. Toto pracovisko bolo využité aj v rámci medzinárodnej spolupráce, kde na ňom boli uskutočnené merania pracovníkmi z VUT Brno.

Ku všetkým pracoviskám bol vytvorený bezpečný systém vzdialenej manipulácie s neutrónovými zdrojmi, zahrňujúci transportný kontajner, a bolo vytvorené podporné pracovisko a metodika umožňujúce určiť koncentráciu síranu mangánového vo vodnom roztoku pomocou riadeného odparku. Pomocou výpočtových nástrojov bol optimalizovaný pracovný postup s účelom zníženia radiačného zaťaženia pracovníkov.

V rámci ďalších simulačných aktivít všetky zmienené pracoviská prispeli k validácii výpočtových kódov, kde bol vzhľadom na zaznamenané rozdiely medzi simuláciou a experimentom uskutočnený výrazný progres v príprave efektívnych účinných prierezov potrebných pre simuláciu. Simulačné aktivity prispeli aj ku kvantifikácii neistôt a systematických odklonov v prípade kritických výpočtov, výpočtov vyhorievania a analýz tienenia ionizujúceho žiarenia. Uvedené poznanie a skúsenosť výrazne prispieva k hodnoteniu kvality predikcií v reaktorovej fyzike a napomáha k skvalitňovaniu expertíz pre ÚJD SR a SE a.s., ktoré ÚJFI vykonáva.

Systém nódov monitorujúcich radiačnú situáciu v laboratóriu našiel uplatnenie aj v monitorovaní radiačnej situácie v životnom prostredí. Navrhovaný systém má uplatnenie v prípade ťažkej havárie jadrového zariadenia a využíva bezpilotné lietajúce systémy. Konštrukcia celého systému, kalibrácia a výsledky prvotnej demonštrácie boli publikované v relevantných časopisoch a stretli sa s pozitívnym ohlasom prejavovým vo forme citácií. Záverom možno konštatovať, že progres vykonaný v rámci projektu prispel ku pedagogickým možnostiam ÚJFI, významne navýšil schopnosti riešiteľského kolektívu v oblasti detekcie neutrónov a výpočtu relevantných poznatkov, vyvolal medzi inštitucionálnu spoluprácu, viedol ku príprave nových projektových žiadostí a cez získané poznanie má pomocou expertíznych činností vplyv na kvalitu predikcií v reaktorovej fyzike pre relevantných odberateľov analýz vykonávaných ÚJFI.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

V rámci prvého cieľa boli dobudované zariadenia na meranie emitancie neutrónového zdroja. Vykonanými vylepšeniami sa podarilo zvýšiť účinnosť detekcie a zabrániť narušeniu integrity neutrónového zdroja v dôsledku chemického pôsobenia roztoku. Podarilo sa stabilizovať chemický režim zariadenia a uskutočniť merania s PuBe a Cf-252 neutrónovými zdrojmi. V rámci druhého cieľa sa podarilo dobudovať zariadenie na meranie Fermiho veku a difúznej dĺžky neutrónov s ohrevom moderátora do 80 °C a s generátorom pary. Podarilo sa uskutočniť merania s aktivačnými a plynom plnenými detektormi a overiť dosiahnuté výsledky simuláciou. Vznikla metodika merania a bola pripravená experimentálna úloha do projektu H2020 ENEEP. Pri realizácii tretieho vedeckého cieľa boli aktivity smerované k vybudovaniu nového experimentu Mini Labyrinth slúžiaceho na overenie tieniacich vlastností perspektívnych materiálov pre hlbinné ukladanie RAO a VJP. Podarilo sa vytvoriť 2 prvotné konfigurácie experimentu, vykonať na nich niekoľko experimentov a porovnať dosiahnuté výsledky s výpočtovými simuláciami. Štvrtý vedecký cieľ bol dosiahnutý stanovením emisných spektier PuBe neutrónového zdroja vstupujúcich do simulácií a vytvorením simulačných modelov pracoviska v kódach VISIPLAN 3D ALARA a SCALE. Tieto modely boli použité na simuláciu radiačnej situácie a optimalizáciu vykonávania experimentov. Posledný z vedeckých cieľov bol dosiahnutý znížením neistôt merania emisie neutrónových zdrojov zlepšením merania prietoku a stanovením koncentrácie mangánu odparom. Podarilo sa vybudovať centrálnu monitorovaciu sieť laboratória s IoT riešeniami. Meracie nódy tohto systému si našli uplatnenie aj pri monitorovaní radiačnej situácie v životnom prostredí.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

As part of the first objective, the device for measuring the emission rate of a neutron sources was completed. The improvements helped to increase the overall detection efficiency and to prevent the disintegration of the neutron source. We have managed to stabilize the chemical regime of the device and to perform measurements with PuBe and Cf-252 neutron sources. As part of the second objective, the devices were finalized for the measurement of Fermi age and diffusion length of neutrons in the temperature range up to 80 °C. Several measurements were performed using activation foils and gas filled detectors and the results were verified through simulations. New measurement methodology and an experimental task for the H2020 ENEEP project have been created. During the implementation of the third objective the new Mini Labyrinth experiment was created. It is used for the evaluation of shielding materials important for deep geological repository of radioactive waste and spent nuclear fuel. Two experimental setups were created and used for the first set of experiments and for their comparison with simulations. The fourth objective was achieved through the determination of PuBe emission spectra used for simulations and by developing the simulation models of the workplace in VISIPLAN 3D ALARA and SCALE6. These models were used to simulate the radiation situation and optimize the performance of experiments. The last objective was achieved by reducing the uncertainties of measuring the emission of neutron sources, by improving measurement of the flowrate and the manganese concentration. We managed to build a central monitoring grid of the laboratory that utilizes IoT solutions. The measuring nodes of this system have also found application in monitoring the radiation situation in the environment.