



Финансирано от
Европейския съюз
NextGenerationEU



BiOrgaMST
Биоактивни органични и неорганични
авангардни материали и чисти технологии



МИНИСТЕРСТВО
НА ОБРАЗОВАНИЕТО
И НАУКАТА

НГ 4 Чисти технологии за удължаване жизнения цикъл на енергийни системи

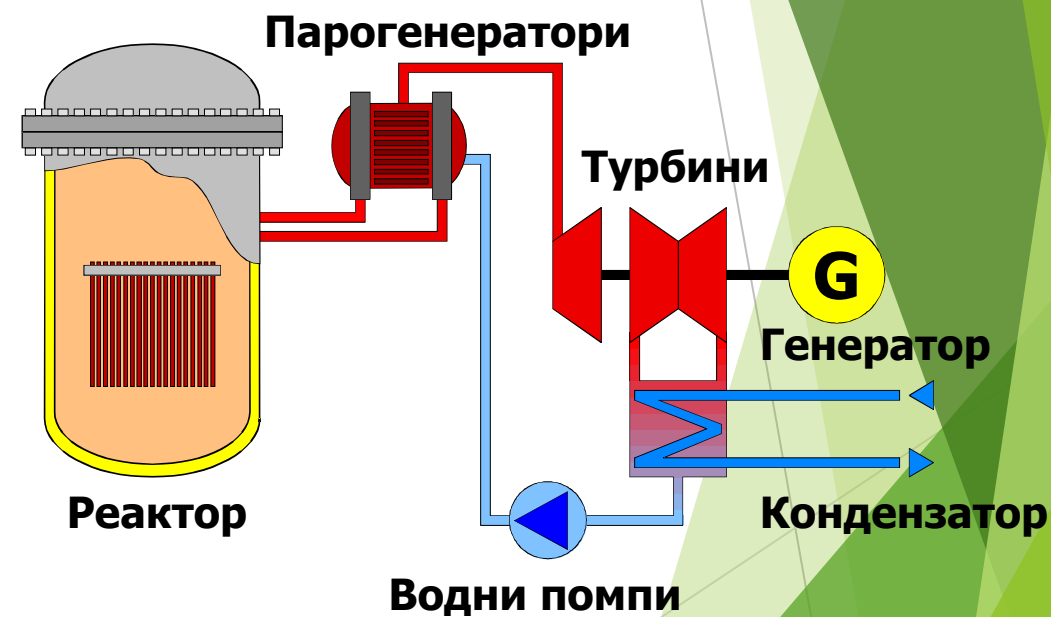
Мартин Божинов

Център по водородни технологии
Химико-технологичен и металургичен университет



НГ 4 Научно-изследователска програма

- ▶ Допълване и разширяване фундаменталните изследвания относно удължаването на срока на експлоатация (до 80 години!), безопасността и надеждността на ядрените реактори от III поколение → директива на Европейската комисия за ядрена безопасност
- ▶ Основната цел на изследванията → да се разработят детерминистични прогнозни модели на обща и локална корозия и корозионно-механично разрушаване на вътрекорпусните материали в ядрени реактори
- ▶ В областта на паро-генераторите за енергийни системи → ново поколение детерминистични модели на корозионна ерозия и шламо-образуване
- ▶ Параметризиране, валидиране и верифициране на моделите → лабораторни експерименти в условия, максимално близки до експлоатационните + оперативни данни от АЕЦ





НАУЧЕН ЕКИП

Център по водородни технологии, ХТМУ

- ▶ Проф. д-рн Мартин Божинов (Физикохимия) - КИНЕТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ НА КОРОЗИОННИ ПРОЦЕСИ
- ▶ Проф. д-р Ива Бетова (Електрохимия) - ЕЛЕКТРОХИМИЧНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ, МОДЕЛИРАНЕ
- ▶ Гл. ас. д-р Васил Карастоянов (Физикохимия) - ЕЛЕКТРОХИМИЧНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ
- ▶ Гл. ас. д-р Иглика Димитрова (Физикохимия) - МОДЕЛИРАНЕ И ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА КОЛОИДНИ СИСТЕМИ
- ▶ Гл. ас. д-р Николета Иванова (Физикохимия) - МОЛЕКУЛНО МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛАЦИЯ
- ▶ ас. д-р инж. Йоана Пенкова (Електрохимия) - ЕЛЕКТРОХИМИЧНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Международно сътрудничество

- ▶ VTT Ltd, Finland: Prof. Elina Huttunen-Saarivirta (Energy Materials), MSc Konsta Sipilä (Metallic Materials), Dr. Zaiqing Que (Physical Metallurgy), Dr. Sneha Goel (Production Technology), Dr. Aki Toivonen (Mechanical Engineering)
- ▶ Prof. Litao Chang (Shanghai Institute of Applied Physics, China)
- ▶ Dr. Iwan Grech (Rolls Royce SMR, UK)



РП 1 Експериментално характеризиране и моделиране на вътрешно-корпусни материали в ядрени реактори

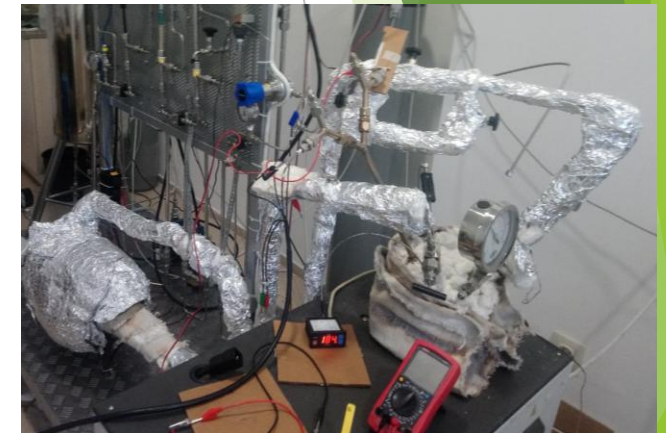
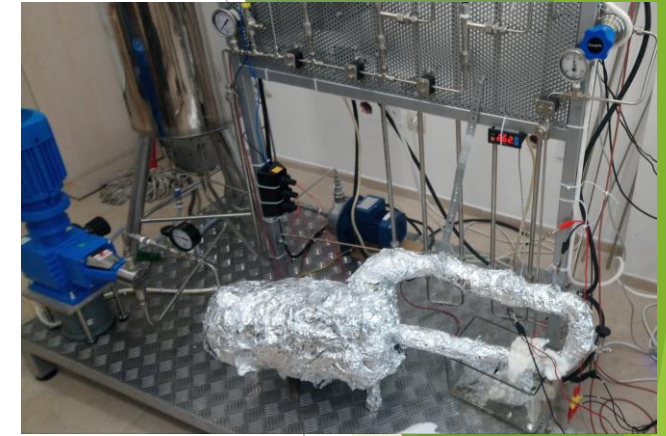
- ▶ Изследвания на алтернативи за топлоносителя на първи контур → KOH, използван в източния тип PWR (водно-водни енергийни реактори, ВВЕР) → обещаващ кандидат
- ▶ Изследвания на съвместимостта на адитивно произведени (3D-принтирани) материали (аустенитни неръждаеми стомани) с топлоносителя на първи контур на ядрени централи - съвместни изследвания с VTT Ltd (Финландия) (продължава през 2025)
- ▶ In-situ електрохимични измервания на неръждаема стомана 316 и сплав 690 в симулиран топлоносител на първи контур на малък модулен реактор (SMR) - влияние на концентрациите на NH_3 , KOH, разтворен H_2 и разтворен Zn (2025)





РП 2 Експериментално характеризиране и моделиране на корозионната ерозия и отлагане на шлам в паро-генераторите

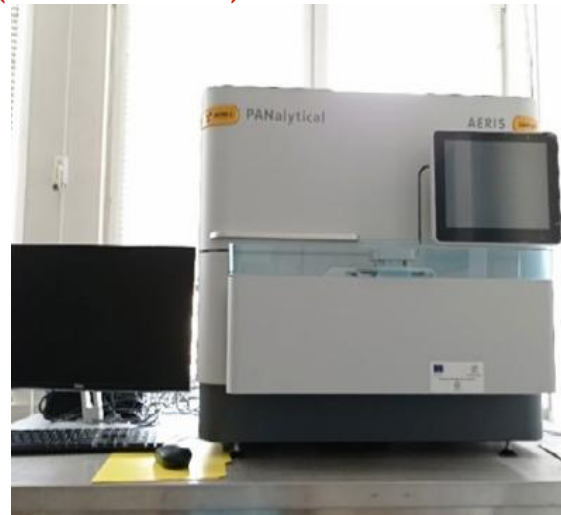
- Корозионна ерозия на въглеродни и нисколегирани стомани в ПГ → отлагане на шлам върху опорите на тръбния сноп или касетите на пред-нагревателя → експериментално изследване на кинетиката на процеса върху неръждаеми и нисколегирани стомани
- До момента няма общоприложими модели на процесите на корозионна ерозия, отлагане на шлам и консолидация → моделиране на процесите на взаимодействие на оксидите върху конструктивни материали с компоненти на топлоносителя чрез молекулна динамика (**продължава през 2025**)
- Разработване на алтернативи на хидразина като уловители на кислород в парогенераторите – съвместна програма с VTT Ltd, Финландия (**продължава през 2025**)





РП 3 Деградация на материали за електролиза и фотоелектролиза на вода

- ▶ Пасивиране на волфрам → изследвано чрез комбинация от in -situ електрохимични (волтамметрия и импедансна спектроскопия) и спектро-електрохимични методи, съчетани с ex -situ характеризиране на повърхностния оксид (2024)
- ▶ Електрохимичен синтез и модификация на волфрамови оксиди като фото-аноди и фото-катоди за фото-електролиза на вода (през 2025 - модифициране на WO_3 с MoO_x и Cu_2O)
- ▶ Материали за NH_3 горивни процеси и NH_3 горивни елементи - сътрудничество с VTT (2024-2025)





Резултати 2023-2024

▶ Експериментални изследвания

- ▶ in-situ електрохимични измервания на корозията на стомана 316 и никелова сплав 690 в симулиран топлоносител на първи контур на ядрени централи тип ВВЕР
- ▶ Оценени дебелината и елементният състав на оксидите в дълбочина чрез GDOES и XPS
- ▶ in-situ електрохимични измервания на корозията на адитивно произведени стомана 316 и безникелови аустенитни стомани в симулиран топлоносител на първи контур на ядрени централи тип PWR
- ▶ Задълбочени структурни изследвания на адитивно произведените материали и корозионните слоеве върху тях чрез микроскопия с висока резолюция
- ▶ in-situ електрохимични измервания на корозионната ерозия на аустенитна стомана 316 и нисколегирана стомана (0.6% Cr) в симулирани топлоносители на втори контур - амоняк и етаноламин
- ▶ Оценка на дебелината и елементния състав на оксидите върху нисколегирана стомана чрез GDOES

▶ Моделни изследвания

- ▶ Хидродинамични, термодинамични и електрохимични изчисления на нов тип цилиндричен електрод за изследване на корозионната ерозия
- ▶ Молекулно-динамични симулации на адсорбция на вода и амоняк - компоненти на топлоносителя на втори контур на АЕЦ - върху Fe_3O_4 субстрати



НГ 4 → публикации 2023-2024 по изследователската програма

1. M. Bojinov, I. Betova, V. Karastoyanov, G. Avdeev, **Corrosion of stainless steel in simulated nuclear reactor primary coolant – experiments and modeling**, Materials 17(2024) 1148 Q2 (Materials Science) <https://doi.org/10.3390/ma17051148>
2. M. Bojinov, I. Betova, V. Karastoyanov, **Corrosion mechanism and electrochemical reactions on Alloy 690 in simulated primary coolant of water-water energy reactors** Materials 17(2024) 1846 Q2 (Materials Science) <https://doi.org/10.3390/ma17081846>
3. M. Bojinov, L. Chang, T. Saario, Z. Que, **Corrosion of 316L stainless steel produced by laser powder bed fusion and powder metallurgy in pressurized water reactor primary coolant**, Materialia 34 (2024) 102055. Q2 (Materials Science) <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2024.102055>
4. S. Goel, M. Bojinov, T. Saario, J. Capek, E. Polatidis, T. Kantonen, A. Salminen, M. Blankenburg, A. Ganvir, Z. Que, **Corrosion behavior of laser powder bed fusion manufactured nickel-free stainless steels in high-temperature water**, Corros.Sci.239(2024)112410. Q1 (Materials Science) <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112410>
5. K. Sipilä, P. Ferreiros, T. Ikäläinen, A. Mikkelsen, I. Betova, M. Bojinov, **Decomposition products of oxygen scavengers and their effect on corrosion of steam generator materials – I. Diethyl-hydroxylamine and carbonylhydrazide**, Corros. Sci. 240 (2024) 112476 Q1 (Materials Science) <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112476>
6. N. Ivanova, V. Karastoyanov, I. Betova, M. Bojinov, **Study of ammonia adsorption on magnetite surfaces with molecular dynamics simulations**, Molecules 29 (2024) 3276 Q1 (Chemistry-miscellaneous) <https://doi.org/10.3390/molecules29143276>
7. M. Bojinov, S. Goel, T. Ikäläinen, T. Saario, **Effect of sulfide addition on the corrosion mechanism of copper in saline groundwater solution J.** Electrochem. Soc. 171(2024) 041505 Q1 (Materials Chemistry) <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad3fed>
8. M. Bojinov, I. Betova, V. Karastoyanov, **Multi-method characterization of anodic oxidation of a titanium alloy in fluoride-containing electrolytes**, J. Solid State Electrochem. 27 (2023) 1835–1846. Q2 (Materials Chemistry) <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05442-9>
9. M. Bojinov, Y. Penkova, I. Betova, V. Karastoyanov, **Mechanism of anodic dissolution of tungsten in sulfate-fluoride solutions**, Metals 14(2024)1004. Q1 (Metals and Alloys) <https://doi.org/10.3390/met14091004>



Планирани публикации през 2025

- ▶ Продължаване изследванията на адитивно произведени материали - сътрудничество с VTT и Shanghai Institute of Applied Physics (1-2 публикации през 2025)
- ▶ **Корозия на конструктивни материали в топлоносител на първи контур на малък модулен реактор (SMR) - влияние на KOH, H₂ и Zn (2-3 публикации през 2025)**
- ▶ Продължаване на изследванията на влиянието на хидразинови алтернативи върху корозията в парогенераторите - сътрудничество с VTT (2 публикации през 2025)
- ▶ Моделиране на корозионната ерозия на нисколегирани стомани (2 публикации през 2025)
- ▶ Моделиране на процесите на шламообразуване чрез молекулна динамика (1-2 публикации през 2025)
- ▶ **Материали за фото-електролиза на вода - волфрамови оксиди, дотирани с оксиди на преходни метали (2 публикации през 2025)**
- ▶ **Материали за NH₃ горивни процеси и NH₃ горивни елементи - сътрудничество с VTT (1-2 публикации през 2025)**



Планирани участия в конференции през 2025

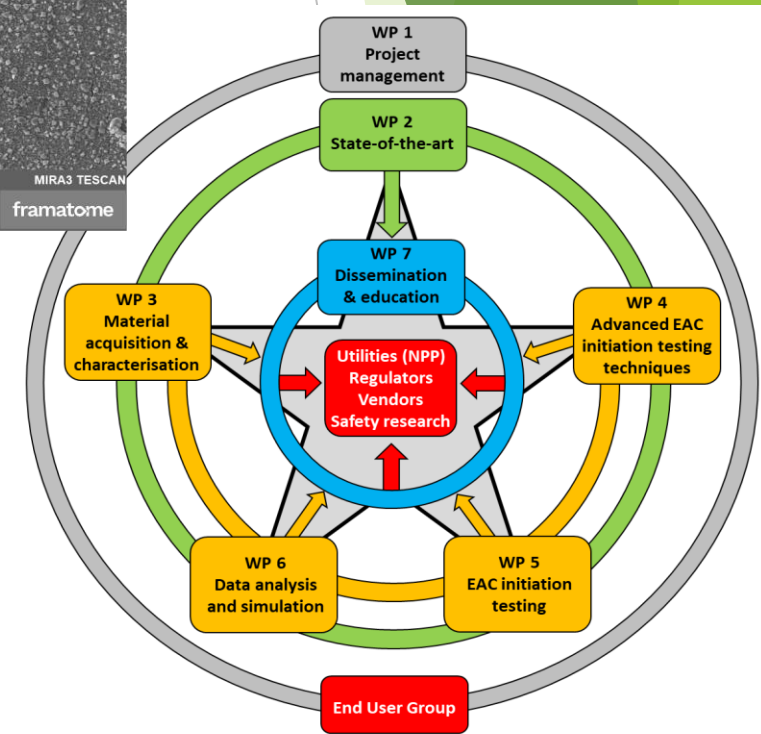
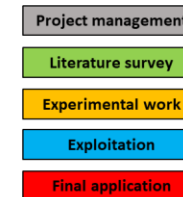
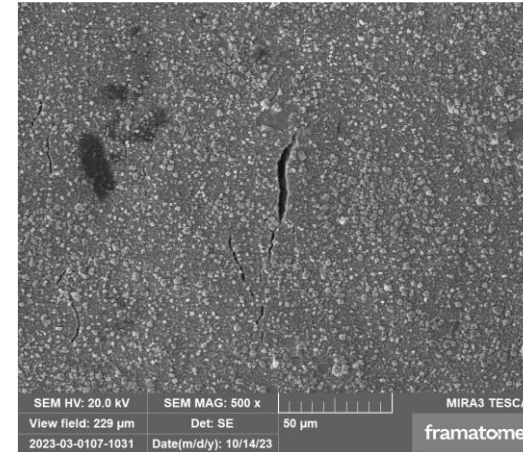
- ▶ 14th symposium on Electrochemical Methods in Corrosion Research (EMCR 2025), Venice, San Servolo (Italy) June 15-19, 2025 (Martin Bojinov, Iva Betova)
- ▶ ICAPP 2025, International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Antibes, France, September 17-19, 2025 (Vasil Karastoyanov)
- ▶ 9th International Conference on Semiconductor Photochemistry (SP9), Madrid, Spain, September 9-12, 2025 (Yoanna Penkova)
- ▶ Computational modelling of multicellular systems, Heidelberg, Germany, June 14 -20, 2025 (Nikoleta Ivanova)
- ▶ International Conference on Research Challenges in Science and Technology (ICRCST - 25), Bucharest, Romania, 10th-11th April 2025 (Iglika Dimitrova)



PREDICTION OF ENVIRONMENTALLY- ASSISTED CRACK INITIATION BEHAVIOR OF MATERIALS PRODUCED BY ADVANCED MANUFACTURING TECHNIQUES FOR THE SAFE LONG-TERM OPERATION OF LIGHT WATER REACTORS (POEAM) (2024-2029)

Партньори:

- ▶ VTT Technical Research Centre of Finland – Coordinator (FIN)
- ▶ Centrum výzkumu Řež (CZE)
- ▶ CIEMAT + CSIC (ES)
- ▶ Zavod za gradbeništvo Slovenije (SLO)
- ▶ Ecole nationale superieure des Mines de Paris (FRA)
- ▶ Kauno technologijos universitetas (LTU)
- ▶ Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (FRA)
- ▶ Electricite de France (FRA)
- ▶ Framatome (GER), Framatome (FRA)
- ▶ **University of Chemical Technology and Metallurgy (BUL)**
- ▶ L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (FRA)
- ▶ **Paul Scherrer Institut (SUI)**
- ▶ **University of Manchester (UK)**
- ▶ **University of Bristol (UK)**





Проекти с индустрията 2024-2026

- **Materials for CO₂-neutral processes in resource-intensive industries (MASCOT), Business Finland (2024-2025)**



- **International Innovation Network for the Development of Cost- and Environmentally Efficient Seasonal Thermal Energy Storages (INTERSTORES), Horizon Europe (2024-2026)**

