



Финансирано от
Европейския съюз
NextGenerationEU



BiOrgaMST
Биоактивни органични и неорганични
авангардни материали и чисти технологии



МИНИСТЕРСТВО
НА ОБРАЗОВАНИЕТО
И НАУКАТА

НГ 3.1.4 Чисти технологии за удължаване жизнения цикъл на енергийни системи

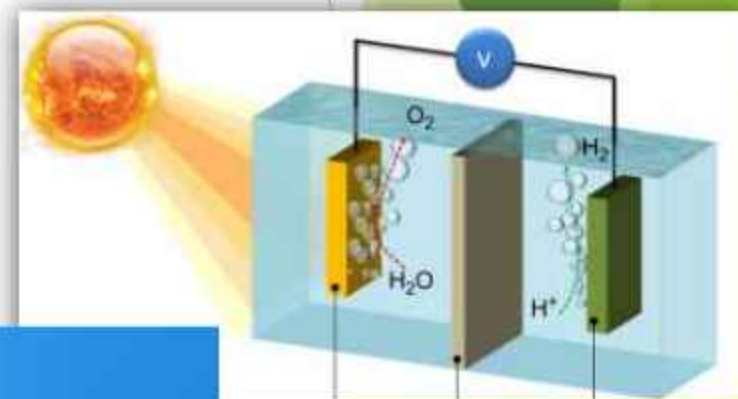
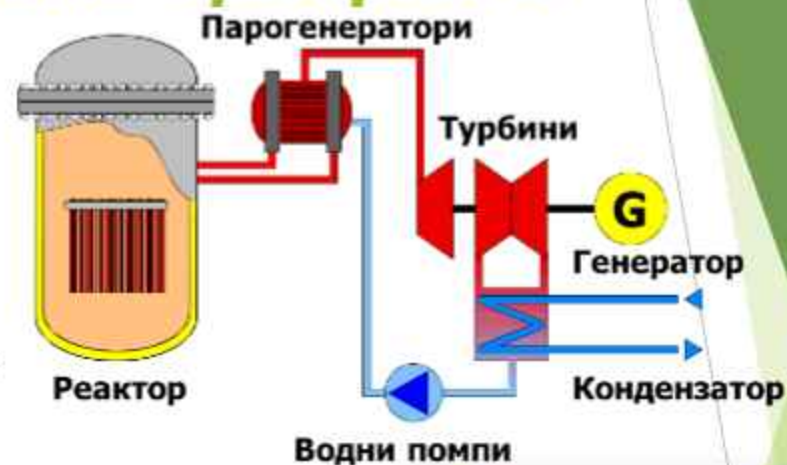
Мартин Божинов

Катедра Физикохимия и Център по водородни технологии
Химико-технологичен и металургичен университет



НГ 3.1.4 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 → разработване, валидиране и верифициране на детерминистични прогнозни модели на обща и локална корозия и корозионно-механично разрушаване на вътрекорпусни материали в ядрени реактори
- ▶ В областта на паро-генераторите за енергийни системи → ново поколение детерминистични модели на корозионна ерозия и шламо-образуване
- ▶ Синтез и характеризиране на материали за фото-електролиза на вода
- ▶ Изследване и моделиране деградацията на структурни материали за въглерод-неутрални процеси





НАУЧЕН ЕКИП

Център по водородни технологии, ХТМУ

- ▶ проф. дхн 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 Николета Иванова (Физикохимия) - МОЛЕКУЛНО МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛАЦИЯ
- ▶ ас. д-р инж. Йоана Пенкова (Електрохимия, Материали) - ЕЛЕКТРОХИМИЧНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ (от 2024)
- ▶ гл. ас. д-р Иглика Димитрова (Физикохимия) - МОДЕЛИРАНЕ И ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА КОЛОИДНИ СИСТЕМИ

Международно сътрудничество

- ▶ VTT Ltd, Finland: MSc Konsta Sipilä (Metallic Materials), Dr. Zaiqing Que (Physical Metallurgy), Dr. Aki Toivonen (Mechanical Engineering), MSc Sofia Ojasalo, Prof. Elina Huttunen-Saarivirta (Materials degradation in process industry)
- ▶ Prof. Litao Chang (Shanghai Institute of Applied Physics, China)
- ▶ Dr. Meisam Dabiri Havigh, Prof. Herman Terryn, Prof. Annick Hubin (Vrije Universiteit Brussel, Belgie)
- ▶ 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) → 2023-2024
- ▶ 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) 2022-2025
- ▶ 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 KOH, разтворен Zn и разтворен H_2 (2025-2026)





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 процесите на взаимодействие на оксидите върху конструктивни материали с компоненти на топлоносителя чрез молекулна динамика**
- Разработване на алтернативи на хидразина като уловители на кислород в парогенераторите – съвместна програма с VTT Ltd, Финландия (2016-2025)





РП 3 Деградация на материали за електролиза и фотоелектролиза на вода

- ▶ Растеж на порест аноден филм върху W → динамиката на електронните носители по време на окисление изследвана чрез фототокова спектроскопия с модулиране интензитета на светлината (IMPS) (2023-2025)
- ▶ Модификация на анодни филми върху W с молибденови или медни оксиди - перспективни фото-анооди и фото-катооди за електролиза на вода (2024-2026)
- ▶ Деградация на материали (феритни, мартензитни и аустенитни стомани) за изгаряне на амоняк и амонячни горивни елементи (2024-2026)
- ▶ Обща и локална корозия на аустенитни, супер-аустенитни и дуплексни стомани като материали за промишлени процеси за разлагане и утилизация на CO₂ (2024-2026)





Резултати 2024-2025

► Експериментални изследвания

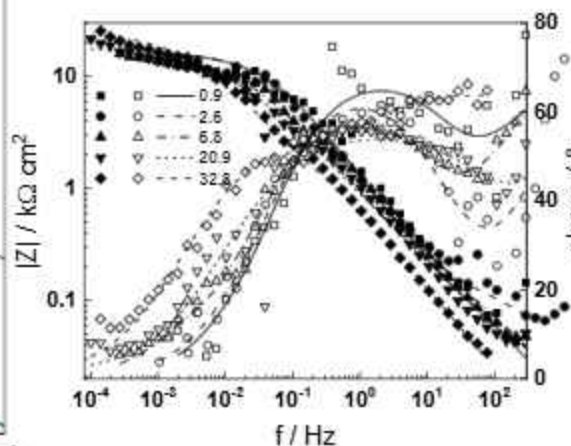
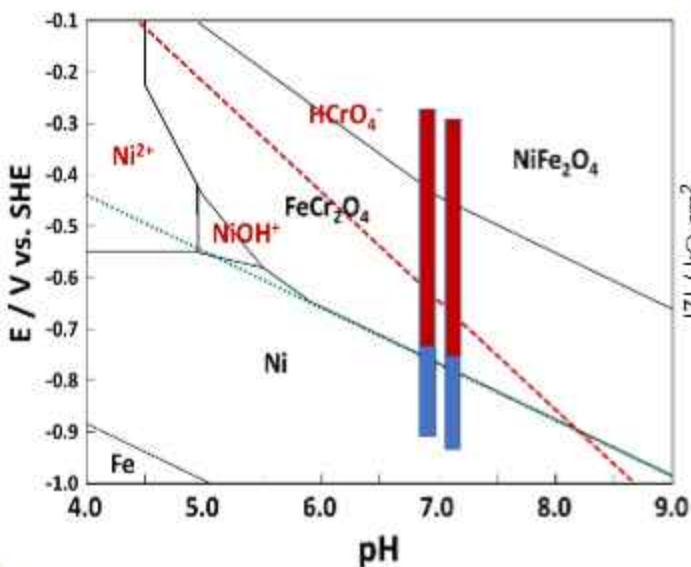
- in-situ електрохимични измервания на корозията на стомана 316 и никелова сплав 690 в симулиран топлоносител на първи контур на малки модулни реактори, оценка дебелината и елементния състав на оксидите в дълбочина чрез GDOES и XPS
- Продължаване на in-situ електрохимичните измервания на корозионната ерозия на нисколегирана стомана (0.6% Cr) в симулирани топлоносители на втори контур - амоняк и етаноламин, оценка на дебелината и елементния състав на оксидите чрез GDOES
- Електрохимичен синтез и характеризиране на молибденово-волфрамови и медно-волфрамови оксиди като перспективни фото-аноди и фото-катоди за разлагане на вода
- Характеризиране на нитридни и оксидни слоеве върху материали за горене на амоняк и амонячни горивни елементи

► Моделни изследвания

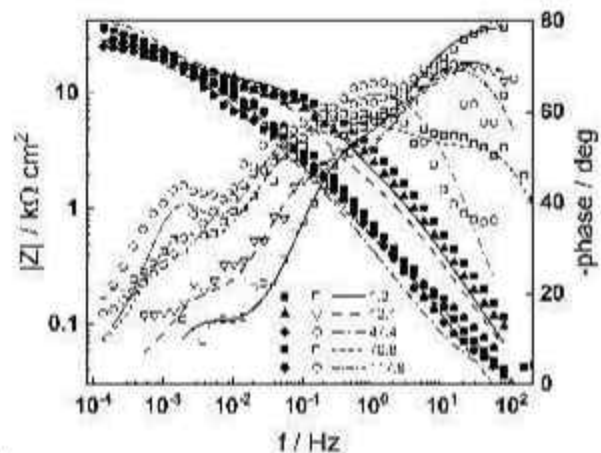
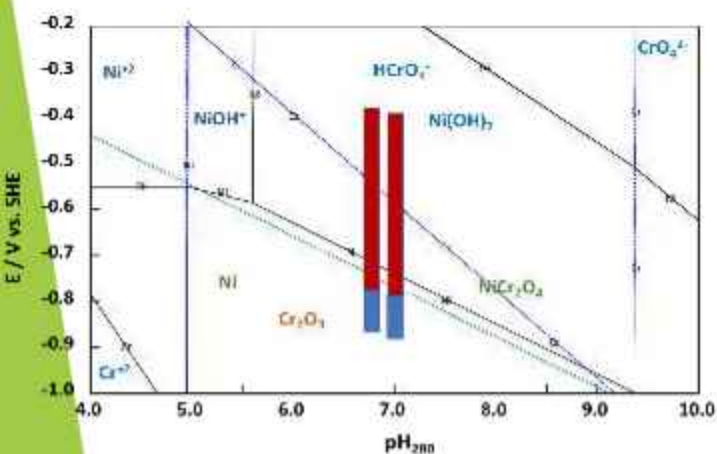
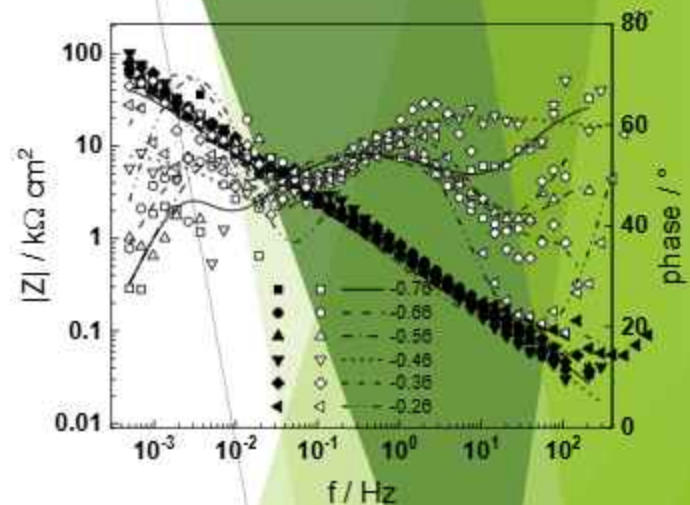
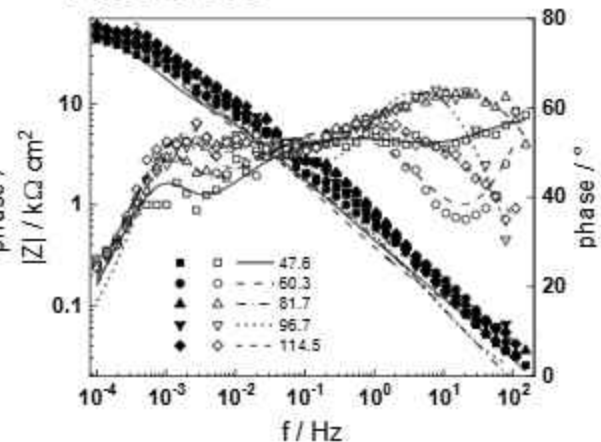
- Молекулно-динамични симулации на адсорбция на амоняк и етаноламин - компоненти на топлоносителя на втори контур на АЕЦ - върху Fe_3O_4 субстрати



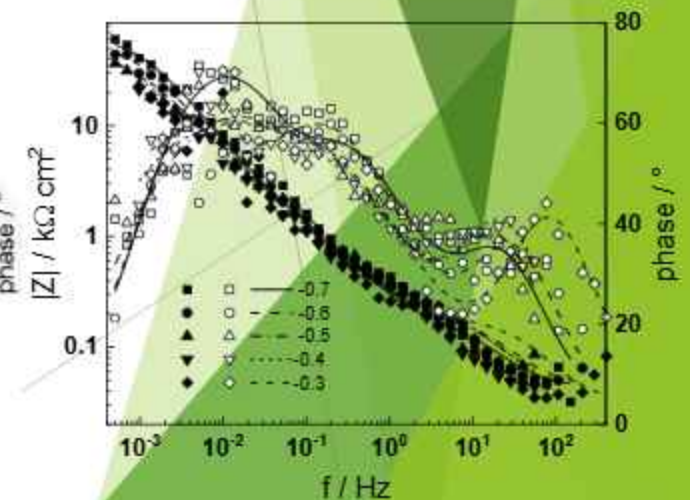
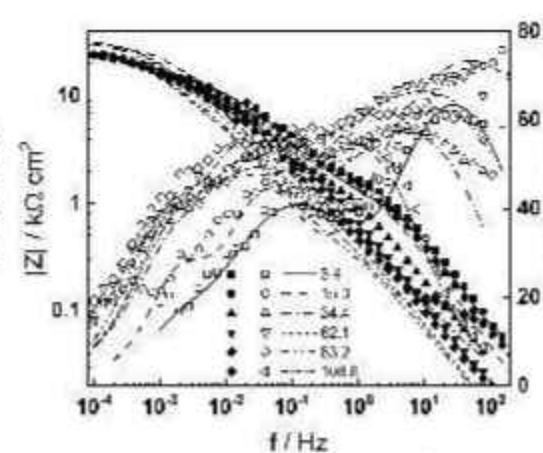
РП 1 Корозия на вътрекорпусни материали и парогенераторни тръби в топлоносител на първи контур на малки модулни реактори



AISI 316L

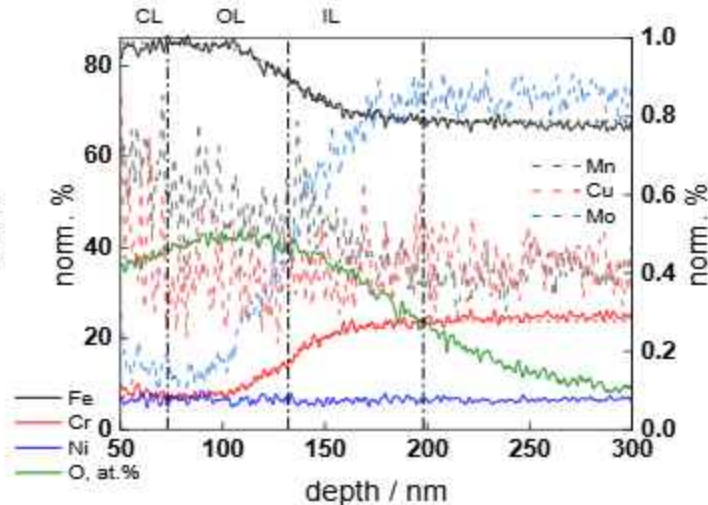
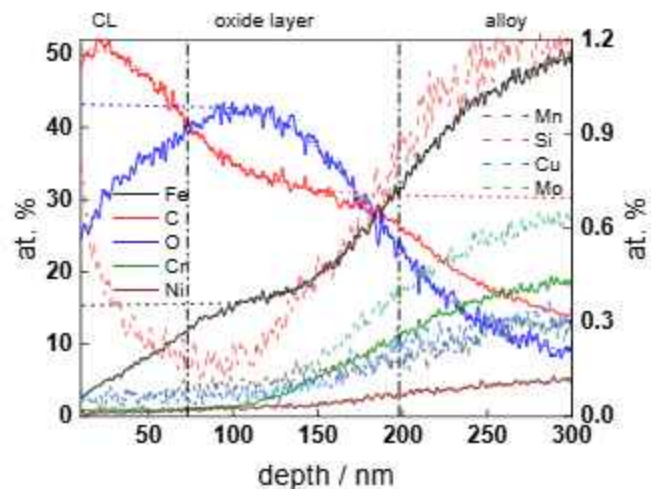


Сплав 690

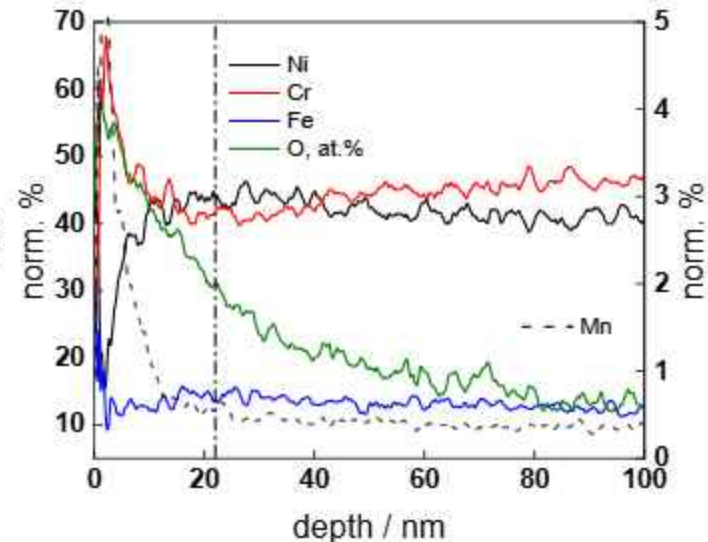
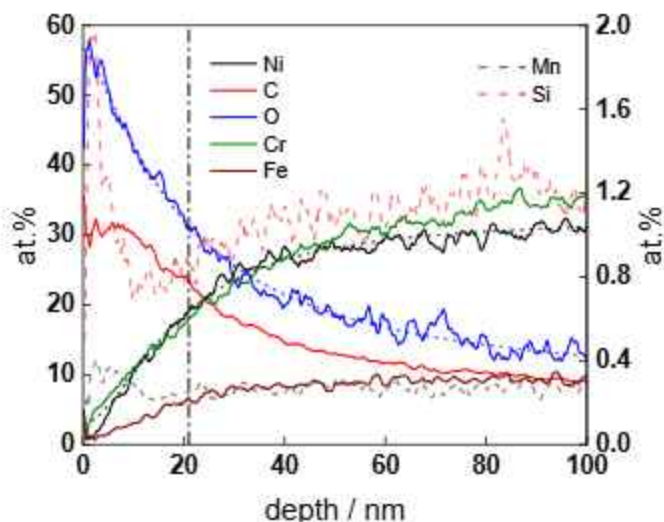




РП 1 Корозия на вътрекорпусни материали и парогенераторни тръби на в топлоносител на първи контур на малки модулни реактори (2)



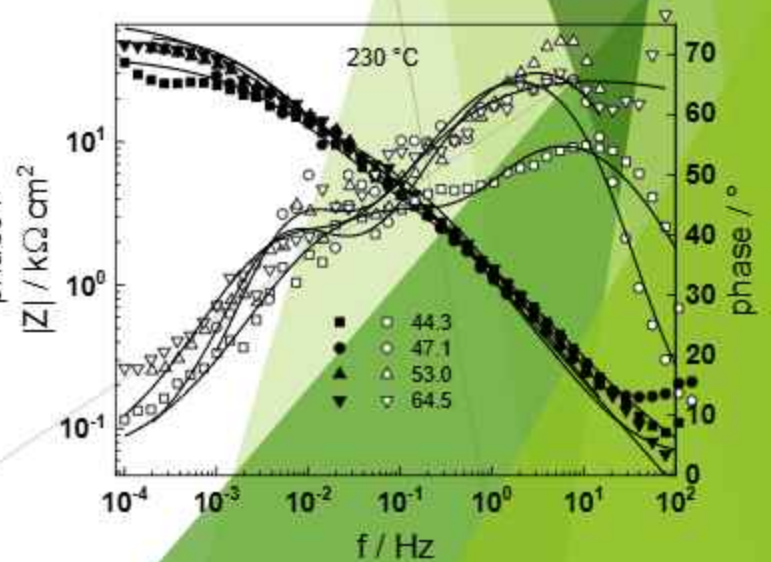
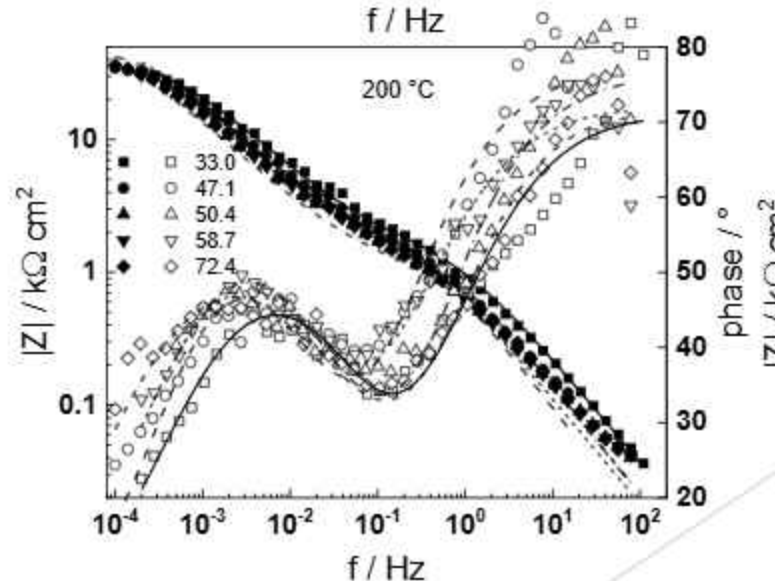
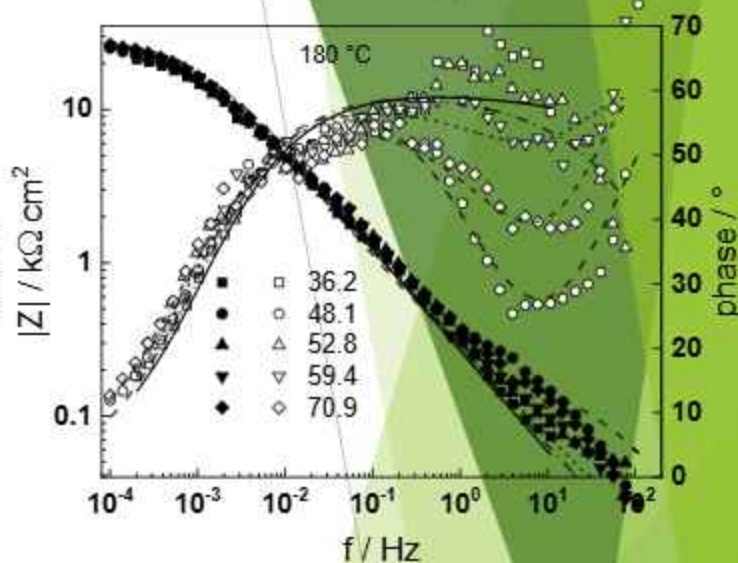
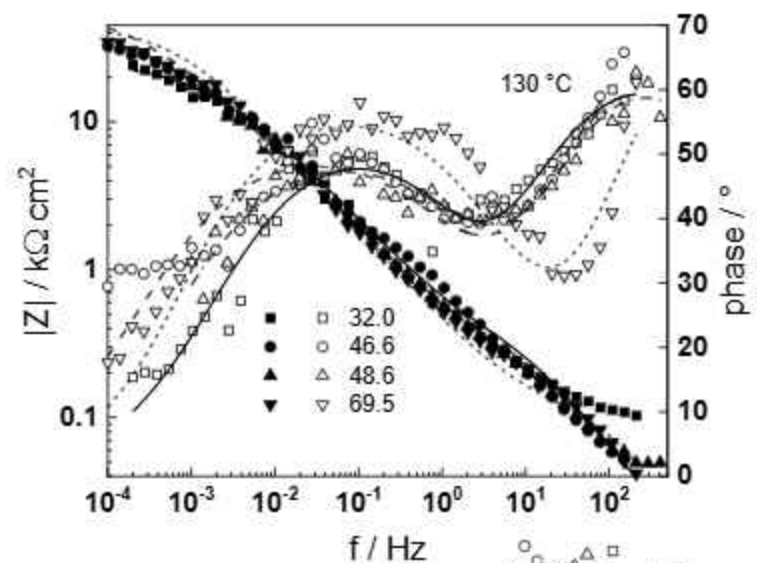
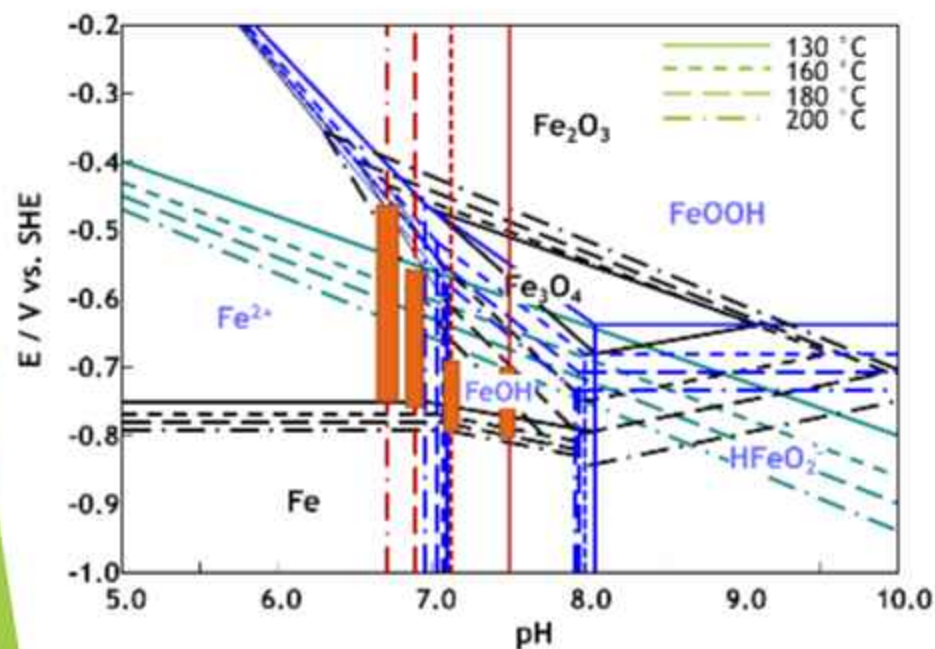
AISI 316L



Сплав 690



РП 2 корозионна ерозия на нисколегирана стомана (0.6%Cr) в топлоносители на втори контур на АЕЦ (разтвори на амоняк и етаноламин)

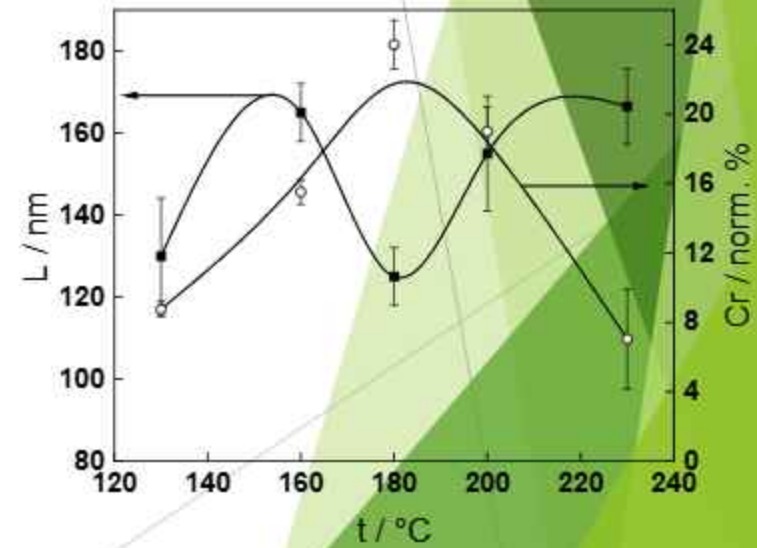
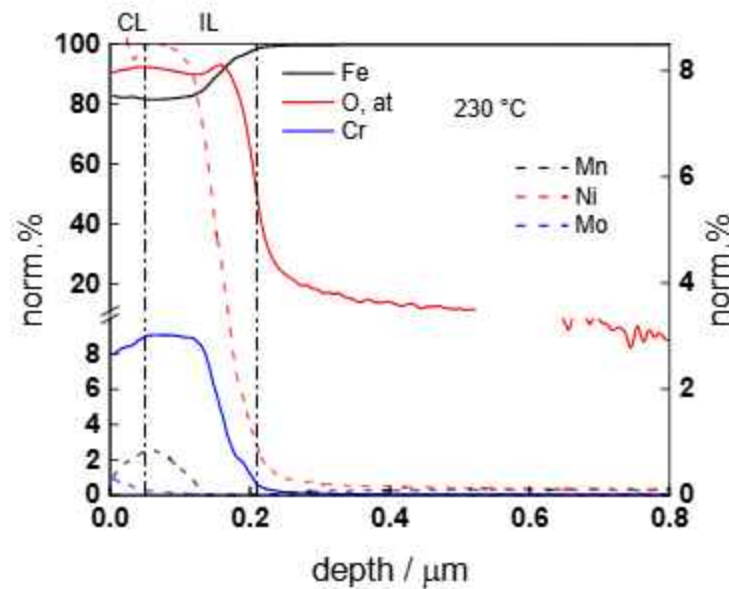
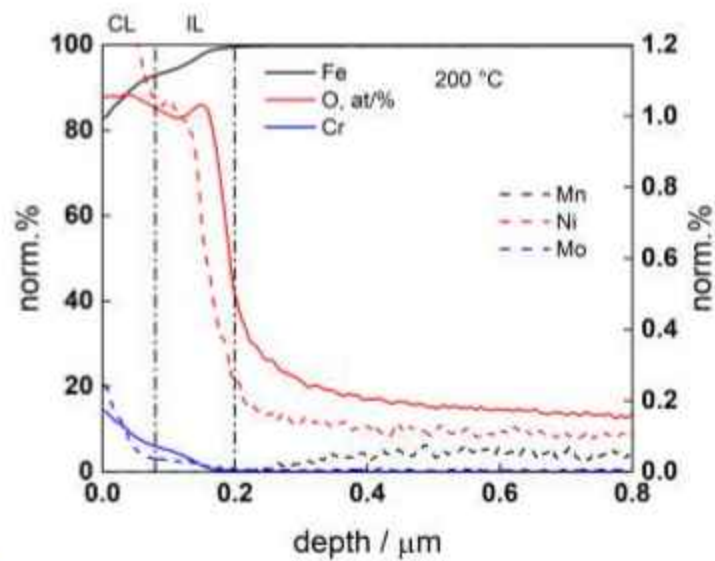
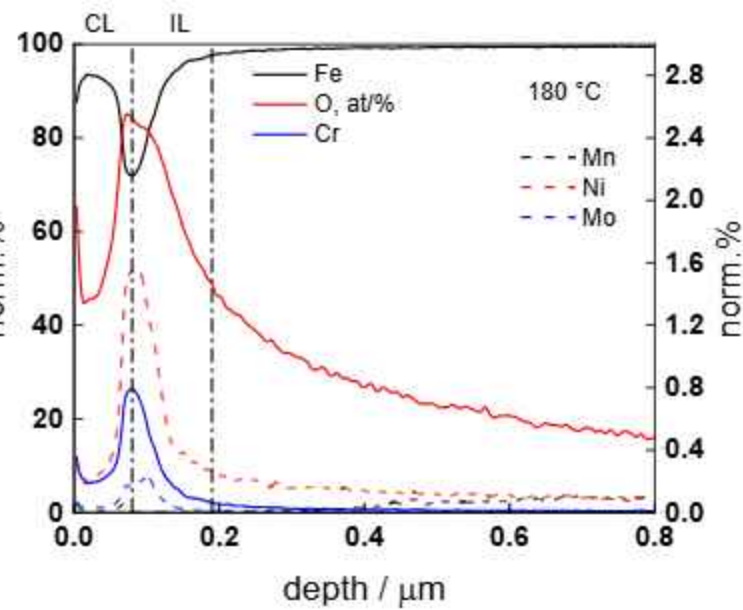
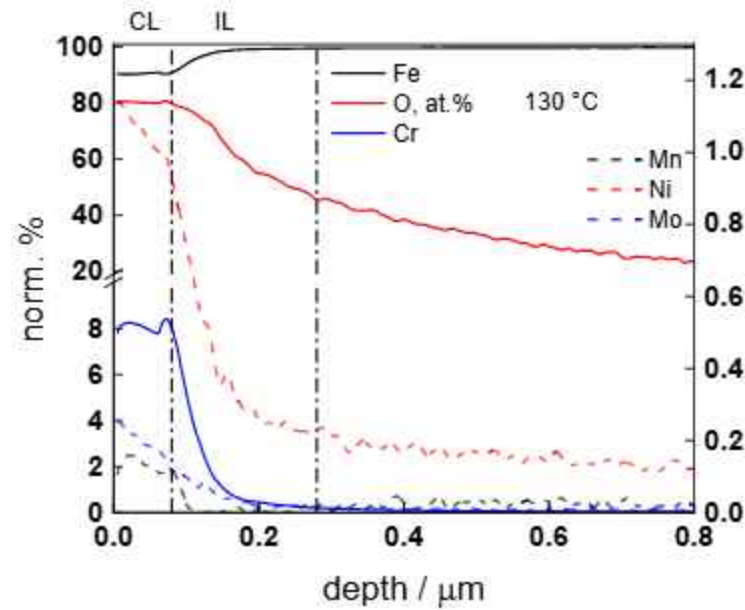


Корозионна ерозия на нисколегирания стоман (0.6%Cr) в топлоносител на втори контур (2)

Финансирано от
Европейския съюз
Next Generation EU

Визага 1007
Биоактивни органични и неорганични
авангардни материали и чисти технологии

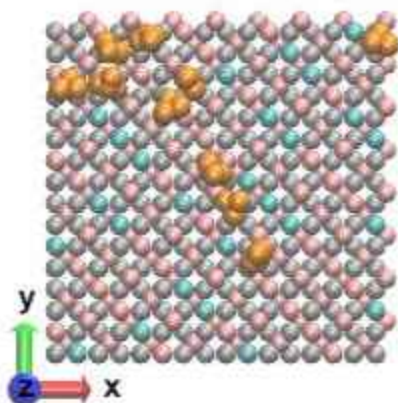
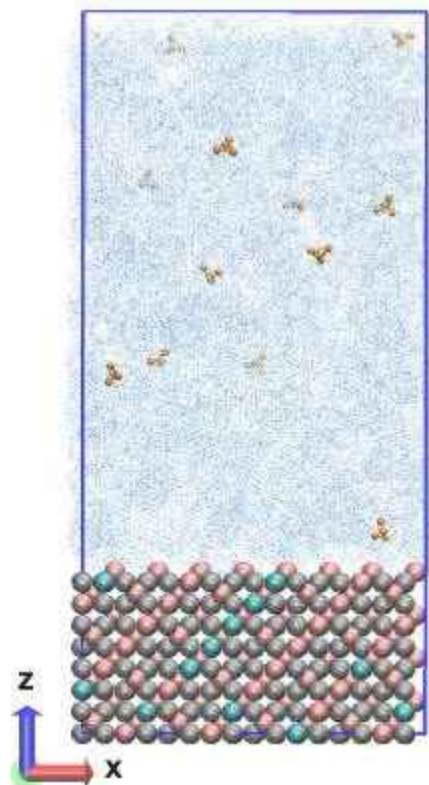
МИНИСТЕРСТВО
НА ОБРАЗОВАНИЕТО
И НАУКАТА





Моделни изследвания - адсорбция на амоняк върху магнетит

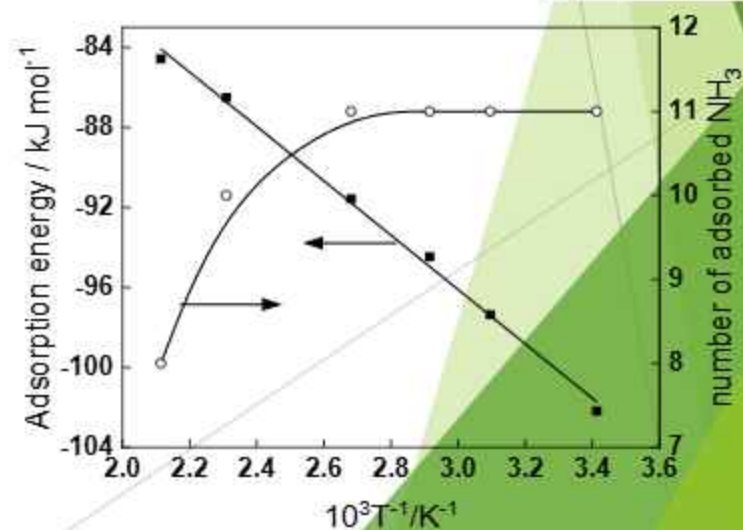
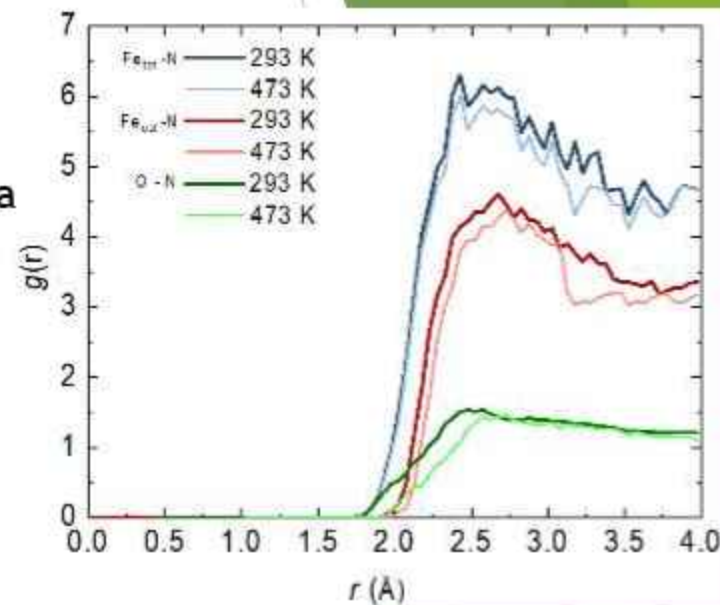
начална конфигурация крайна конфигурация



ортогонална
проекция

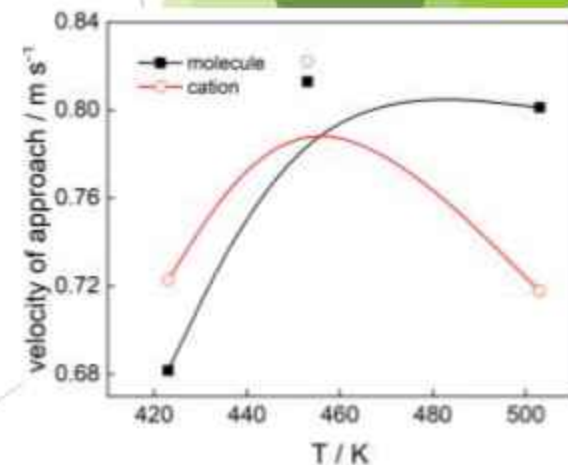
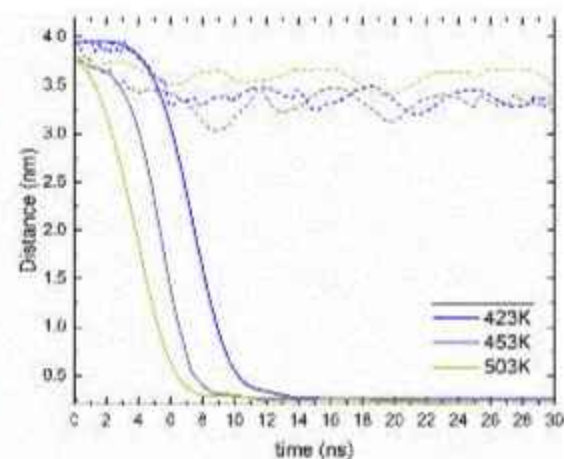
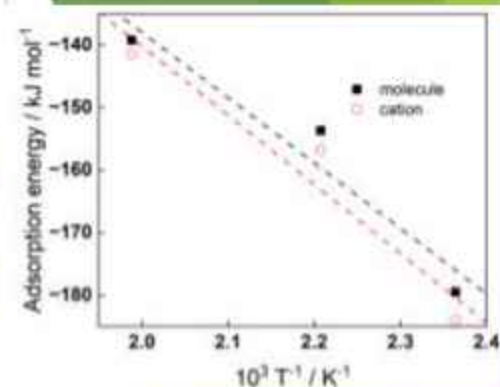
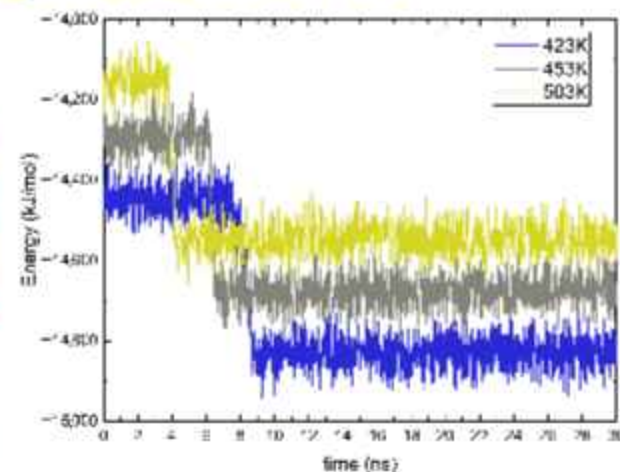
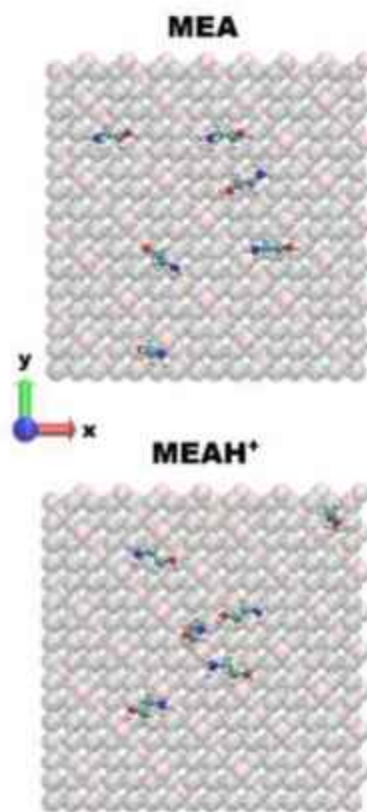
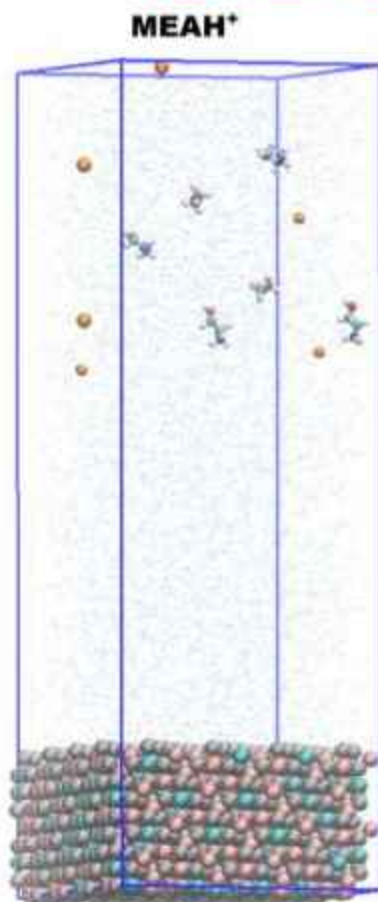
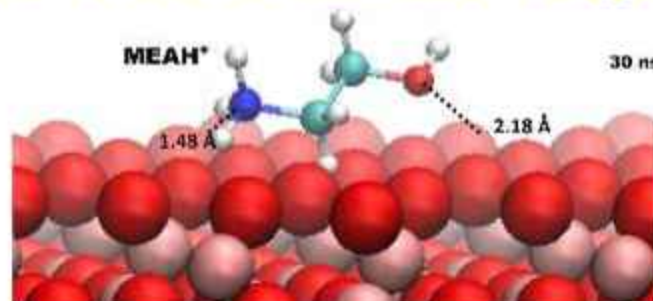
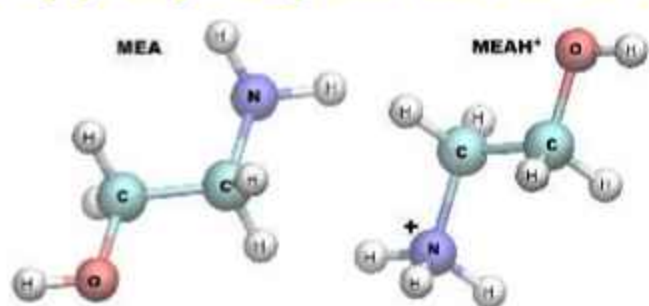
Енергия на адсорбция

Радиални функции на
разпределение





Адсорбция на моно-етаноламин върху магнетит





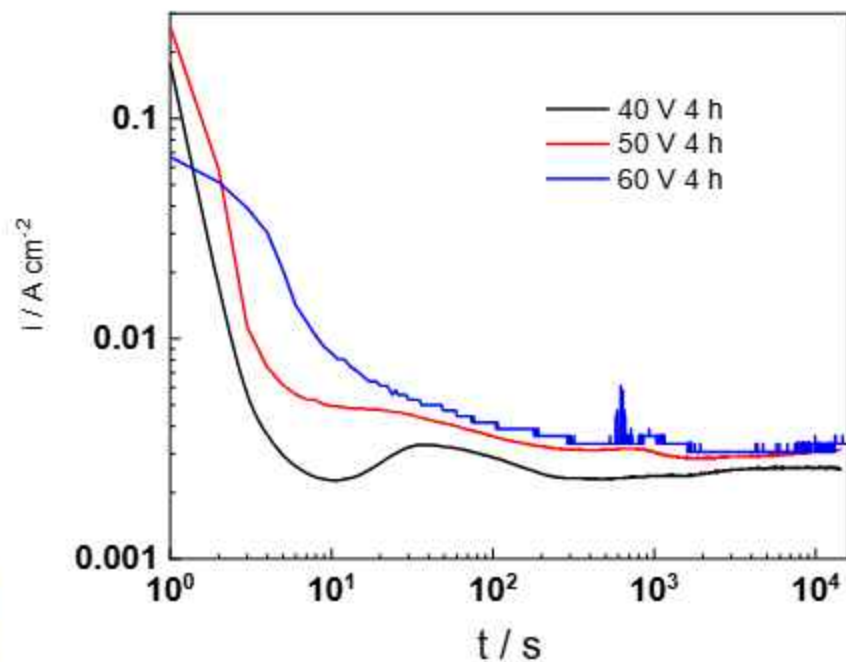
РП 3 Електрохимичен синтез и характеризиране на молибденово-волфрамови оксиди като фото-аноди

- Елементен, химичен и фазов състав – XRD, оптична емисионна спектроскопия с тлеещ разряд (GDOES), SEM-EDX, Раманова спектроскопия, XPS
- Полупроводникови свойства – криви капацитет-потенциал
- Динамика на индуцирани носители – спектроскопия на фото-тока с модулация интензитета на светлината

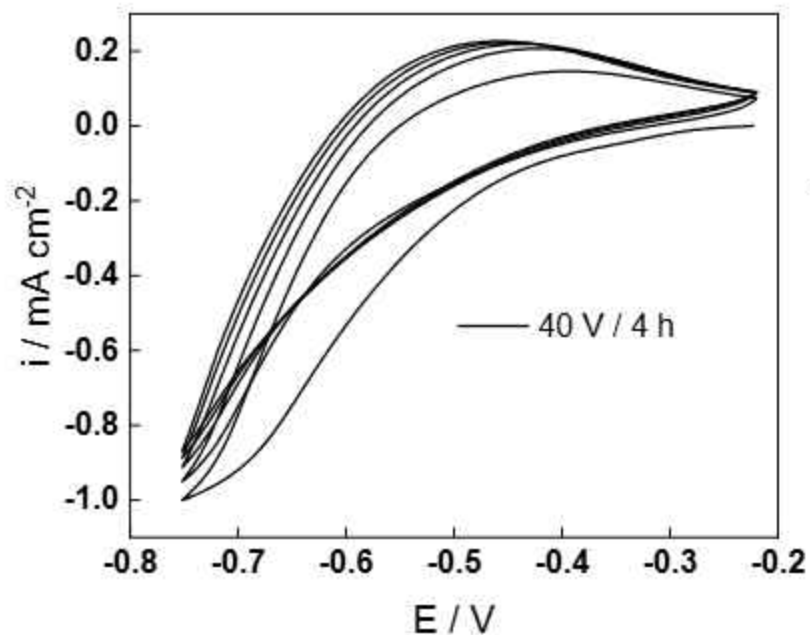




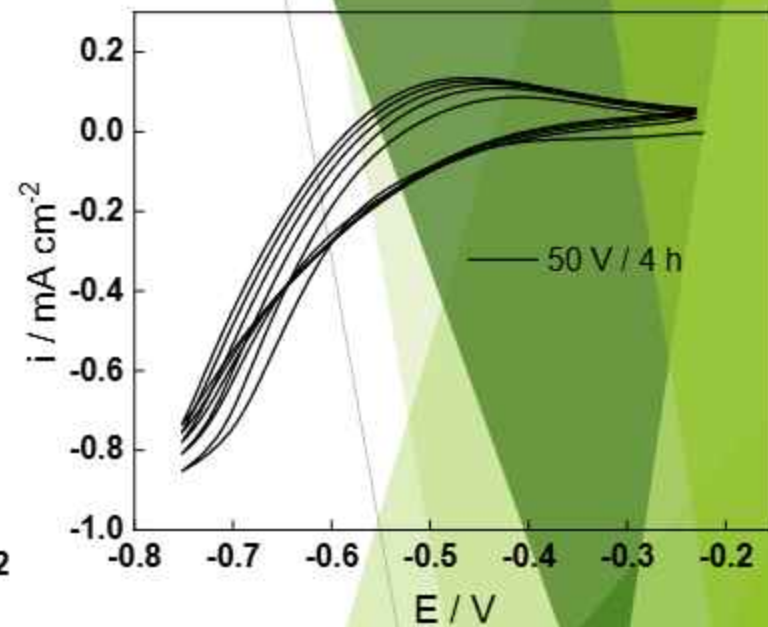
Синтез и модификация

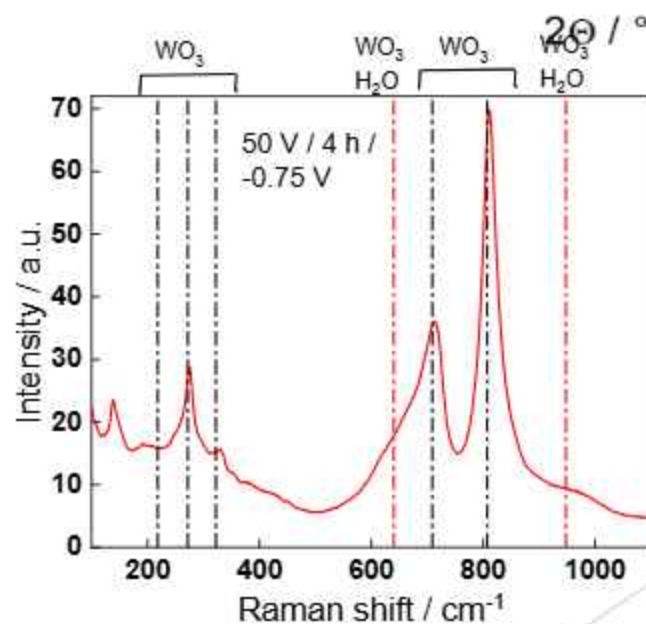
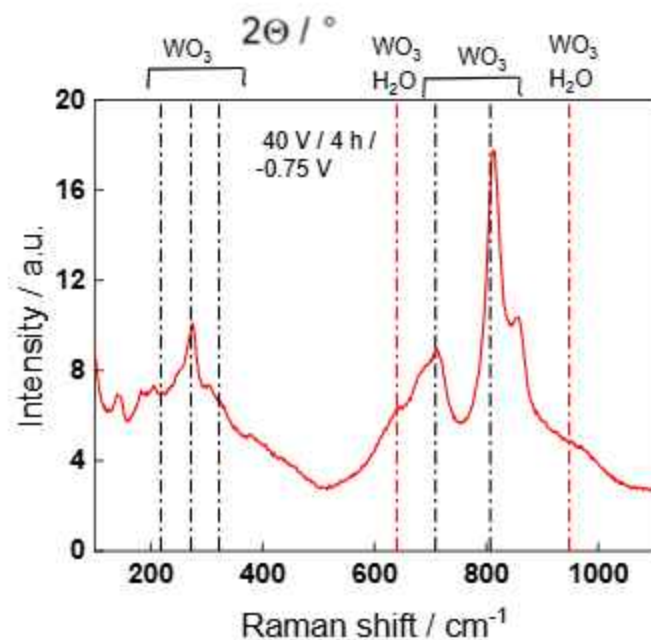
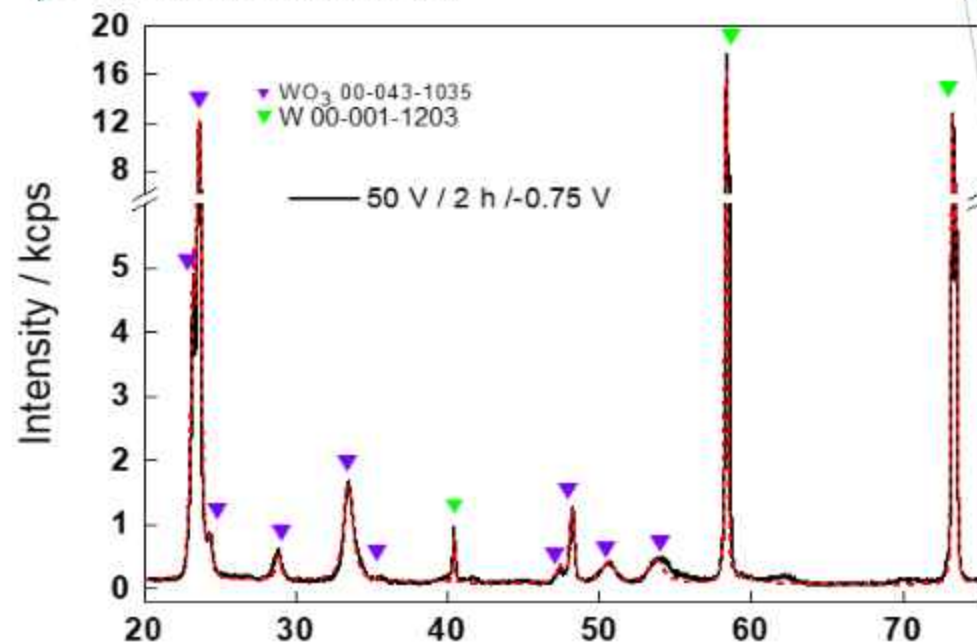
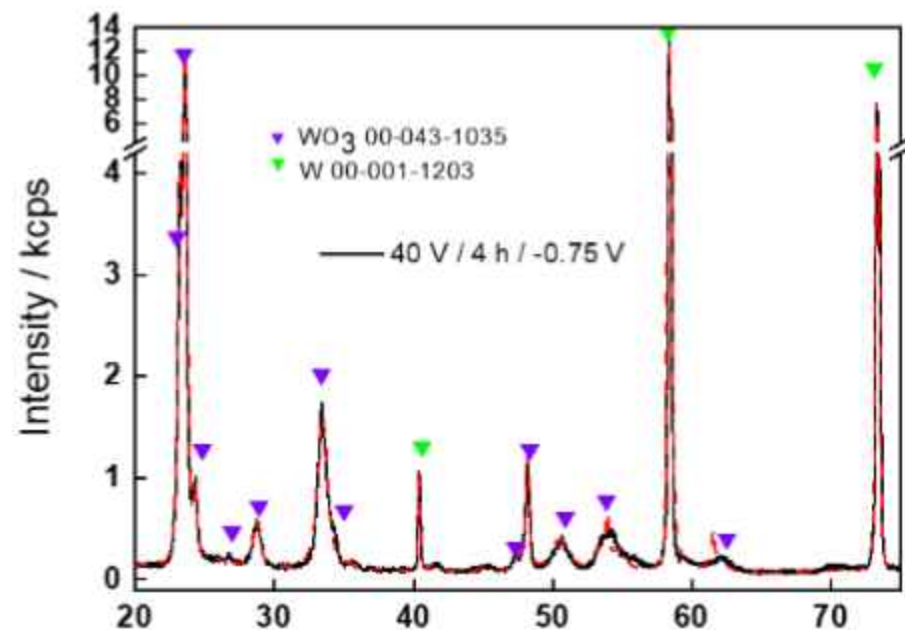


Синтез на волфрамов оксид чрез
анодно окисление на волфрам

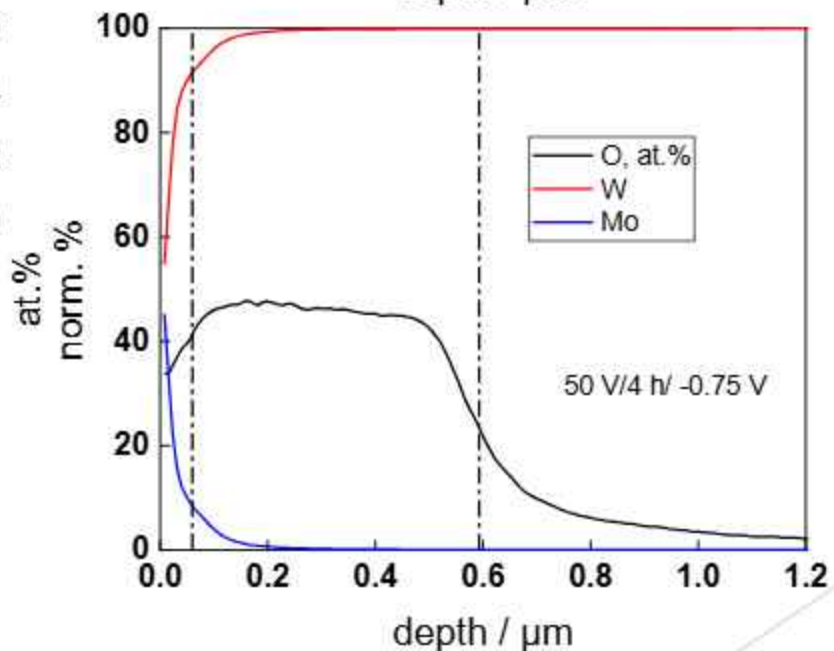
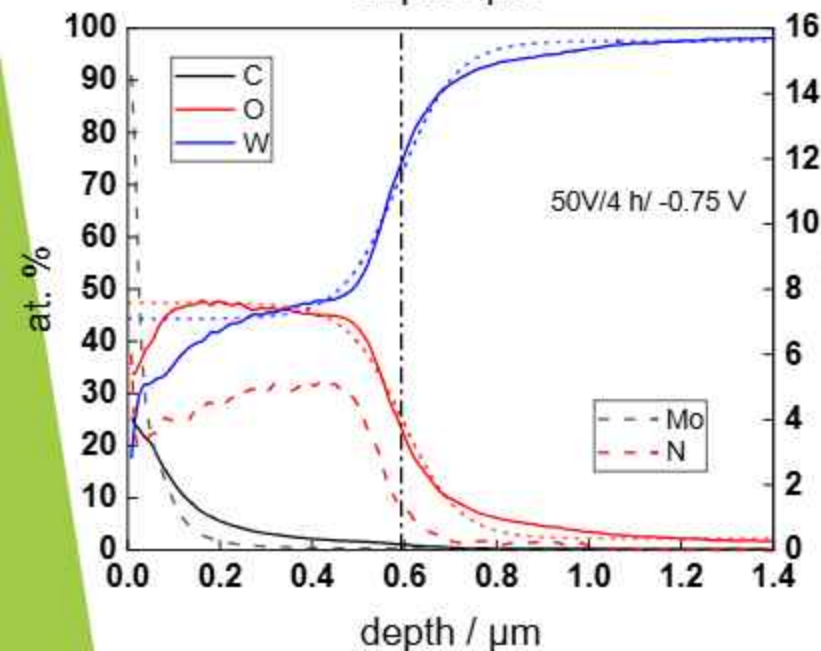
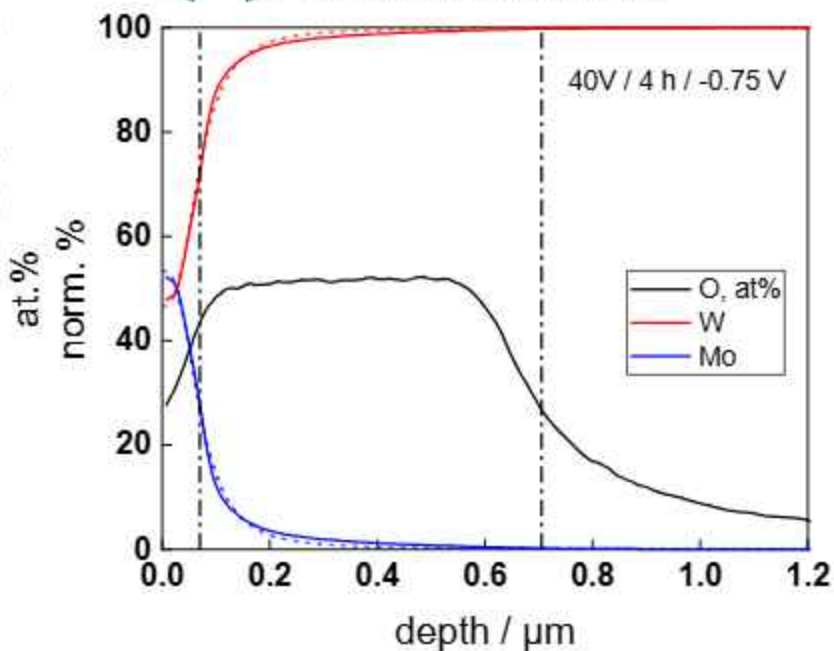
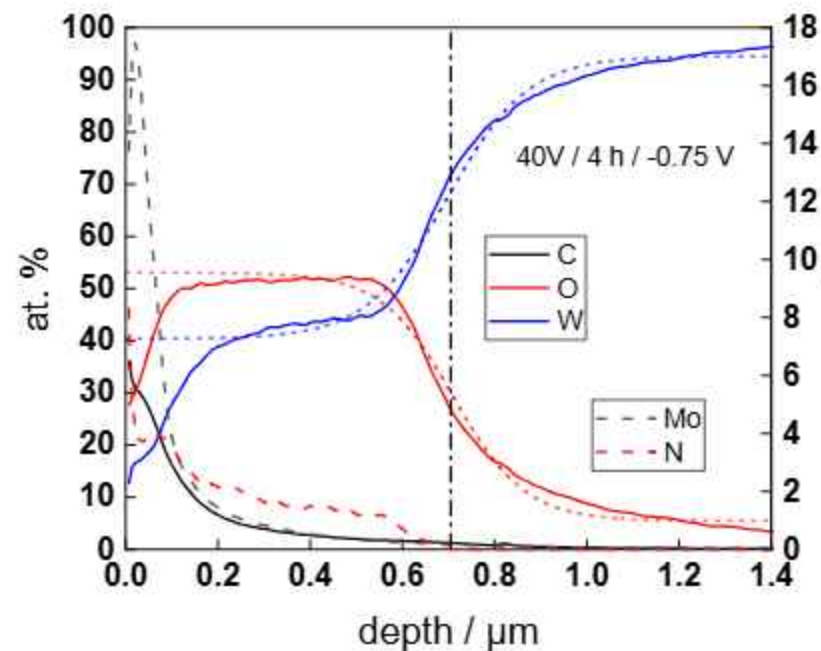


Отлагане на молибденов оксид върху волфрамов оксид
чрез потенциодинамичен метод





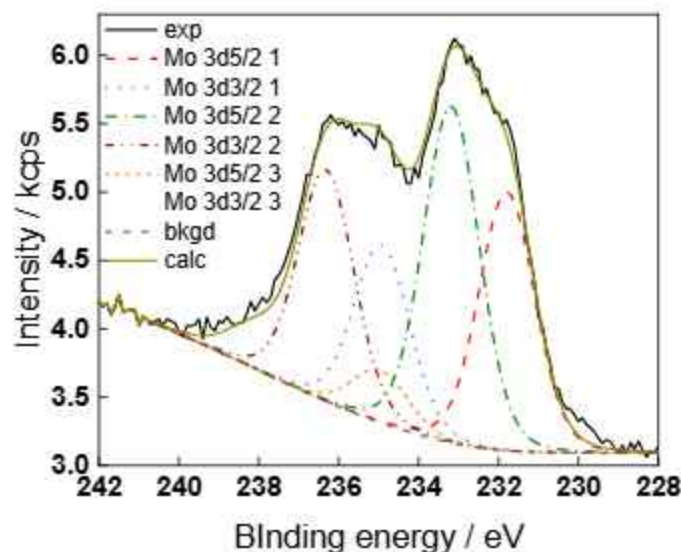
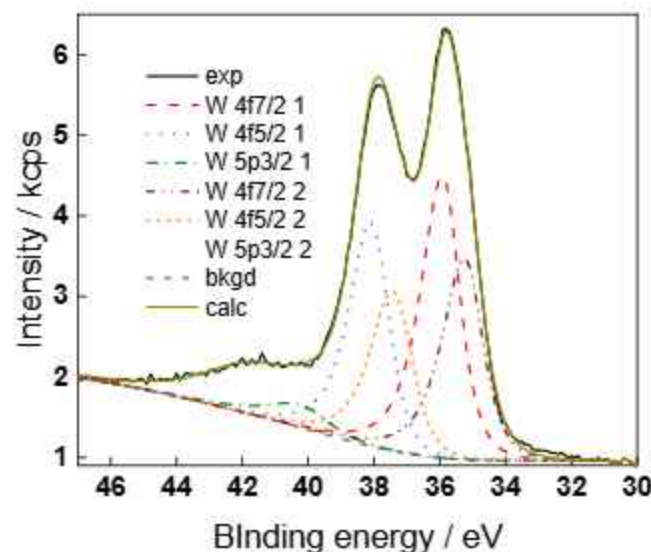
Фазов състав



Елементен
състав в дълбочина
- GDOES

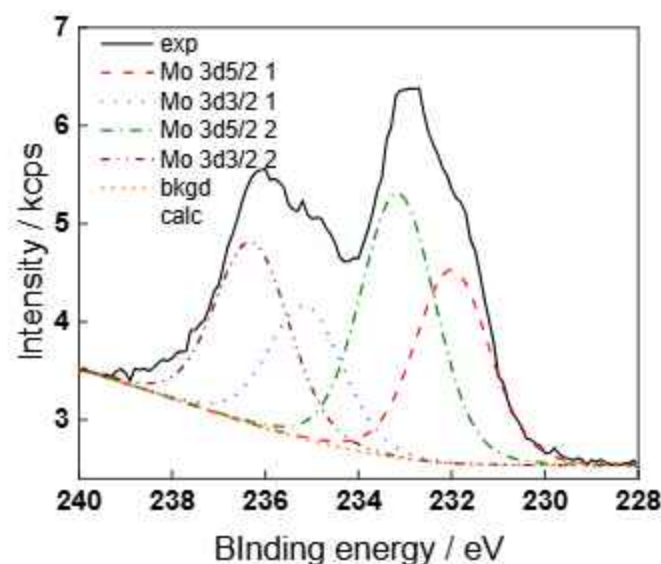
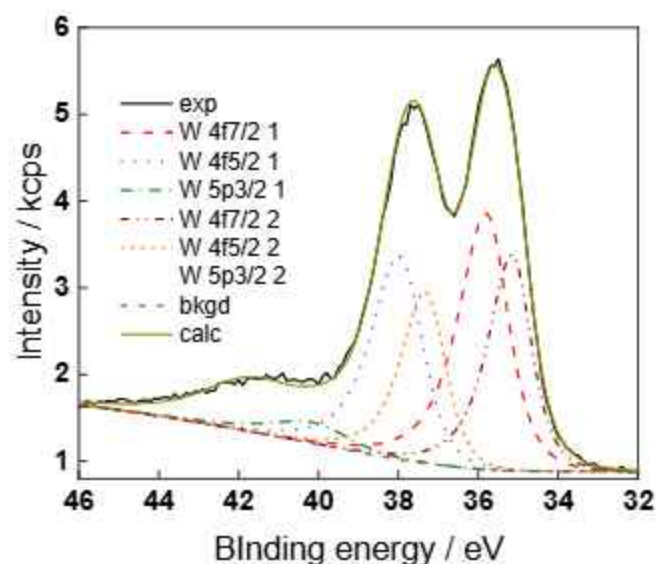


40 V / 4 h / -0.75 V

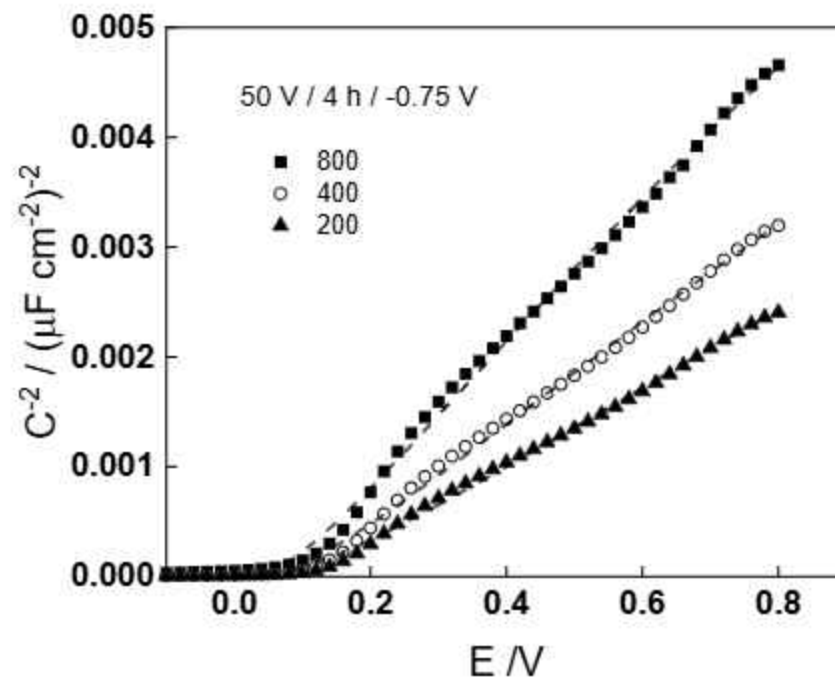
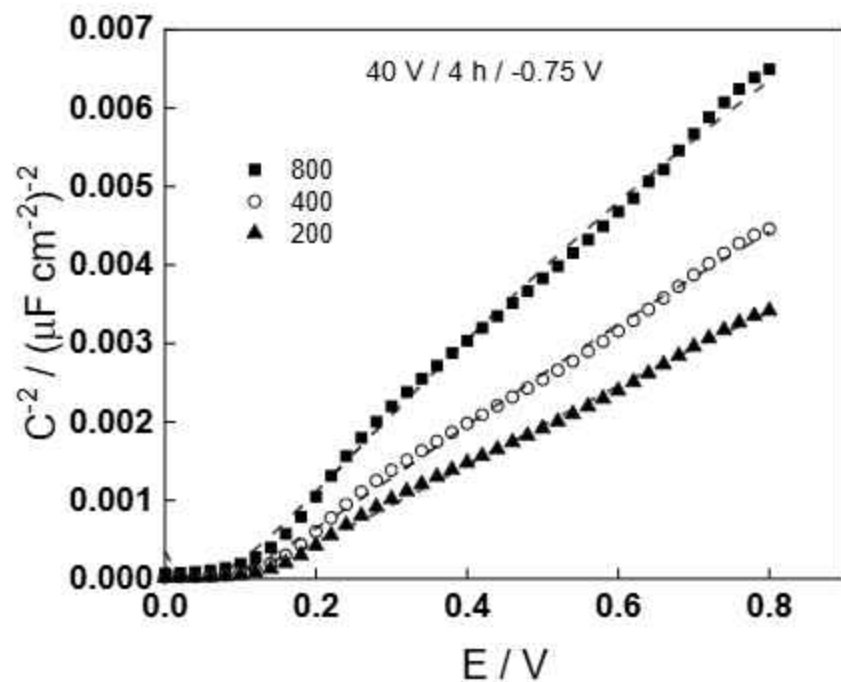


Химичен състав
на повърхността - XPS

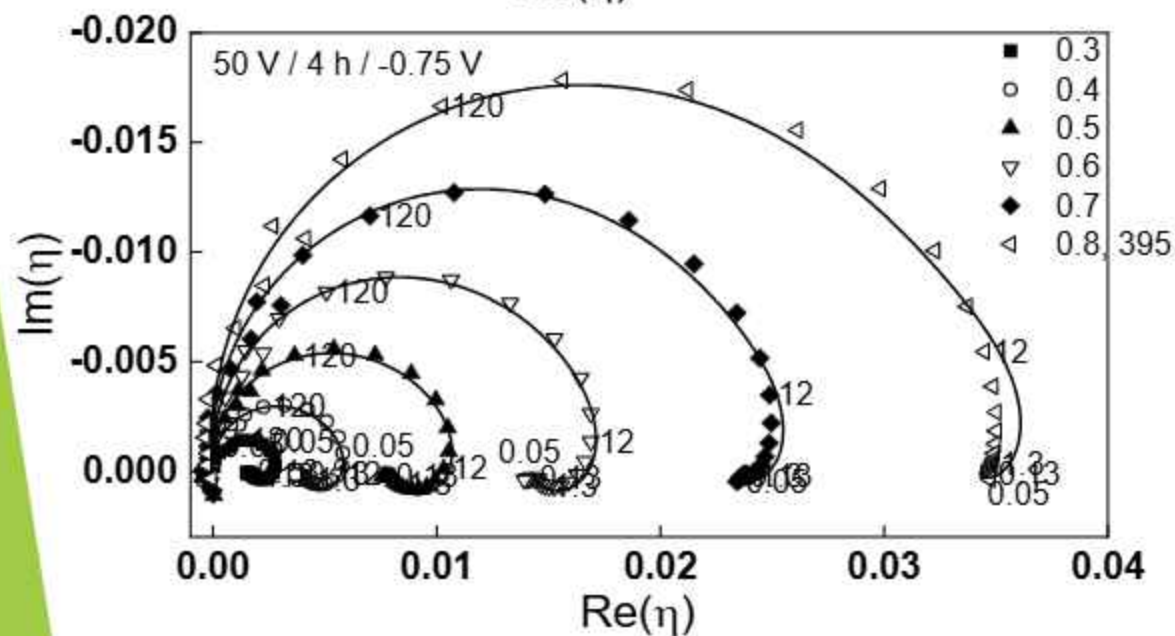
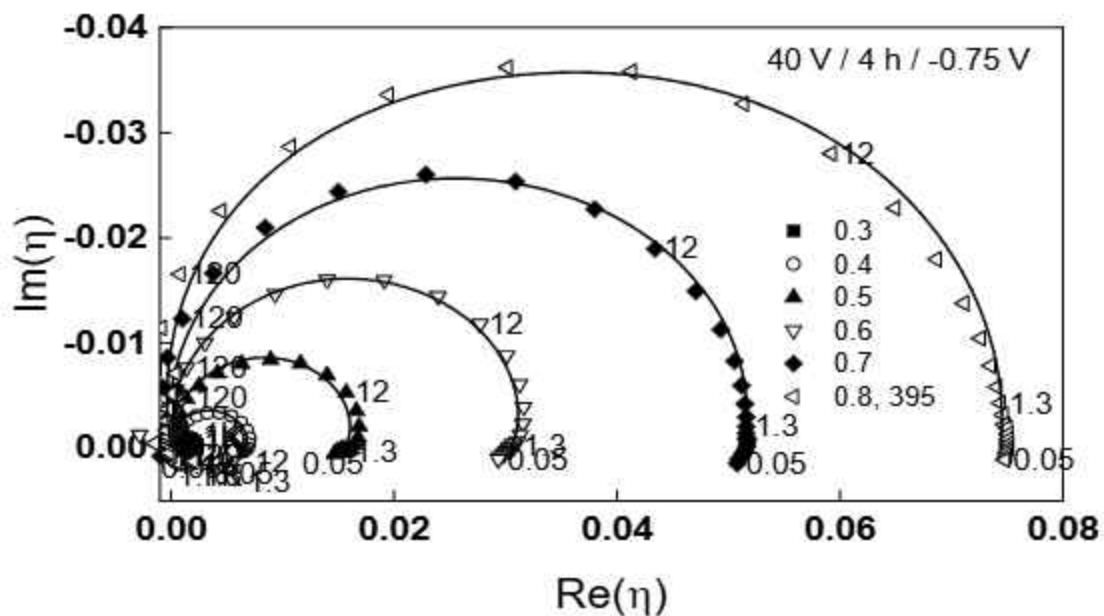
50 V / 4 h / -0.75 V



Полупроводникови свойства - криви капацитет/потенциал



- Интерпретирани с теорията на Abram-Doherty – оценки на плътността на донорите и потенциала на плоските зони



Динамика на фото-индуцирани носители - IMPS

Интерпретирани с обобщен модел на многостадийен процес на окисление - оценка на скоростните константи на пренос на товар и рекомбинация



НГ 4 → публикации 2025-2026 по изследователската програма

1. I. Betova, M. Bojinov, V. Karastoyanov, Corrosion of low-alloyed steel in ethanolamine steam generator chemistry – effect of temperature and flow rate *Molecules* 30 (2025) 418 (Q1).
2. I. Dimitrova, R. Slavchov, Charge regulation in liquid films stabilized by ionic surfactants: change of adsorption with film thickness and phase transitions, *Molecules* 30 (2025) 659 (Q1).
3. M. Bojinov, I. Betova, N. Ivanova, V. Karastoyanov, Effect of temperature and flow rate on erosion-corrosion mechanism of low-alloy steel in simulated steam generator conditions *Materials* 18(2025) 944 (Q1).
4. N. Ivanova, V. Karastoyanov I. Betova, M. Bojinov, Interaction of ethanolamine with magnetite through molecular dynamics simulations, *Molecules*, 30 (2025) 3197 (Q1).
5. I. Betova, M. Bojinov, V. Karastoyanov, Corrosion mechanism of austenitic stainless steel in simulated small modular reactor primary water chemistry, *Metals* 15 (2025) 875.
6. Y. Penkova, I. Betova, S. Budeva, V. Karastoyanov, M. Bojinov, Synthesis, modification and characterization of tungsten oxide catalysts for photoelectrochemical water splitting, *J. PhotoChem. PhotoBiol. A* 470 (2026) 116665 (Q2)
7. S Ojasalo, A Antikainen, S Nandy, V Nurmi, M Bojinov, V. Karastoyanov, E. Huttunen-Saarivirta, High temperature corrosion of steels by nitridation in ammonia, изпратена за печат в *Surface and Coating Technology* 09.2025
8. M. Bojinov, I. Betova, V. Karastoyanov, Corrosion and anodic oxidation of Alloy 690 in simulated primary coolant of a small modular reactor studied by in-situ electrochemical impedance spectroscopy, изпратена за печат в *Metals* 10.25
9. K. Sipilä, M. Bojinov, E. Huttunen-Saarivirta, S. Goel, Ch. Soundararajan, Electrochemical behavior of duplex and austenitic stainless steels in hot sulfuric and hydrochloric acid, изпратена за печат в *Electrochimica Acta* 10.25
10. Y. Penkova, I. Betova, S. Vasileva, V. Karastoyanov, M. Bojinov, Electrochemically synthesized copper-tungsten oxides as photo-cathodes for light-assisted water splitting, изпратена за печат в *J. PhotoChem. PhotoBiol. A*, 10.25
11. A. Toivonen, Ch. Soundararajan, M. Bojinov, P. Pohjanne, E. Huttunen-Saarivirta, Stress corrosion cracking of nickel alloys in anoxic chloride and elemental sulfur containing high-temperature alkaline solutions, финализиране 10.25
12. K. Sipilä, P. Ferreira, T. Ikäläinen, A. Niemelä, I. Betova, M. Bojinov, Decomposition products of oxygen scavengers and their effect on corrosion of steam generator materials – II. Erythorbic acid and methyl-ethyl-ketoxime, финализиране 10.25
13. K. Sipilä, P. Ferreira, T. Ikäläinen, I. Betova, M. Bojinov, Long-term interaction of commercial hydrazine alternatives with tube materials in simulated nuclear plant steam generator conditions финализиране 10-12.25



Презентации на научни конференции 2023-2024

1. V. Karastoyanov, I. Betova, M. Bojinov, Corrosion mechanism of austenitic stainless steel in simulated small modular reactor primary water chemistry, ICAPP 2025, International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Antibes, France, September 17 to 19, 2025, устен доклад
2. Y. Penkova, I. Betova, S. Vasileva, M. Bojinov, V. Karastoyanov, Electrochemically synthesized copper-tungsten oxides as photocathodes for photo-electrochemical water splitting, 9th International Conference on Semiconductor Photochemistry (SP9), Madrid, Spain, September 9 - 12, 2025, постер
3. I. Dimitrova, Charge regulation on curved surfaces, Symposium of the European Colloid and Interface Society, Bristol, UK, Sept. 7-12, 2025, устен доклад
4. N. Ivanova, V. Karastoyanov, I. Betova, M. Bojinov, Molecular Dynamics Studies of Small Molecule Adsorption on Iron Oxide, 12th International Congress of the Balkan Physical Union, 8-12 July 2025, Bucharest, Romania, устен доклад



Изследвания през 2025-2026

- ▶ Продължаване изследванията на адитивно произведени материали - сътрудничество с VTT
- ▶ Продължаване на изследванията по хидразинови алтернативи и влиянието им върху корозионната ерозия на материали на парогенератори - сътрудничество с VTT
- ▶ Моделиране на адсорбцията на хидразинови алтернативи чрез молекулна динамика
- ▶ 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 разтворен H_2 и разтворен Zn
- ▶ Материали за фото-електролиза на вода - волфрамови оксиди, дотирани с оксиди на преходни метали (меден оксид и кобалтов оксид)
- ▶ Деградация на материали (феритни, мартензитни и аустенитни стомани) за изгаряне на амоняк и амонячни горивни елементи - сътрудничество с VTT и индустрията
- ▶ Обща и локална корозия на аустенитни, супер-аустенитни и дуплексни стомани като материали за промишлени процеси за разлагане и утилизация на CO_2 сътрудничество с VTT и индустрията



Участие в проекти 2024-2026

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



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



- **TECHNOLOGIES FOR ADVANCED MANUFACTURING LEADERSHIP IN NET-ZERO INDUSTRIES (TALON), Horizon Europe (подаден 23.9.2025, координатор University of Vaasa, Finland)**