

ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ТИПА ИЛУ

Безуглов В.В.^{1,2}, Брызгин А.А.^{1,2}, Власов А.Ю.^{1,2}, Воронин Л.А.^{1,2},
Коробейников М.В.^{1,2}, Нехаев В.Е.^{1,2}, Максимов С.А.^{1,2},
Радченко В.М.¹, Штарклёв Е.А.^{1,2}, Сидоров А.В.¹, Ткаченко В.О.^{1,2},
Факторович Б.Л.^{1,2}

¹Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН,
проспект Академика Лаврентьева 11, Новосибирск 630090.

²Новосибирский государственный университет,
улица Пирогова, 2, Новосибирск 630090.

M.V.Korobeynikov@inp.nsk.su

АННОТАЦИЯ

Институт ядерной физики СО РАН разрабатывает и производит мощные высокочастотные промышленные ускорители электронов типа ИЛУ с середины 70-х годов XX века. Практически с самого начала этих работ в ИЯФе начались экспериментальные работы по разработке радиационных процессов и технологий. Один ускоритель ИЛУ-6 постоянно используется для проведения экспериментальных работ по изучению взаимодействия интенсивного электронного пучка с различными веществами и материалами. В статье кратко описаны основные процессы исследованные и изученные в ИЯФе. Практически все работы выполнялись в содружестве со сторонними исследовательскими организациями.

ВВЕДЕНИЕ

С 70-х годов XX века ИЯФ является одним из немногих ведущих разработчиков и поставщиков мощных ускорителей электронов в мире [1]. Произведённые в ИЯФе ускорители были поставлены в промышленные и в исследовательские организации многих стран мира, включая индустриально развитые.

С самого начала работ по разработке и поставке мощных промышленных ускорителей электронов в ИЯФе были начаты работы по разработке радиационных технологий.

Первой внедрённой в промышленность радиационной технологий была радиационная модификация полимерной изоляции проводов. Процесс был разработан в ИЯФе специалистами Всесоюзного научно-исследовательского института кабельной промышленности. Первые десятки километров проводов с радиационно-модифицированной изо-

лящей были модифицированы в ИЯФе на ускорителе ИЛУ-6 пока шло строительство производства на кабельных заводах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

Проводились эксперименты по радиационно-стимулированному отверждению эпоксидных компаундов.

Совместно с Институтом автоматики и электрометрии СО РАН проводилась электронно-лучевая обработка оптических кабелей для создания дефектов, которые могут обеспечить эффект лазерного усиления передаваемых сигналов и другие эффекты.

Совместно с Институтом горного дела СО РАН проводились исследования по радиационной обработке измельчённых руд. Облучение большинства рудных образцов привело к уменьшению энергозатрат на последующее измельчение, повышению раскрываемости руды и повышению выхода соединений цветных металлов [2].

Совместно с Институтом экспериментальной ветеринарии Сибири и Дальнего Востока Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ИЭВСиДВ Россельхозакадемии) проводились работы по электронно-лучевой обработке кормовых смесей для птиц с целью увеличения срока годности продуктов северного завоза.

Совместно с Институтом гидродинамики СО РАН исследовалось влияние облучения на образцы из различных полимеров (полиэтилена, фторопласта и полиметилметакрилата) для изучения изменения прочностных свойств (упруго-пластических деформаций) с целью модификации поверхностных и объёмных свойств и набора данных для моделей расчёта деформаций [3].

Исследование влияния облучения на образцы из специальным образом приготовленной нейлоновой плёнки с различными пропитками производилось в рамках работы по созданию протезов кровеносных сосудов совместно с Институтом химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН. Первые опытные образцы протезов уже успешно вживлены мышам [4]. Конечная цель – нарастание собственных тканей организмов на этих протезах.

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

ИЯФ СО РАН, Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Институт горного дела СО РАН и Томский политехнический университет первыми в мире начали изучать радиационно-термические процессы.

Радиационно-термическими считаются такие процессы, при которых полученная доза излучения приводит к нагреву обрабатываемого вещества на сотни градусов. Интенсивный электронный пучок в этих процессах выступает в том числе и как химически стерильный источник тепловой энергии высвобождающейся безынерционно практически мгновенно в зоне поглощения пучка.

Поскольку нагрев обрабатываемых веществ в радиационно-термических процессах происходит как конечный результат релаксации возбуждений электронных оболочек атомов, молекул и в некоторых случаях кристаллов, радиационно-термические процессы обычно идут при температуре ниже на 200-400°C чем эти процессы при обычном нагреве.

Ниже перечислены основные работы, проведённые за последние годы в ИЯФе.

Опытные работы по радиационно-термическому синтезу ячеек топливных элементов велись совместно с Институтом катализа СО РАН [5, 6].

Радиационно-термическое спекание перовскитоподобных соединений для создания мембран проводилось в рамках Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН №82 «Кислородная проницаемость массивных и нанесённых мембран на основе перовскитов со смешанной проводимостью» (2009-2011гг.) совместно с Институтом химии твёрдого тела и механохимии СО РАН.

Разработка процесса радиационно-термического синтеза ферритов проводилась совместно с Томским политехническим университетом и с Институтом химии твёрдого тела и механохимии СО РАН.

Радиационно-термическая закалка коронок буровых фрез проводилась совместно с Институтом теоретической и прикладной механики СО РАН. На Рис. 1 показан шлиф коронки, зона закалки потемнела. В результате такой обработки прочность коронок на истирание увеличивается в 2 раза, а это значит увеличение ресурса работы в 2 раза.

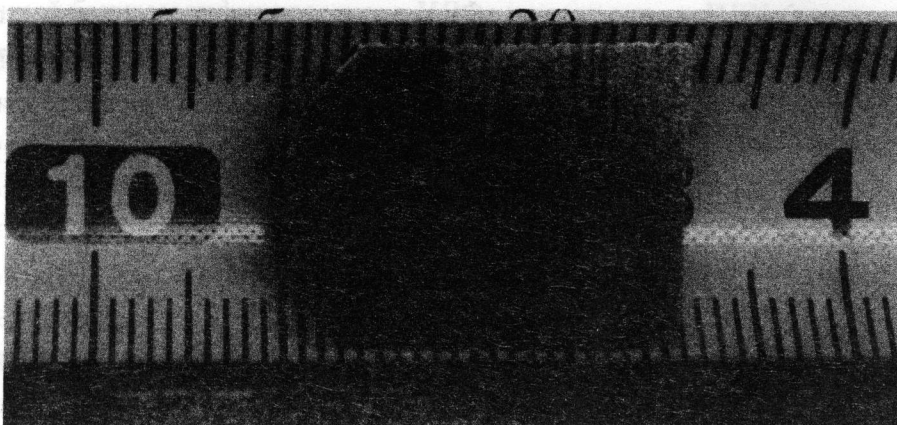
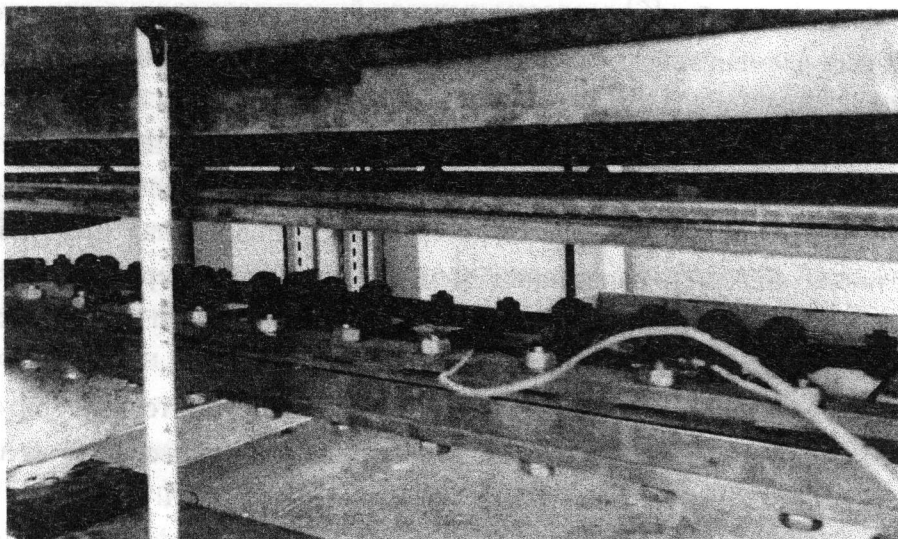


Рис. 1. Шлиф коронки буровых фрез, зона закалки потемнела.

Коронки буровых фрез облучались на водоохлаждаемой подставке непосредственно под выпускным окном ускорителя ИЛУ-6 на воздухе, как показано на Рис. 2.



Рису. 2. Радиационно-термическая обработка коронок буровых фрез.

Совместно с Институтом горного дела СО РАН проводились радиационно-термическая обработка железных руд [7]. В процессе обработки происходили фазовые переходы и появлению магнитных свойств у немагнитных соединений железа (происходило, в частности, образование магнетита), что позволило использовать метод магнитной сепарации для дальнейшего обогащения руды.

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФЕРРИТОВ

Работы по радиационно-термическому синтезу ферритов проводились в ИЯФе совместно с Томским политехническим университетом и с Институтом химии твёрдого тела и механохимии СО РАН [8-10]. Было показано, что радиационно-термический синтез ферритов начинае-

ся при температурах на 200-250°C ниже чем порог термического синтеза. Были подобраны режимы обработки при которых синтез ферритов полностью завершался за 10-15 минут (вместо десятков часов в случае термического синтеза).

Удалось достичь 100% завершения реакции синтеза ферритов – в некоторых фабричных изделиях доля непрореагировавших исходных оксидов может достигать 20-30%.

Томографическая съёмка и дифрактометрические измерения проводились на источнике синхротронного излучения в ИЯФ, в ИХТТМ проводилась обработка результатов дифрактометрических измерений, электронно-микроскопические исследования, исследования обратной микродифракции вторичных электронов, элементный анализ образцов рентгенофлуоресцентным методом и химический анализ образцов методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Радиационно-термическая обработка проводилась с помощью ускорителя ИЛУ-6 расположенного в Институте ядерной физики СО РАН. Энергия электронов была установлена 2,4 МэВ, ток пучка в импульсе до 400 мА, средний ток пучка до 4 мА.

Для проведения радиационно-термических экспериментов был использован специальный теплоизолированный реактор боковые стенки которого были изготовлены из шамотного кирпича (Рис. 3), а крышка представляла собой пластину из пенокварца (плотность 0,15 г/см³) толщиной 0,2-0,3 см.

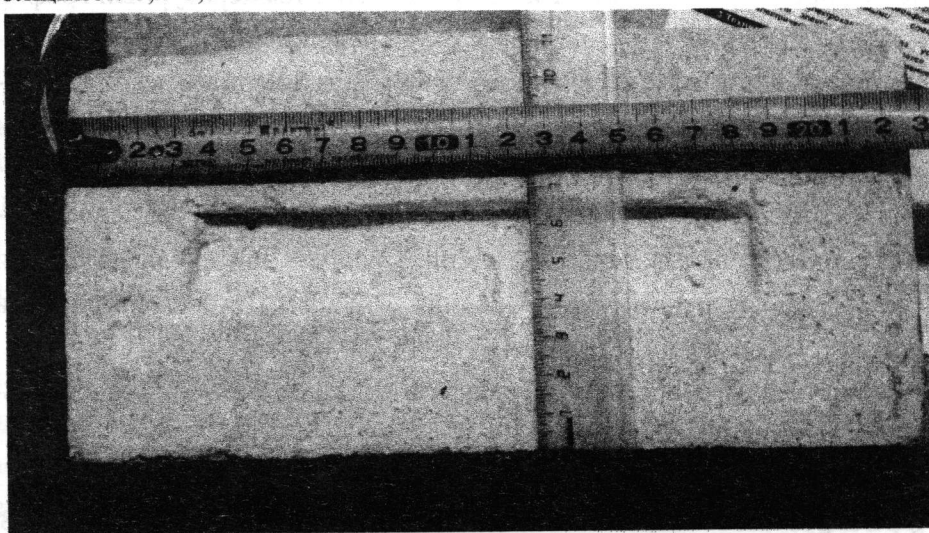


Рис. 3. Рабочая область реактора.

Реактор устанавливался в корпусе под выпускным окном ускорителя таким образом, чтобы зона размещения образцов в реакторе находи-

лась в зоне наибольшей однородности дозы прямо под выпускным окном ускорителя как это показано на Рис. 4.

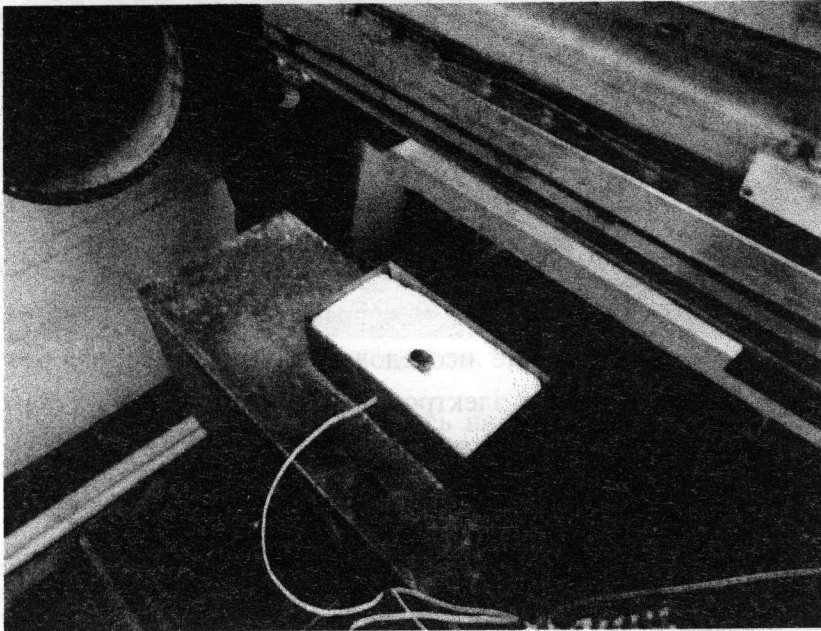


Рис. 4. Реактор под выпускным окном ускорителя электронов ИЛУ-6.

Образцы в этом реакторе нагревались только пучком электронов, управление ускорителем осуществлялось управляющей программой с возможностью стабилизации температуры в соответствии с задаваемым графиком. Температура образца измеряется термопарой, на Рис. 2 виден её провод. В большинстве экспериментов температурный график состоял из двух участков: нагрева и стабилизации температуры. Охлаждение реакционных смесей проводилось естественным путем (в отдельных экспериментах проводилось контролируемое охлаждение при электронно-лучевом воздействии). Скорость нагрева во всех экспериментах составляла $100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Стабилизация температуры при $700\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ происходила в течение 10 мин. Средний ток пучка на стадии нагрева не превышал 4,5 мА. Средний ток пучка при стабилизации температуры составлял 1,5-2,5 мА.

Максимальная рабочая температура в реакторе 1250°C , максимальная достигнутая температура - 1400°C .

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕВОДОРОДОВ

Работы по радиационно-термическому крекингу углеводородов проводились в ИЯФе совместно с Институтом химии твёрдого тела и механохимии СО РАН. Было показано, что радиационно-термический крекинг углеводородов начинается при температурах на $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$ ниже чем порог термического синтеза.

Для работ в диапазоне температур до 400°C был изготовлен реактор с электрическим нагревателем показанный на Рис. 5. Внутренний объём этого реактора позволяет загружать большое количество обрабатываемых материалов.

Снизу в этом реакторе установлен электрический нагреватель который позволяет нагревать образцы до температуры 400°C без воздействия электронного пучка.

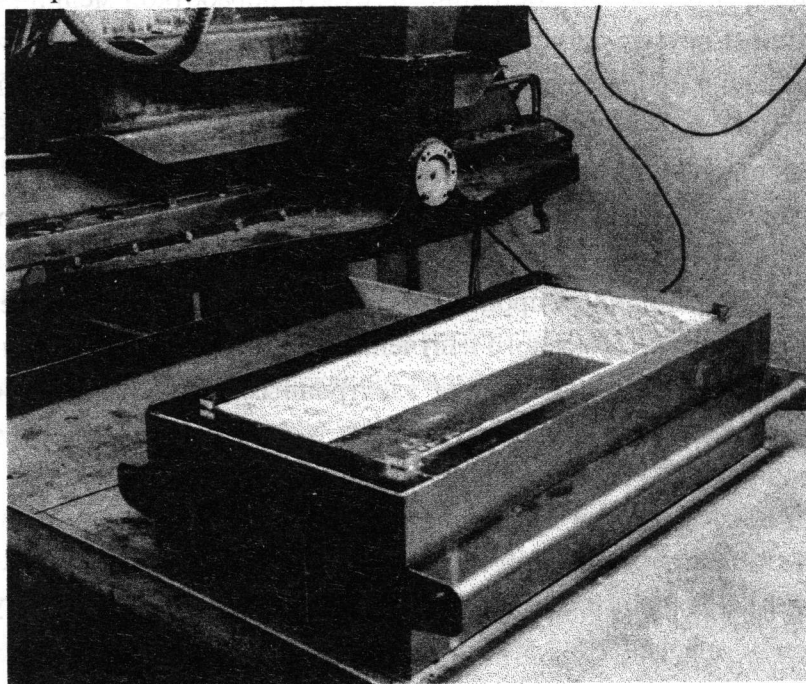


Рис. 5. Реактор с электрическим нагревателем в открытом виде рядом с выпускным окном ускорителя ИЛУ-6.

Реактор был изначально предназначен для проведения радиационно-термических процессов крекинга тяжёлых углеводородов (гудрона, смолы обжиговых печей, пека, тяжёлых нефтей). Для термоизоляции и изоляции от окружающей атмосферы была сделана съёмная крышка позволяющая подавать внутрь и отводить газ от внешнего источника.

В этом реакторе совместно с Институтом химии твёрдого тела и механохимии СО РАН проводились исследования по термическому и радиационно-термическому разложению смолы обжиговых печей. Подогрев образцов позволяет сократить затраты мощности электронного пучка и таким образом увеличить экономическую эффективность процессов в будущем при последующем их масштабировании. Цель работ – изучение возможностей процессов электронно-лучевой обработки тяжёлых углеводородных соединений (в том числе гудрона, смолы обжиговых печей и пека).

УСКОРИТЕЛИ ИЛУ РАБОТАЮЩИЕ В ИЯФЕ

В ИЯФе создана инфраструктура для разработки радиационных технологий и радиационной обработки продукции.

Один ускоритель ИЛУ-10 с энергией до 5 МэВ и мощностью пучка до 50 кВт с конвейерной системой подачи продукции в зону облучения эксплуатируется совместно ИЯФом и Новосибирским государственным университетом. Он постоянно загружен обработкой медицинской продукции и других продуктов, обеспечивая потребности Новосибирской области и прилегающих регионов. Кроме того, на нём периодически проводятся экспериментальные работы, в основном по обработке пищевых продуктов и сельскохозяйственной продукции.

Второй ускоритель ИЛУ-10 снабжён столиком для транспортировки продукции в зоне облучения, поэтому он в основном используется для отработки радиационных процессов и периодически он используется в режиме генерации тормозного излучения для обработки продукции которая не может быть обработана электронным пучком с энергией 5 МэВ. На нём регулярно проводятся работы по радиационной деструкции фторопласта – происходит переработка отслуживших свой срок деталей, получающийся в результате мелкодисперсный порошок фторопласта используется в качестве антифрикционных добавок.

В ИЯФе с конца 70-х годов XX века работает ускоритель ИЛУ-6 с диапазоном энергии 1,6-2,5 МэВ и мощностью пучка до 10 кВт. Этот ускоритель снабжён подвижным столиком для транспортировки продукции в зоне обработки. Иногда он также работает в режиме генерации тормозного излучения.

Этот ускоритель используется в основном для отработки радиационных технологий, изучения воздействия мощного электронного пучка на различные материалы и химические соединения, а также иногда для обработки маленьких партий продукции.

За прошедшие десятилетия на этом ускорителе было разработано много радиационных технологий, начиная от технологии облучения проводов и кабелей, радиационно-термического синтеза, поверхностной модификации полимерных материалов и до стерилизации медицинских изделий, синтеза лекарственных средств и подготовки имплантатов [4, 12]. Также регулярно проводятся исследования радиационной стойкости конструкционных материалов [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние 40 лет ИЯФ поставил десятки промышленных ускорителей электронов серии ИЛУ в исследовательские организации и промышленные предприятия России и многих других стран, включая промышленно развитые.

Параллельно с поставками ускорителей в ИЯФе велись исследования взаимодействия электронного пучка с различными веществами и материалами.

Ниже приведён неполный список процессов разработанных в ИЯФе совместно со специалистами профильных организаций и внедрённых в промышленность.

- Радиационная модификация изоляции проводов и кабелей.
- Радиационная модификация термоусаживаемых трубок и плёнок.
- Радиационная сшивка полиэтиленгликоля в водном растворе для получения гелей служащих гидрофобной основой для косметических и медицинских препаратов.
- Радиационная стерилизация одноразовых медицинских шприцев при рабочей энергии электронного пучка 2,5 МэВ (до этого использовали маломощные ускорители с энергией 6-8 МэВ).
- Радиационный синтез ветеринарного препарата «Имозимаза» и медицинского препарата «Тромбовазим».
- Электронно-лучевая деконтаминация растительного лекарственного сырья.
- Стерилизация имплантатов позвоночных дисков для человека (эти имплантаты были вживлены пациентам в Новосибирске).

В ИЯФе накоплен опыт разработки радиационных технологий и есть ускорители, на которых можно проводить экспериментальные работы.

В ИЯФе можно проводить исследования структуры и свойств материалов до и после обработки методом малоуглового рентгеновского рассеяния с использованием синхротронного излучения и другими методами.

Электронный пучок – уникальный инструмент позволяющий модифицировать свойства множества материалов и изделий и улучшать существующие процессы. Остаётся добавить, что и стоит он дорого, и поэтому радиационные технологии внедряются в нашу промышленность медленно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Industrial Radiation Processing With Electron Beams and X-rays. IAEA techdoc, 1 May 2011 – Revision 6.

<http://www.cirms.org/pdf/Industrial%20Radiation%20Processing%20-%20May%202011%20-%20Revision%206.pdf>

2. Korobeinikov, M.V., Bryazgin, A.A., Bezuglov, V.V., Shtarklev, E.A., Vlasov, A.Yu., Kondratyev, S.A., Rostovtsev, V.I. Radiation-Thermal Treatment in Ore Dressing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 81, Issue 1, 2015 Article 012124.

3. С.В. Панин, Л.А. Корниенко, Т. Пувадин, Л.А. Мержиевский, С.В. Шилько, М.А. Полтаранин, Л.Р. Иванова, М.В. Коробейников, Е.А. Штарклев. Трение и изнашивание сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного высокоэнергетической обработкой поверхности электронным пучком. Трение и смазка в машинах и механизмах, 2011, № 12, с. 26-31. ISSN: 1819-2092.

4. Степанова А.О., Коробейников М.В., Юношев А.С., Лактионов П.П. Влияние облучения пучком электронов на физико-химические характеристики матриц, изготовленных методом электроспиннинга. Сибирский научный медицинский журнал. 2016. Т. 36. № 1. С. 36-41.

5. V. Sadykov, N. Mezentseva, V. Usoltsev, E. Sadovskaya, A. Ishchenko, S. Pavlova, Y. Bepalko, T. Kharlamova, E. Zevaka, A. Salanov, T. Krieger, V. Belyaev, O. Bobrenok, N. Uvarov, Yr. Okhlupin, O. Smorygo, A. Smirnova, P. Singh, A. Vlasov, M. Korobeynikov, A. Bryazgin, P. Kalinin, A. Arzhannikov. Solid oxide fuel cell composite cathodes based on perovskite and fluorite structures. Journal of Power Sources 196 (2011) 7104–7109.

6. В. Садыков, В. Усольцев, Ю. Федорова, В. Собянин, П. Калинин, А. Аржанников, А. Власов, М. Коробейников, А. Брызгин, А. Саланов, М. Предтеченский, О. Бобренок, А. Улихин, Н. Уваров, О. Сморыго, А. Ильющенко, В. Ульяницкий, С. Злобин. Дизайн среднетемпературных твердооксидных топливных элементов на пористых подложках из деформационно упрочненного Ni-Al сплава. Электрохимия, 2011, Т. 47, № 4, с. 517–523.

7. Korobeinikov, M.V., Bryazgin, A.A., Bezuglov, V.V., Shtarklev, E.A., Vlasov, A.Yu., Kondratyev, S.A., Rostovtsev, V.I. Radiation-Thermal Treatment in Ore Dressing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 81, Issue 1, 2015 Article 012124.

8. Суржиков А.П., Власов В.А., Брызгин А.А., Коробейников М.В., Васендина Е.А. Исследование магнитных свойств литий-замещенных феррошпинелей, синтезированных путём нагрева в электронном пучке.

Известия высших учебных заведений. Физика, 2013, № 1-2, Т. 56, стр. 151-154.

9. У.В. Анчарова, М.А. Михайленко, Б.П. Толочко, М.Р. Шарафутдинов, М.В. Коробейников, Е.А Штарклев, А.Ю. Власов, А.А. Брызгин. Влияние облучения релятивистскими электронами на кинетику синтеза $Ni_{0.75}Zn_{0.25}Fe_2O_4$ (статья). УДК 539.1.044: 548.4, Вестник НГУ: Серия «Физика», Выпуск 4, Том 8 (2013) с. 41-48.

10. Ancharova, U.V., Mikhailenko, M.A., Tolochko, B.P., Lyakhov, N.Z., Korobeinikov, M.V., Bryazgin, A.A., Bezuglov, V.V., Shtarklev, E.A., Vlasov, A.Yu., Vinokurov, Z.S. Synthesis and Staging of the Phase Formation for Strontium Ferrites in Thermal and Radiation-Thermal Reactions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 81, Issue 1, 2015, article 012122.

11. Mikhailenko, M.A., Ancharova, U.V., Tolochko, B.P., Korobeinikov, M.V., Bryazgin, A.A., Bezuglov, V.V., Shtarklev, E.A., Vlasov, A.Yu., Pokrovsky, L.M., Korolev, K.G. Radiation-Thermal Paraffin Cracking. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 81, Issue 1, 2015, article 012123.

12. M V Korobeynikov, A A Bryazgin, V V Bezuglov, E A Shtarklev, A Yu Vlasov, L A Voronin and V O Tkachenko. Radiation treatment of the ceramic and polymer implants. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 110, 2016, article 012108.

13. В.В. Петров, Ю.А. Пупков. Радиационная стойкость изоляционных материалов магнитных систем ускорителей. Журнал технической физики №7, 2016, стр. 65. <http://journals.ioffe.ru/articles/43317>.