

МОЩНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ 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

Мощные высокочастотные промышленные ускорители электронов типа ИЛУ разработаны и выпускаются Институтом ядерной физики СО РАН. Эти ускорители на протяжении десятилетий поставляются в исследовательские учреждения и промышленные предприятия России и зарубежных стран. Максимальная энергия электронного пучка генерируемого ускорителями ИЛУ составляет 10 МэВ, максимальная мощность пучка – 100 кВт.

ВВЕДЕНИЕ

Линейный ускоритель заряженных частиц был создан и запатентован в 1928 году [1, 2, стр. 25]. С 70-х годов XX века ИЯФ является одним из немногих ведущих разработчиков и поставщиков мощных ускорителей электронов в мире. Произведённые в ИЯФе ускорители были поставлены в промышленные и в исследовательские организации многих стран мира, включая индустриально развитые.

В 60-е годы XX века хорошими параметрами мощных ускорителей электронов были энергия 1-1,5 МэВ и мощность электронного пучка 10 кВт. Высокочастотные линейные ускорители работали в диапазоне энергии 6-9 МэВ, их мощность была не больше нескольких кВт.

В 70-е годы XX века в ИЯФе были разработаны передовые для своего времени импульсные линейные высокочастотные ускорители электронов типа ИЛУ-6, их максимальная энергия была 1,5 МэВ, максимальная мощность пучка была не меньше 20 кВт. Во второй половине 70-х годов начались поставки ускорителей ИЛУ-6 в промышленность.

Большинство высокочастотных линейных ускорителей электронов имеют многорезонаторные ускоряющие структуры, их рабочая частота около 2,5 ГГц, это сантиметровый диапазон волн.

Ускорители типа ИЛУ являются достаточно специфическими линейными высокочастотными ускорителями – это однорезонаторные машины, работающие в режиме стоячей полуволны (в отличие от большинства высокочастотных линейных ускорителей). Рабочие частоты ускорителей ИЛУ находятся в метровом диапазоне радиоволн – 118 МГц у ИЛУ-10 (длина волны 2,5 м) и 178 МГц (длина волны 1,7 м) у ИЛУ-8, ИЛУ-12 и ИЛУ-14. Длина ускоряющего зазора у ИЛУ-10 составляет 26 см, у ИЛУ-8 – 3,6 см. Это существенно короче длины волны в вакууме (2,5 м и 1,7 м соответственно), поэтому в процессе ускорения электроны приобретают энергию практически равную максимальному напряжению на резонаторе. Это объединяет ускорители ИЛУ с ускорителями прямого действия, у которых энергия электронов равна разности потенциалов между инжектором и анодом.

В ускорителях ИЛУ устанавливается триодный инжектор электронов что позволяет оперативно управлять током пучка и быстро выключать ускорители в случае возникновения нештатных ситуаций.

ВЧ генераторы ускорителей ИЛУ реализованы на импульсных генераторных триодах ГИ-50А, которые дешевле и обладают большим ресурсом чем используемые в большинстве высокочастотных линейных ускорителей клистроны и магнетроны.

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН выпускаются промышленные ускорители электронов с мощностью пучка до 50 кВт при энергии 5 МэВ (ИЛУ-10) и до 100 кВт при энергии 10 МэВ (ИЛУ-14). Для удовлетворения потребностей кабельной промышленности был разработан компактный ускоритель ИЛУ-8 с диапазоном энергии 0,8-1 МэВ и мощностью пучка до 20 кВт. Этот ускоритель обычно размещается внутри местной радиационной защиты устанавливаемой в производственных цехах.

УСКОРИТЕЛЬ ИЛУ-8

Ускоритель ИЛУ-8 подробно описанный в [3] был разработан в начале 80-х годов XX века, его диапазон рабочей энергии 0,8-1 МэВ, мощность пучка до 20 кВт. Он был предназначен для обработки проводов – от тонких монтажных проводов до высоковольтных проводов системы зажигания двигателей внутреннего сгорания, позднее его стали применять для обработки термоусаживаемых трубок и плёнок. Эта продукция не требует большой глубины проникновения, поэтому мак-

симальная энергия была выбрана равной 1 МэВ. При этой энергии глубина проникновения пучка составляет примерно 3 мм в большинстве полимерных материалов. Для круглых длинномерных изделий (термосаживаемые трубки, провода, кабели и др.) применяется четырёхстороннее облучение.

Благодаря низкой максимальной энергии удалось создать малогабаритный ускоритель который может быть установлен внутри местной биологической защиты которая может быть установлена в стандартных цеховых помещениях. Откатная стена обеспечивает доступ внутрь защиты. Для минимизации размеров установки ВЧ генератор выполнен в виде отдельной конструкции и размещается снаружи рядом с радиационной защитой. В боковой стене защиты предусмотрены лабиринты для ввода и вывода облучаемой продукции.

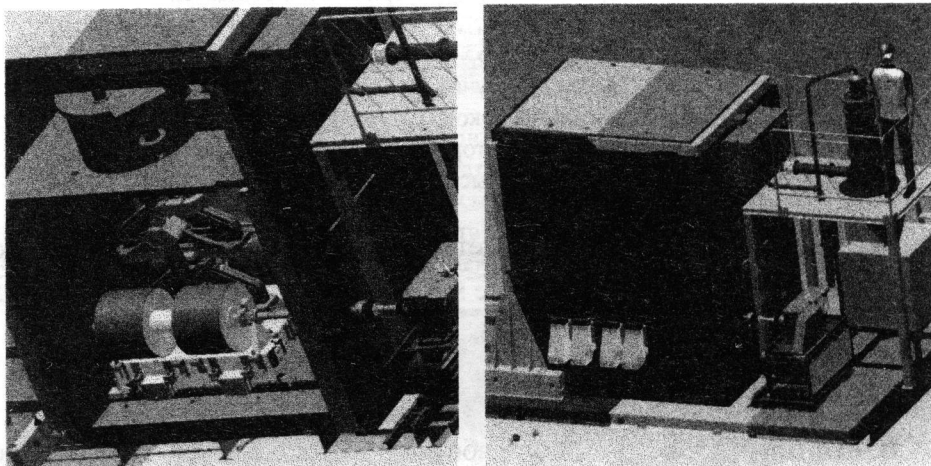


Рис. 1. Ускоритель ИЛУ-8 внутри местной защиты.

Ускоритель ИЛУ-8 с устройством выпуска пучка для четырёхстороннего облучения проводов и трубок внутри местной защиты показан на Рис. 1 и Рис. 2. Стандартная защита представляет собой стальной короб, разделенный на две части. В верхнем отделении размещаются вакуумный бак ускорителя и его вспомогательное оборудование. В нижнем отделении размещаются устройство выпуска пучка и перематывающее устройство обеспечивающее транспортировку длинномерных изделий под пучком.

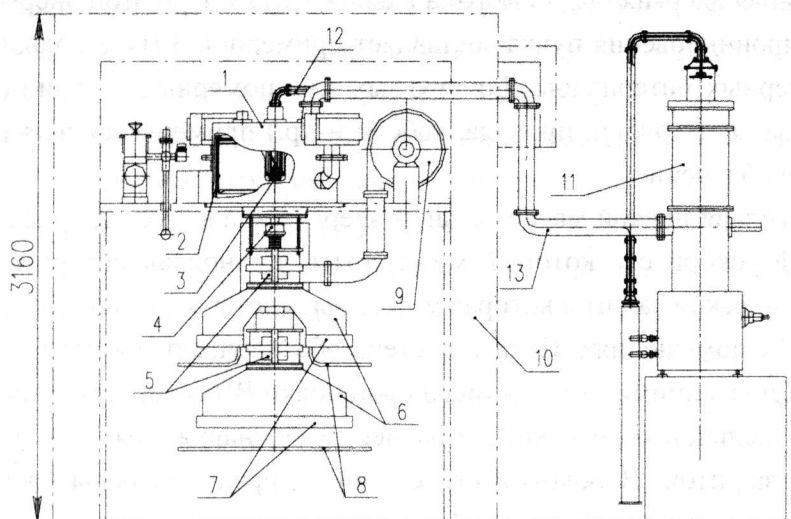


Рис. 2. Ускоритель ИЛУ-8 внутри местной защиты.

- 1 – вакуумный бак, 2 – резонатор, 3 – инжектор электронов, 4 – шибер,
 5 – электромагниты развёртки, 6 – раструбы выпускного устройства,
 7 – окна для выпуска пучка, 8 – коллекторы пучка,
 9 – вентилятор обдува выпускных окон, 10 – местная радиационная защита,
 11 – высокочастотный генератор, 12 – волновод обратной связи,
 13 – волновод ввода высокочастотной мощности.

Вес защиты 76 тон, она может быть установлена в любом цеху, имеющем достаточную высоту (не менее 4 м). При желании ускоритель ИЛУ-8 можно разместить в компактном бетонном бункере.

УСКОРИТЕЛЬ ИЛУ-10

В 90-е годы XX века был разработан ускоритель ИЛУ-10 с энергией до 5 МэВ и мощностью пучка до 50 кВт. Этот ускоритель применяется для обработки толстостенных полимерных изделий (термоусаживаемые трубки, провода, кабели и др.) и стерилизации медицинских изделий. Перспективное направление использования этого ускорителя – обработка пищевых продуктов и продукции сельского хозяйства для улучшения их сохранности и увеличения срока хранения, а также для предотвращения распространения инфекций.

Высокая добротность резонатора (шунтовое сопротивление резонатора ИЛУ-10 – 9 МОм) и использование двух ВЧ генераторов позволило обеспечить максимальную рабочую энергию ускорителя 5 МэВ и мощность пучка до 50 кВт.

Высота ИЛУ-10 вместе с генераторами составляет 2,4 м. На Рис. 3 показана конструкция ускорителя ИЛУ-10 с линейным выпускным устройством обеспечивающим развёртку пучка вдоль одного окна длиной 980 мм и шириной 80 мм.

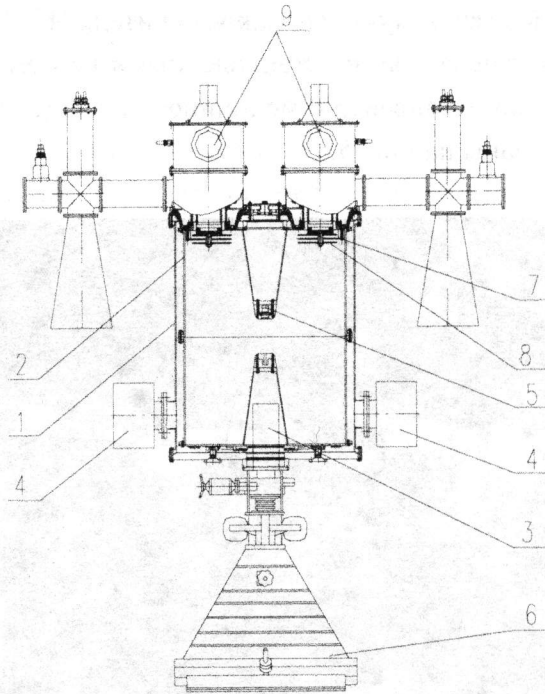


Рис. 3. Ускоритель ИЛУ-10.

- 1 – вакуумный бак, 2 – резонатор, 3 – фокусирующая линза,
4 – магниторазрядные насосы, 5 – инжектор электронов,
6 – выпускное устройство – линейная развёртка,
7 – петля связи, 8 – вакуумный конденсатор петли связи, 9 – ВЧ генератор.

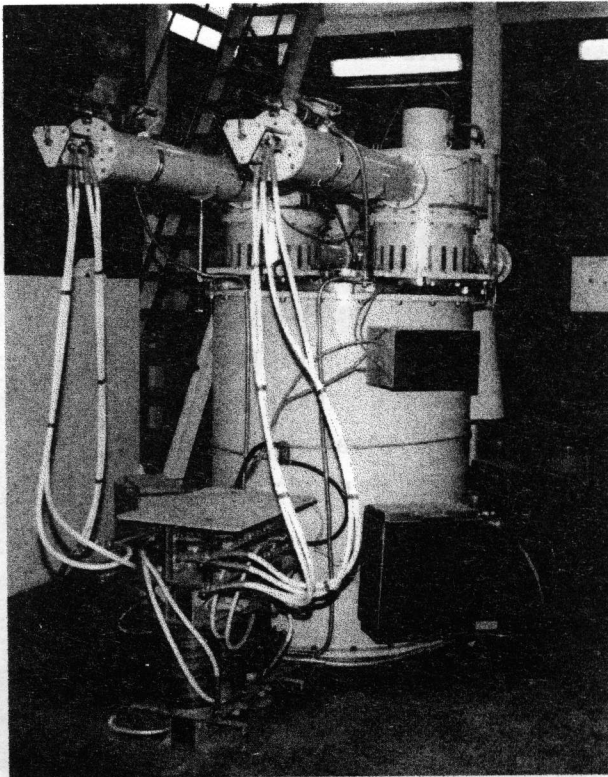


Рис. 4. Ускоритель ИЛУ-10.

На Рис. 4. показан вакуумный бак ускорителя ИЛУ-10 с двумя высокочастотными генераторами установленными на нём. Линейное выпускное устройство и конвейер с медицинской продукцией упакованной в коробки показаны на Рис. 5.

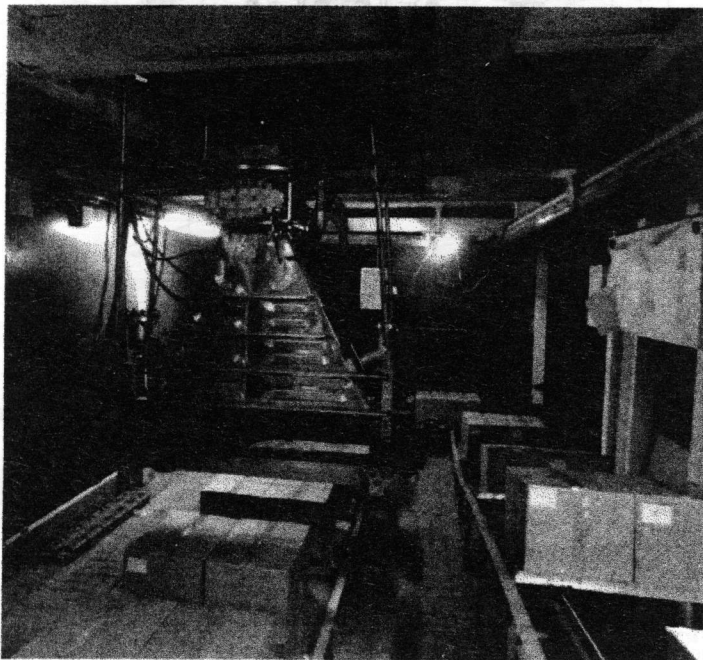


Рис. 5. Выпускное устройство ускорителя ИЛУ-10 и конвейер с продукцией.

ИЯФ может изготовить выпускные устройства с большей длиной выпускного окна в соответствии с требованиями заказчика. Для четырёхсторонней обработки проводов и кабелей ускоритель снабжается многооконным выпускным устройством, аналогичным показанному на Рис. 2.

Энергия 5 МэВ позволяет экономически эффективно работать в режиме генерации тормозного излучения, проникающая способность которого такая же, как у излучения изотопных источников, но оно обладает выраженной направленностью в направлении пучка, что повышает эффективность его использования.

Конвертер устанавливается непосредственно под выпускным окном ускорителя. В разработанном для ИЛУ-10 конвертере при энергии 5 МэВ и мощности пучка 50 кВт мощность тормозного излучения составляет около 4 кВт, что соответствует 294 кКи мощности изотопного источника, в то время как обработка электронным пучком мощностью 50 кВт соответствует мощности источника 3650 кКи.

Подробное описание ускорителя ИЛУ-10 приведено в [4].

Рост рынка одноразовых медицинских изделий и расширение использования ускорителей электронов для обработки пищевых продуктов вызвали спрос на мощные ускорители с энергией до 10 МэВ и мощностью пучка десятки и сотни кВт.

Однорезонаторные ускорители оказались неэффективными при энергии выше 5 МэВ – потери в резонаторе нарастают пропорционально квадрату энергии. Для снижения потерь была разработана и смоделирована модульная многорезонаторная ускоряющая структура. На основе этой структуры были разработаны многорезонаторные ускорители ИЛУ-12 и ИЛУ-14 с диапазонами энергии 5-7,5 МэВ и 7,5-10 МэВ соответственно и мощностью пучка до 60 кВт и до 100 кВт. Описание ускорителя ИЛУ-14 приведено в [5].

На Рис. 6 показана конструкция ускоряющей структуры ускорителя ИЛУ-14, длина структуры – 7,16 метра, суммарная длина вместе с выпускным устройством – 8,4 метра.

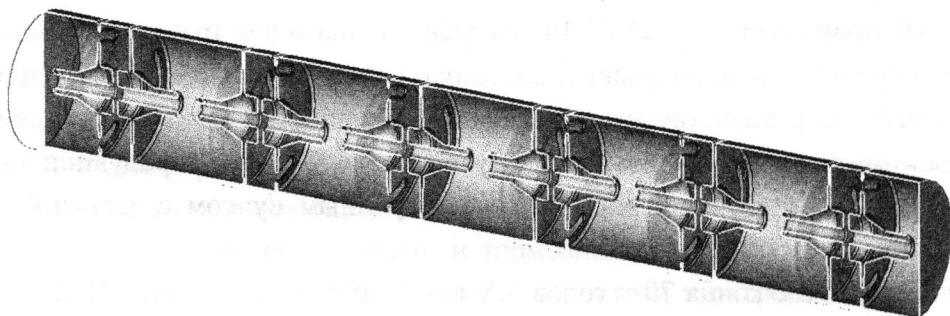


Рис. 6. Ускоряющая структура ускорителя ИЛУ-14.

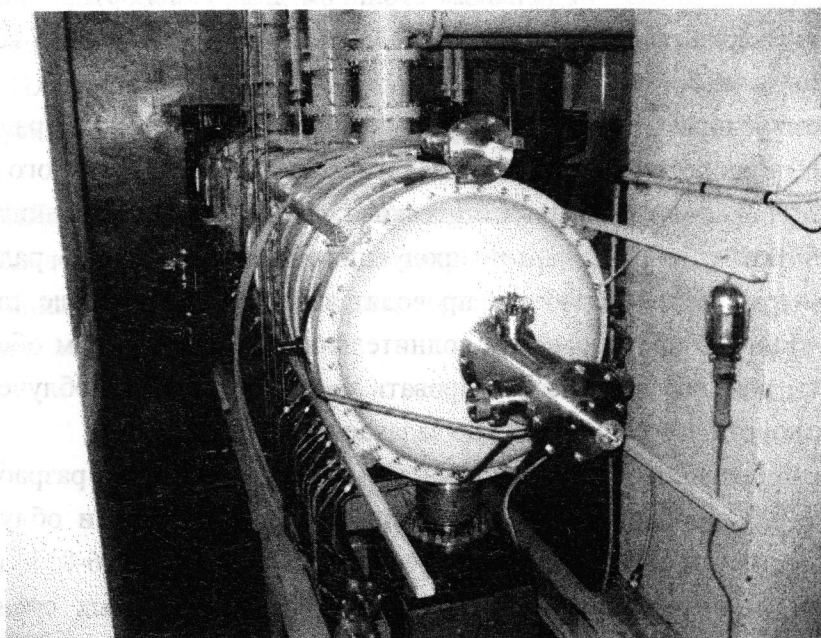


Рис. 7. Ускоряющая структура ускорителя ИЛУ-14.

На Рис. 7 показана ускоряющая структура ускорителя установленная у заказчика. Для питания этих ускорителей используются двухкаскадные высокочастотные генераторы на триодах ГИ-50А, рабочая частота – 178 МГц. Ввод высокочастотной мощности в структуру осуществляется сверху через трубчатые волноводы видные на рисунке.

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.

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.

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. Эксперименты по радиационно-термической обработке проводятся на этом ускорителе так как эта установка оборудована дополнительным измерительным оборудованием позволяющим регистрировать температуру в зоне облучения и производить нагрев образцов по задаваемому графику.

За прошедшие десятилетия на этом ускорителе было разработано много радиационных технологий, начиная от технологии облучения проводов и кабелей, радиационно-термического синтеза [6-8] и до стерилизации медицинских изделий, синтеза лекарственных средств и

подготовки имплантатов [9]. Также регулярно проводятся исследования радиационной стойкости конструкционных материалов [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Десятки промышленных ускорителей электронов серии ИЛУ работают в промышленности России, Китая, Казахстана, Индии, Польши и других стран на протяжении десятилетий. В России в последние годы новые ускорители серии ИЛУ поставлялись для облучения проводов и кабелей (ИЛУ-8) и обработки медицинских изделий (ИЛУ-10 и ИЛУ-14).

В 2013 году начал работать облучательный центр с ускорителем ИЛУ-10 в Парке ядерных технологий, г. Курчатов, Казахстан. Основная загрузка этого центра – медицинские изделия, планируется обработка пищевых продуктов.

По состоянию на 2017 год работающие в Новосибирске ускорители ИЛУ-10 полностью обеспечивают потребности Новосибирской области и соседних областей Сибирского федерального округа в стерилизации одноразовых медицинских изделий.

Для возникающего в России рынка услуг по радиационной обработке пищевых продуктов ускорители типа ИЛУ являются оптимальным источником ионизирующего излучения, поскольку могут производить обработку электронным пучком и тормозным излучением на одном и том же оборудовании. Современные ускорители электронов предпочтительнее изотопных источников из-за достаточной надежности, высокой экономической эффективности и отсутствия потенциальной экологической угрозы вследствие наличия радиоактивных изотопов.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Widerøe, R. (17 December 1928). "Ueber Ein Neues Prinzip Zur Herstellung Hoher Spannungen". Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik. 21 (4): 387.
2. 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>
3. Ауслендер, В.Л., Безуглов, В.В., Брызгин, А.А., и др. Импульсный высокочастотный линейный ускоритель электронов ИЛУ-8. Приборы и техника эксперимента, 2009, № 3, с.98-103.
4. Ауслендер, В.Л., Брызгин, А.А., Коробейников, М.В., и др. Радиационно-технологическая установка на основе ускорителя электронов ИЛУ-10 для стерилизации медицинских изделий и синтеза новых лекарственных средств. Сборник докладов Одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005, стр. 82-85.
5. Брызгин, А.А., Безуглов, В.В., Кокин, Е.Н., и др. Промышленный линейный ускоритель электронов модульного типа ИЛУ-14. Приборы и техника эксперимента, 2011, № 3, с. 5–21.
6. 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.
7. 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. Смoryго, 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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>.