

Развитие ускорительного комплекса ГНЦ РФ-ФЭИ

Романов В.А. ,Бажал С.В. ,Глотов А.И. ,Резвых К.А.

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ГНЦ РФ-ФЭИ

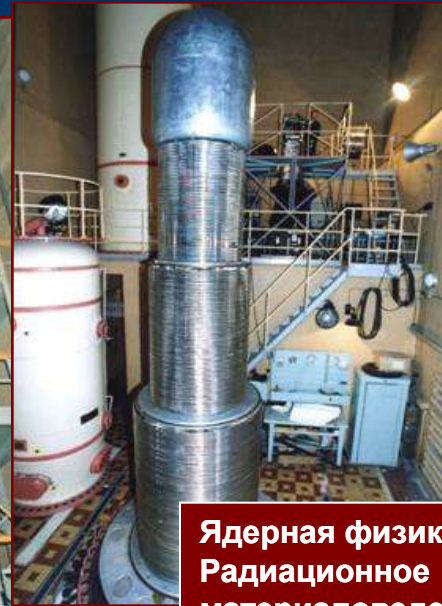
КГ-2,5



ЭГП-15



ЭГ-1



Ядерная физика
Радиационное материаловедение
Физика лазерных сред
Физика твердого тела
Трековые мембраны
Ядерный микроанализ

ЭГ-2,5



КГ-0,3

Диапазон энергий (p^+): 0,1 - 13 МэВ
Интенсивность пучков : 0,01 - 2000 мкА
Массы ускоряемых ионов: 1 - 100 а.е.м.

Факторы, определяющие интерес к электростатическим ускорителям как инструменту прикладных исследований и пучковых технологий:

высокая энергетическая однородность ускоряемого пучка ионов (до 0,01%);
широкий спектр ускоряемых ионов (практически все элементы таблицы Менделеева);
небольшая расходимость ускоренных ионных пучков;
большой диапазон регулируемой интенсивности ускоренных ионных пучков - от нескольких десятков наноампер до сотен микроампер;
возможность получения импульсных ионных пучков длительностью от наносекунд до миллисекунд;
возможность ускорения ионов радиоактивных элементов;
долговременная стабильность интенсивности ионных пучков;
широкий энергетический диапазон ускоренных ионов (от нескольких десятков кэВ до нескольких десятков МэВ);
плавная регулировка энергии и интенсивности пучков во всем рабочем диапазоне с шагом около 1кэВ;
возможность получения ионных пучков микронных размеров с высокой яркостью пучка;
низкая энергоёмкость;
низкая стоимость изготовления;
простота обслуживания.

Электростатические ускорители ЭГ-1 и ЭГ-2,5



ЭГ-1:

Ускоряемые ионы: **p, d**
Диапазон энергий: 0,9 – 4,5 МэВ

Непрерывный режим

Интенсивность пучков: 1 – 20 мкА

Импульсный режим

Амплитуда: 2...3 мА
Длительность импульсов: 1.. 2 нс
астота следования импульсов: 0,1...5 МГц



ЭГ-2,5

Ускоряемые ионы: **p, d, He, N, O, Ar**
Диапазон энергий: 0,9 – 4,5 МэВ
Интенсивность пучков: 0,01 – 30 мкА

Ядерная физика
Спектрометрия быстрых нейтронов
Физика пылевой плазмы
Ядерный микроанализ

Перезарядный ускоритель ЭПП-15

- Напряжение на кондукторе: 2 – 6 МВ
- Ускоряемые ионы: p, d, F, C, O, Al, Si, Cl, Ni, Fe, Zr



Инжектор

Непрерывный режим
Интенсивность пучков: 0,01 – 5 мкА

Импульсный режим
Амплитуда: 0,4 мА
Длительность импульсов: 1.. 2 нс
Частота следования импульсов: 1...5 МГц

Физика твердого тела
Ядерная физика
Спектрометрия быстрых нейтронов
Физика пылевой плазмы
Радиационное материаловедение
Трековые мембраны



Ионопровод с камерой облучения

Каскадный ускоритель КГ-2,5

Ускоряемые ионы: **p, d**

Диапазон энергий: 0,3 – 2,2 МэВ

Интенсивность пучков: 0,1 – 2,0 мА



Инжектор



**Терапевтическое
оборудование**

Ядерная физика
Физика лазерных сред
Исследования запаздывающих
нейтронов
Нейтронная терапия

Основные направления разработок, выполненных в отделе ускорителей.

- Ускоряющие трубки
- Ионные источники
- Зарядные системы
- Высоковольтные структуры
- Разработка режимов работы ускорителей и оборудования для исследования радиационной стойкости реакторных материалов

Ускоряющие трубки для электростатических ускорителей

В процессе многолетних исследований, разработок и эксплуатации ускоряющих трубок был выполнен большой комплекс работ, включающий в себя:

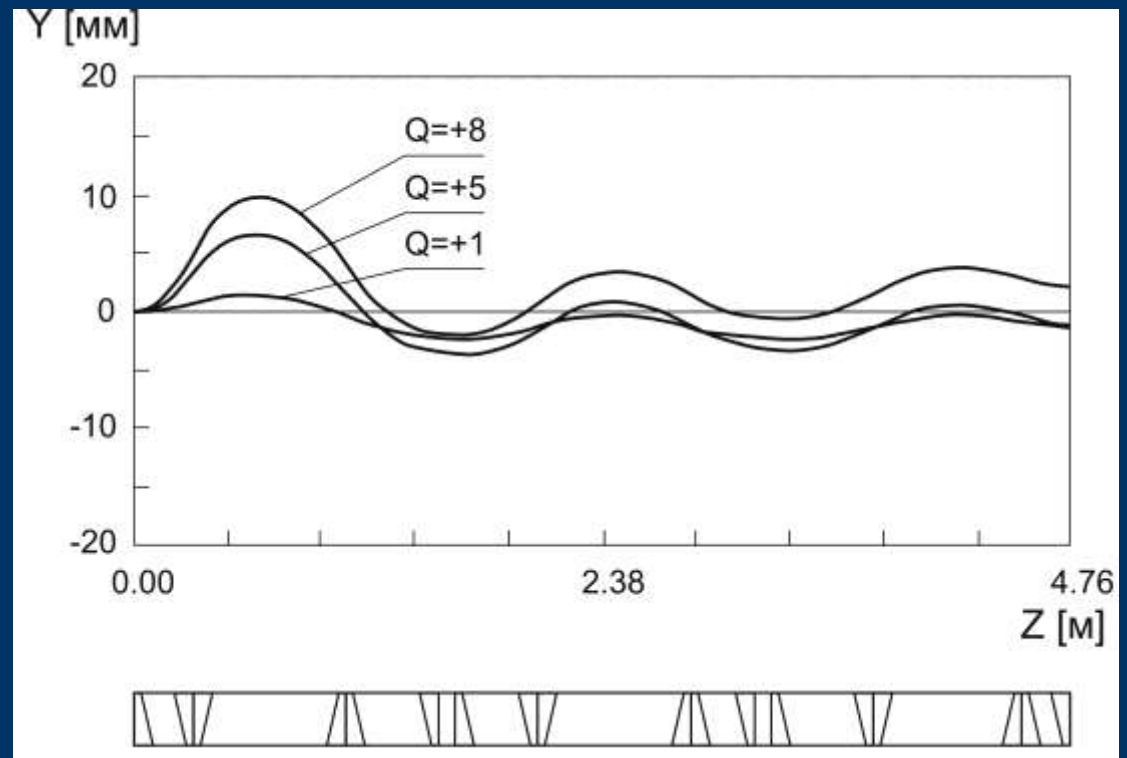
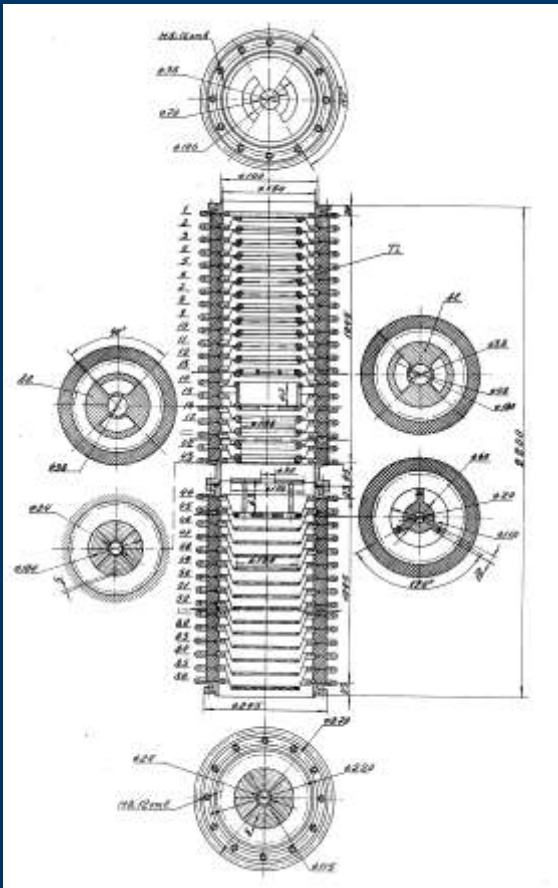
- выявление особенностей разрядных процессов, определяющих уровень электрической прочности отдельных ускоряющих промежутков и ускоряющих трубок в целом;
- развитие методов высоковольтных испытаний ускоряющих промежутков;
- разработку технологии склейки ускоряющих трубок;
- выработку критериев электрической прочности, которые необходимо учитывать при изготовлении ускоряющих трубок, рассчитанных на рабочие градиенты свыше 1,2 МВ/м;
- исследование промежутков ускоряющих трубок в зависимости от величины площади и формы электродов, а также материала изоляционных колец и их формы, обращенной в вакуум;
- развитие расчетных методов ионной оптики применительно к ускоряющим трубкам с прямыми и наклонными полями;
- расчетные исследования динамики тяжелых многозарядных ионов в высокоэнегетичных секциях ускоряющих трубок с наклонными полями;
- разработку нескольких вариантов конструкций ускоряющих трубок с прямыми и наклонными полями и проведение их полномасштабных исследований.

Разработанные и изготовленные в отделе ускоряющие трубки до настоящего времени успешно работают на ускорителях в ФЭИ, ряде институтов в России и в некоторых других странах.

Ускоряющие трубки для электростатических ускорителей (продолжение)

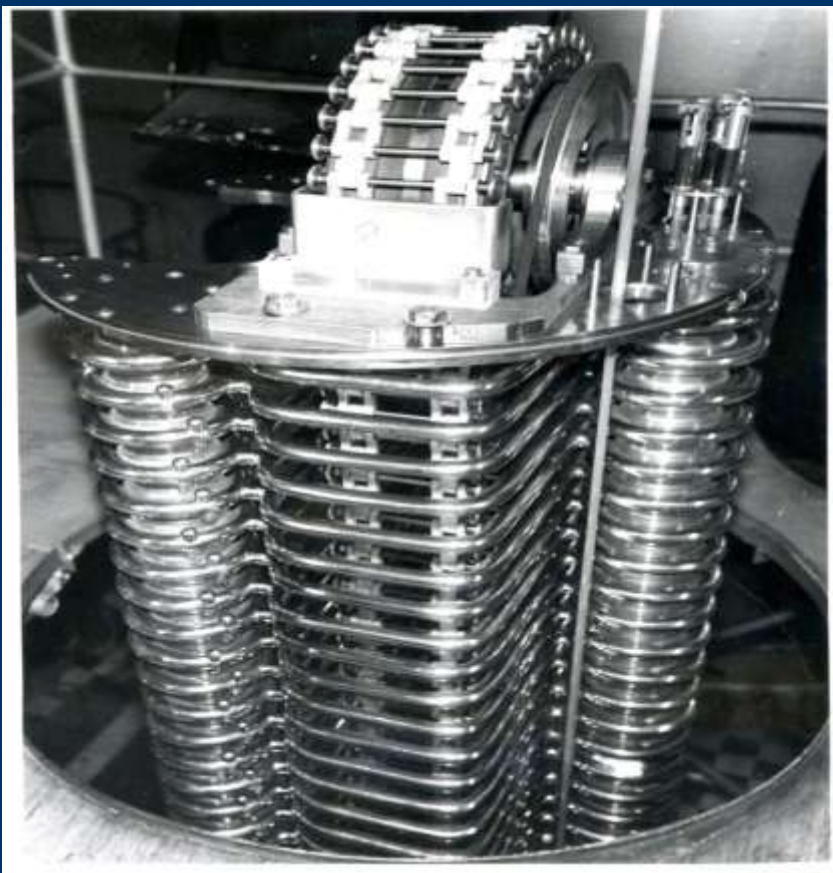
Ускоряющая трубка электростатического ускорителя ЭГ-2,5

Ускорение многозарядных ионов в высокоэнергетичной секции ускоряющей трубки перезарядного ускорителя ЭГП-15

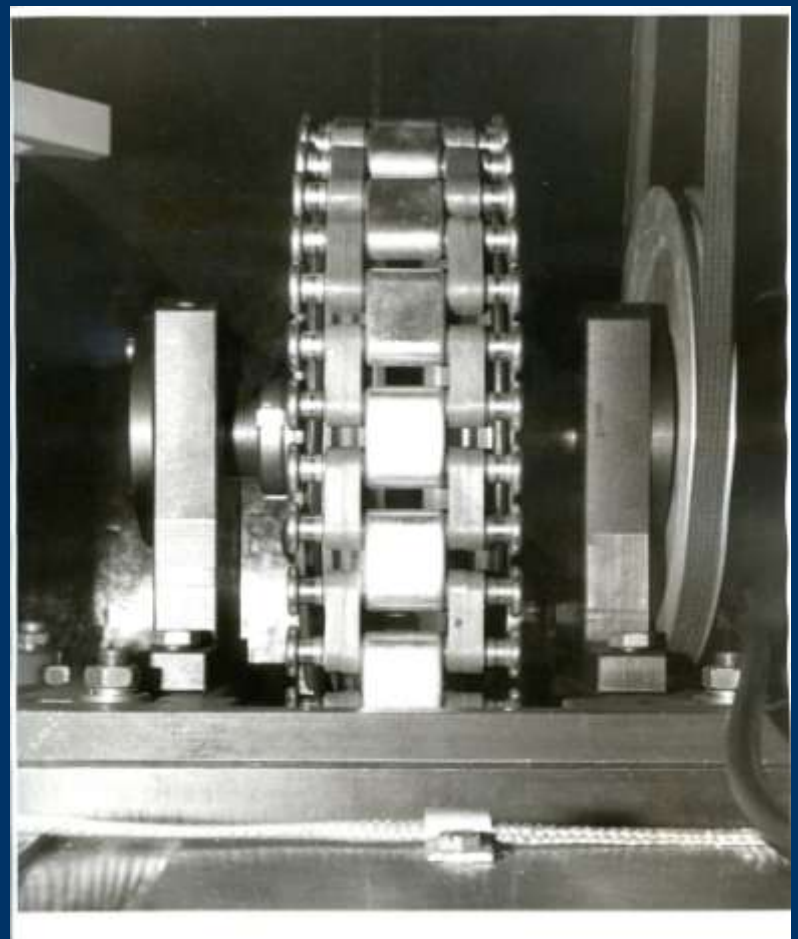


Зарядные системы ускорителей

- Зарядная система ИЗУ на ускорителе ЭГ-2,5, ток короткого замыкания 100мкА



- Зарядная система типа ИЗУ для ускорителя ЭП-15, рассчитанная на ток короткого замыкания около 300 мкА.

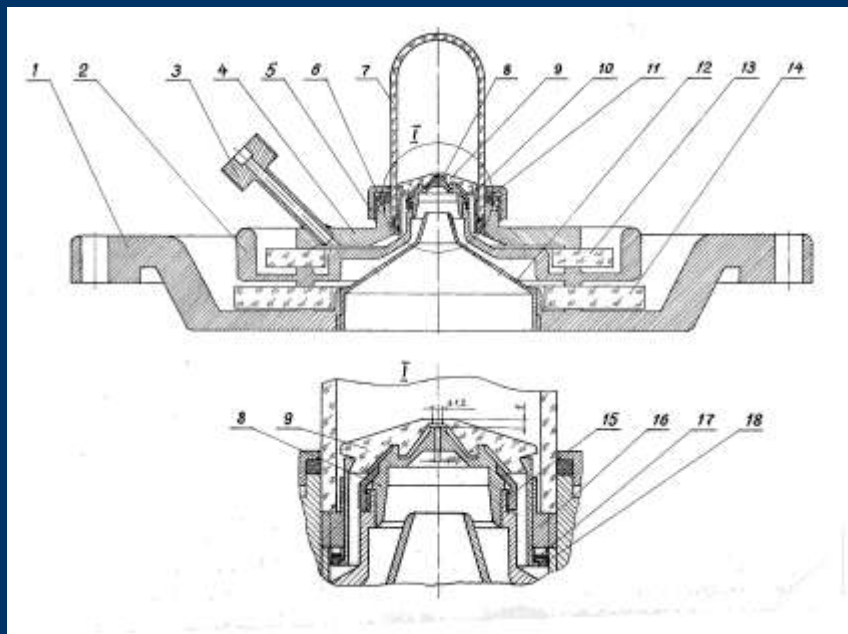


Ленточный транспортёр зарядов

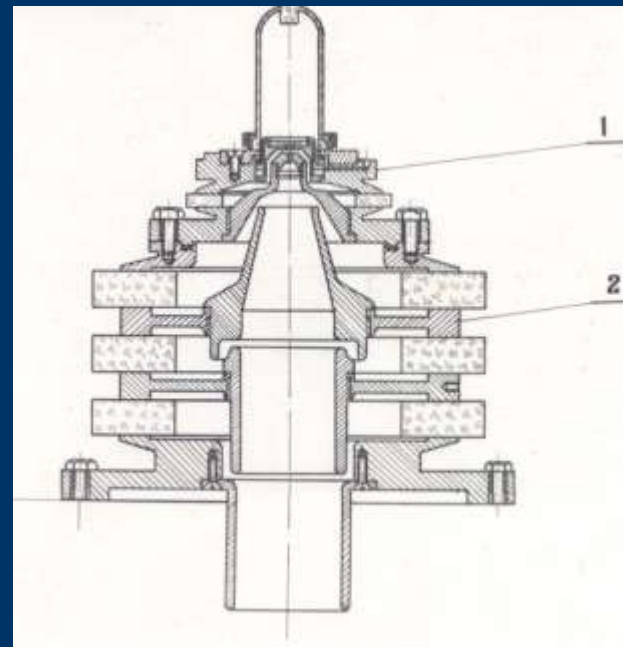
- Совместно с сотрудниками предприятия ОАО «Ярославрезинатехника» разработан новый транспортёр зарядов типа (КБН-1591-РД) на основе комбинированной полиэфирной хлопковой ткани с использованием каучука бутадиен-нитрильного (КБН).
- Разработанный ленточный транспортёр зарядов обладает высокими электрическими механическими свойствами и высокой износоустойчивостью.
- Налажено изготовление 2,4-х слойных лент толщиной от 1,2 до 3 мм. и шириной до 800 мм.
Разработанный ленточный транспортёр защищен патентом в 2014 году.
- К настоящему времени изготовлено более десяти зарядных лент для различных ускорителей, которые находятся в работе. Срок службы некоторых лент составляет к настоящему времени более 10000 часов. Срок службы ленточного транспортёра зарядов №263 составлял около 1000 часов

Источники ионов

Высокочастотный источник с интенсивностью пучков ионов до 200 мкА, время непрерывной работы 1000 ч. Этим источником оснащены большинство электростатических ускорителей России и стран СНГ.



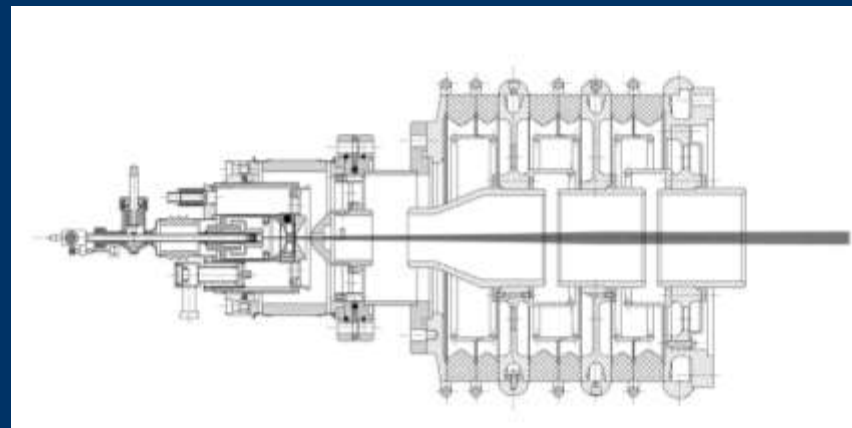
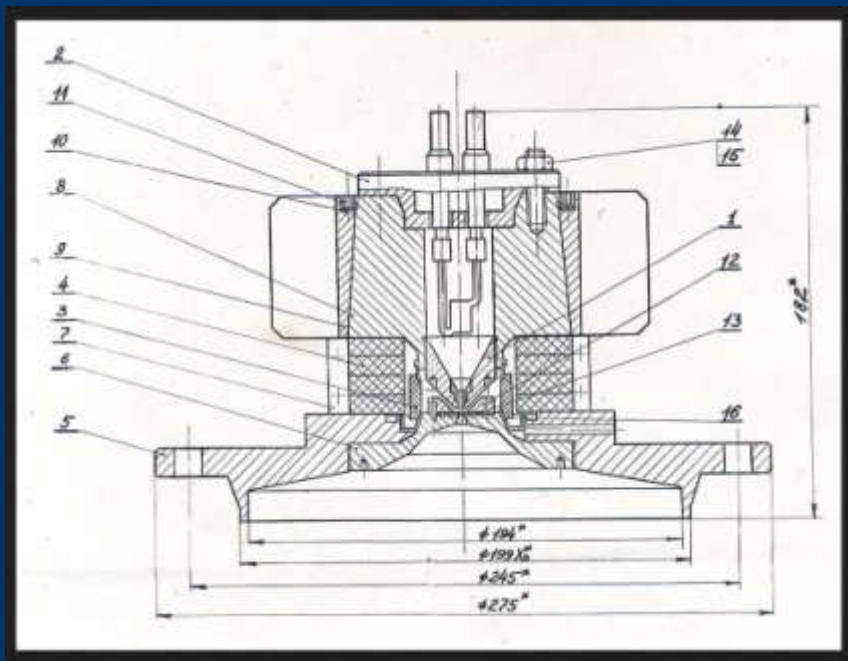
Высокочастотный источник ионов с интенсивностью пучков ионов до 3 мА, время непрерывной работы 500 ч. Этот источник работает на сильноточном каскадном ускорителе КГ-2,5 и ускорителе ЭГ-1.



Источники отрицательных ионов

Дуоплазматрон с ферритовыми магнитами для получения пучков отрицательных ионов с интенсивностями до 100 мкА и положительных ионов с интенсивностями до 5 мА изотопов водорода

Источник тяжелых отрицательных ионов с ионно-оптической линзой, выполненной с большим запасом по электрической прочности с целью обеспечения стабильности извлекаемого ионного пучка из источника.



Высоковольтные структуры

В отделе разработан пакет прикладных программ по оптимизации высоковольтных структур ускорителей. Проведена модернизация высоковольтной структуры ускорителя ЭГ-2,5 и расчетное обоснование высоковольтной структуры ускорителя ЭПП-15. В результате реализации технического решения “Дважды ориентированный овал” рабочее напряжение на ускорителе ЭГ-2,5 было получено на 24% выше номинальной величины.

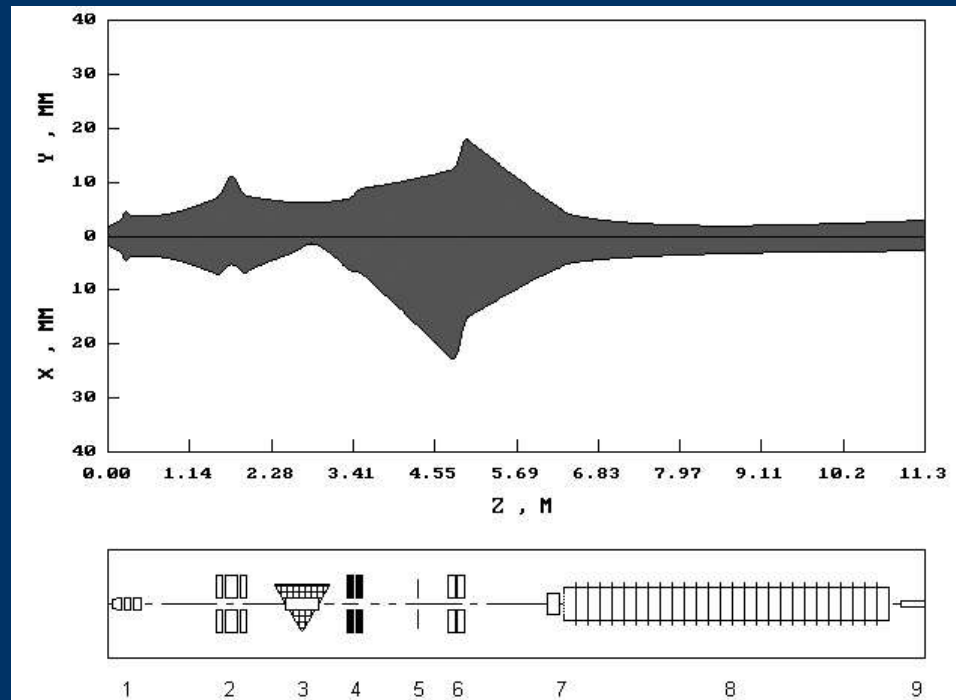
Модернизированная высоковольтная колонна ускорителя ЭГ-2,5



Ионная оптика на электростатических ускорителях

В рамках проводимых работ были развиты аналитические и численные методы расчета ускоряющих трубок с прямыми и наклонными полями и ионной – оптических систем электростатических ускорителей

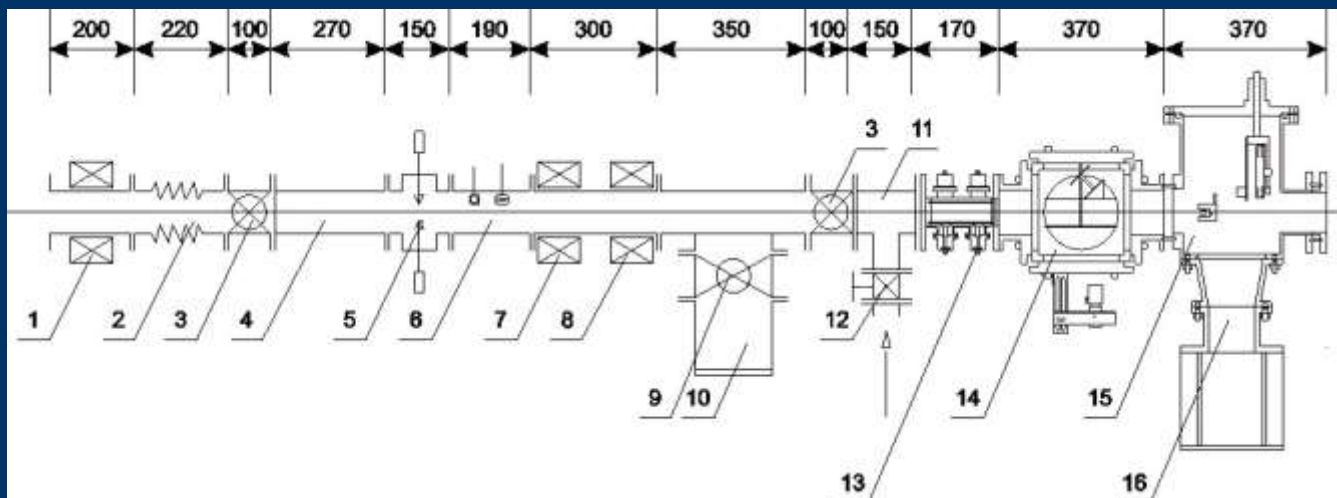
Расчетная огибающая пучка ионов Ni в инжекторе и низкоэнергетичной секции ускоряющей трубки ЭПП-15.



Модернизация ионной оптики инжектора, выполненная на основе этих расчетов, позволила в 3 раза увеличить интенсивность инжектируемого пучка ионов никеля

Разработка режимов работы ускорителей и
оборудования для проведения исследований
радиационной стойкости реакторных материалов

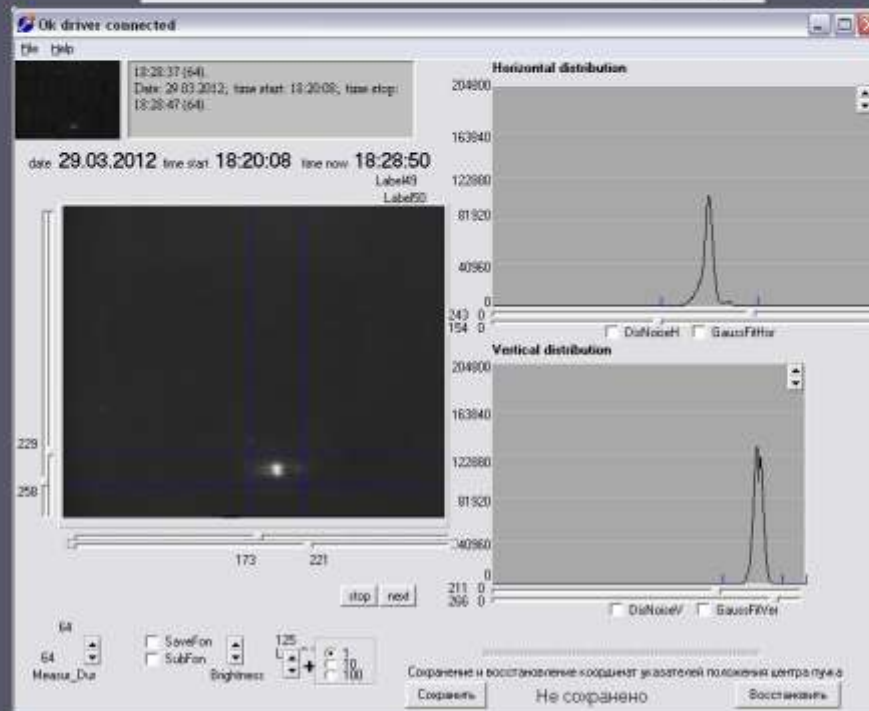
Структура ионпровода ускорителя ЭГП-15 для проведения
экспериментов по радиационному материаловедению



Экспрессные имитационные исследования радиационной стойкости образцов реакторных материалов

- Освоены режимы облучения образцов двухзарядными ионами никеля с энергией 7 МэВ;
- при интенсивности ионного пучка в диапазоне от 0.1 до 0.5 мкА;
- с диаметром ионных пучков, регулируемым в пределах 3 – 10 мм;
- и пучками диаметром 3 – 5 мм в режиме сканирования по всей; поверхности образцов для обеспечения равномерности облучения всего исследуемого образца.
- В процессе облучения контролируется распределение ионного пучка на облучаемом образце с помощью не пересекающего пучок электронно–оптического преобразователя, установленного перед камерой облучения. Контролируются также интенсивность пучка, вакуум в камере облучения и температура образца, которая регулируется отдельным нагревателем.

Контроль условий облучения образцов



Ионопровод ускорителя ЭГП-15 для исследования радиационной стойкости образцов



Прикладные работы: развитие мембранных технологий

В составе высоковольтного ускорителя ЭГП-15 создан технологический опытно-промышленный участок по облучению тонких (8 - 12 мкм) полимерных пленок и мишеней большой площади ленточными пучками ускоренных тяжелых ионов.

Ионопровод ускорителя ЭГП-15 с камерой для облучения пленок



Развитие ускорительного комплекса

- Развитие ускорительного комплекса производится путем создания и освоения новых методик экспериментальных исследований, дополнительных экспериментальных рабочих мест и ионопроводов, оснащения ионопроводов современными устройствами диагностики пучков, повышением стабильности параметров и качества пучков ускоренных ионов на действующих ускорителях.
Недавние три разработки защищены патентами в 2013 и 2014 г.г.
- В настоящее время ведется работа по созданию новой платформы для проведения экспериментальных исследований на пучках ускоренных ионов путем приобретения современного, хорошо оснащенного перезарядного ускорителя фирмы HVEE. Размещение ускорителя и вывод пучков ускоренных ионов в мишенную камеру действующего сильноточного каскадного ускорителя КГ-2,5 позволит проводить экспериментальные исследования при одновременном облучении мишеней двумя пучками легких и тяжелых ионов, что открывает новые возможности для исследований

Перезарядный ускоритель 3MV Tandetron 4130 MC +(НС)



Параметры ускорителя и пучков ускоренных ионов

Потенциал кондуктора – 0,2 -3,3 МВ

Стабильность потенциала +_ 300 В

Вакуум в ускорителе – 4×10^{-7} торр (безмасляный!)

Допустимый ток нагрузки каскадного выпрямителя – 1,3 мА

Импульсные пучки изотопов водорода:

0,5 - 4 МэВ, 2 нс, 125 кГц - 4 МГц

Средний ток пучка: - 4,8 мкА (4 МГц)

Интенсивности непрерывных пучков ускоренных ионов:

$^1\text{H}^+$ - 20 (50) мкА, $^2\text{D}^+$ - 15 (30) мкА, $^4\text{He}^{2+}$ - 4 мкА, $^7\text{Li}^{2+}$ - 2 мкА,
 $^{11}\text{B}^{3+}$ - 12 мкА, $^{12}\text{C}^{3+}$ - 40 мкА,

$^{16}\text{O}^{3+}$ - 40 мкА, $^{19}\text{F}^{3+}$ - 20 мкА, $^{28}\text{Si}^{3+}$ - 48 мкА, $^{31}\text{P}^{3+}$ -20 мкА,
 $^{58}\text{Ni}^{3+}$ -20 мкА, $^{58}\text{F}^{3+}$ 2мкА.

$^{63}\text{Cu}^{2+}$ 8мкА, $^{75}\text{As}^{2+}$ -5 мкА, $^{197}\text{Au}^{2+}$ 20 мкА.

Проведение в ФЭИ международных конференций по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям

- Начиная с 1972 года по настоящее время в ФЭИ с периодичностью в два года проводятся международные конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям с изданием Трудов конференций. Накоплен, таким образом, огромный материал по физике электростатических ускорителей и по их применению в различных областях науки и техники. Очередную XX Международную конференцию по ЭСУ и пучковым технологиям планируем провести в 2015 году.
- Проведение Международных конференций позволило вовлечь большее количество специалистов в обсуждение проблем по ускорительной тематике и способствовало установлению более тесных научно-технических связей между коллективами, эксплуатирующими электростатические ускорители.

