

**Планы по сооружению  
инжекторного стенда и открытой  
ловушки следующего поколения в  
ИЯФ**

**А.А.Иванов**

**Научная сессия ИЯФ 2018**

# Участие ИЯФ в будущей национальной программе термоядерных исследований

---

- 1 Разработка атомарных инжекторов различного назначения мощностью до 7.5 МВт, энергией частиц до 500 кэВ и длительностью до 1 часа.
- 2 Создание комплекса для разработки инжекторов и вспомогательного оборудования для модулей источников с положительными (2 МВт, 120 кэВ) и отрицательными ионами (8 МВт, 500 кэВ)
- 3 Производство инжекторов с источниками положительных и отрицательных ионов. Выполнение экспортных поставок инжекторов.  
Строительство комплекса разработки новых технологий удержания термоядерной плазмы высокой плотности в линейных системах
- 4 Экспериментальная верификация эффективных методов удержания плазмы в существующих и перспективных линейных системах.

# Экспериментальная база для создания инжекторов нейтральных пучков нового поколения

---

Подведенная мощность - 20МВт  
Площадь экспериментальных помещений - 5000м<sup>2</sup>

## Состав:

Стенд инжекторов на положительных ионах:

Энергия/ ток	-120кэВ/150А
Вакуумная откачка	- 2 млн л/с
Размеры	- 20x40x18 м <sup>3</sup>

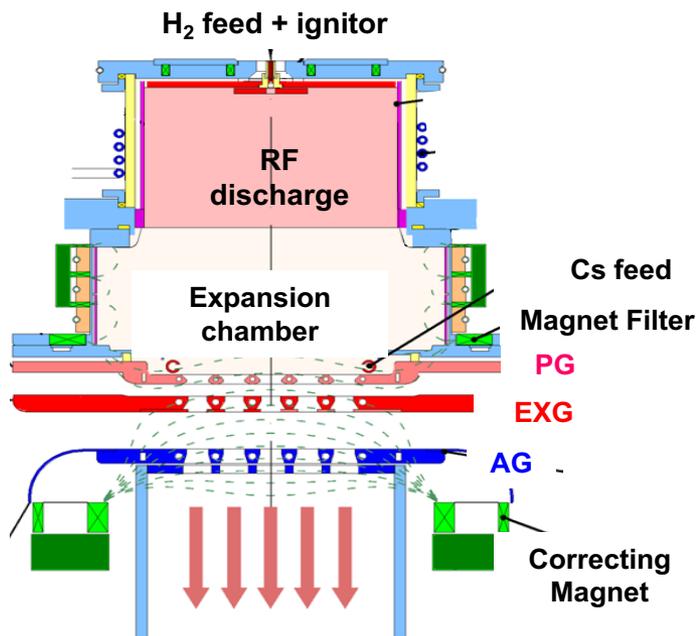
-----  
Стенд инжекторов на отрицательных ионах:

Энергия/ток	- 500кэВ/25А
Вакуумная откачка	- 1 млн л/с
Размеры	- 20x60x18 м <sup>3</sup>

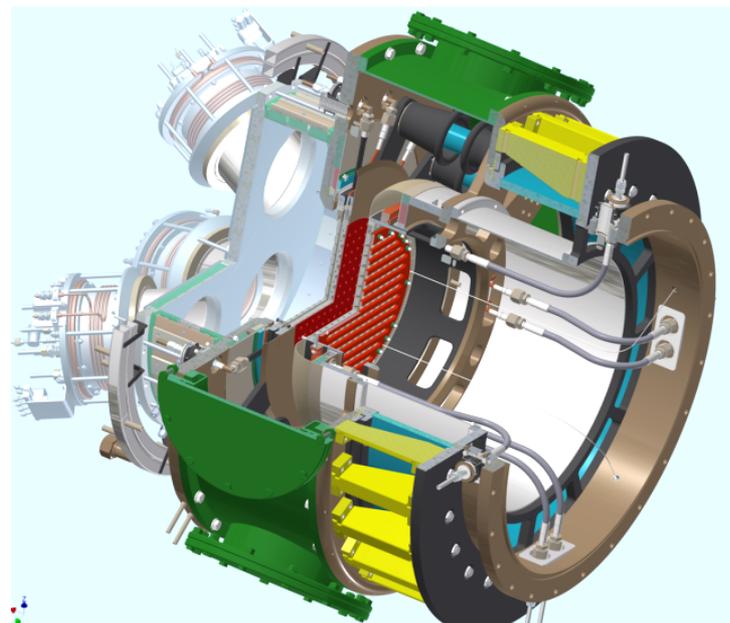
Вспомогательные стенды: конверсионные мишени, генераторы плазмы

# Прототипы источника отрицательных ионов

## Inductive RF sources with Surface-Plasma production of Negative Ions



Source prototype with 1 RF Driver. 21 beamlets



9 A Source with 4 RF Drivers. 145 beamlets

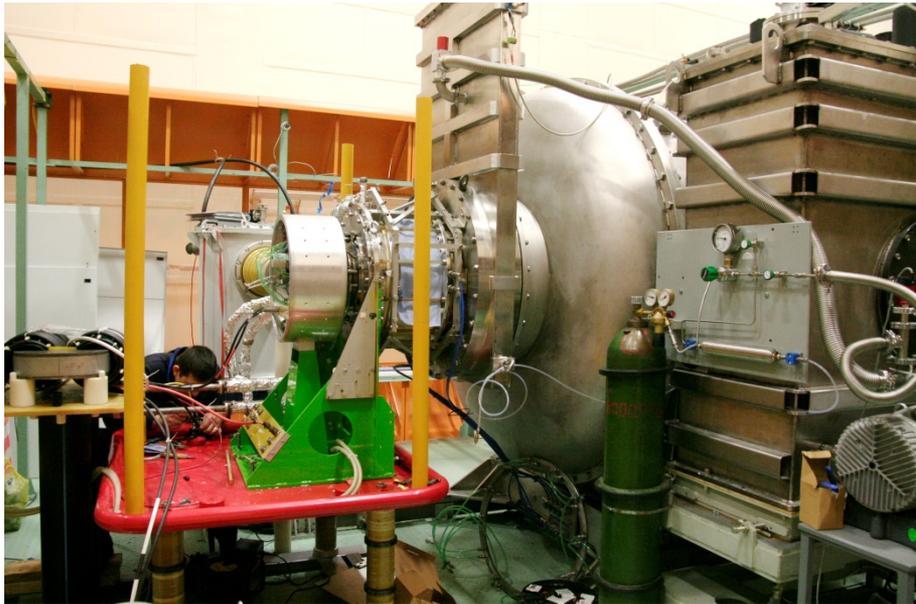
- Active temperature control of IOS grids (heating/cooling by hot fluid)
- Cesium seed to PG periphery
- Convex magnetic field in the IOS gaps

# Стенд прототипа инжектора на отрицательных ионах 2МВт, 1 МэВ



**Вид высоковольтной платформы и ускорительной трубки**

# Источник ионов и тракт низкой энергии

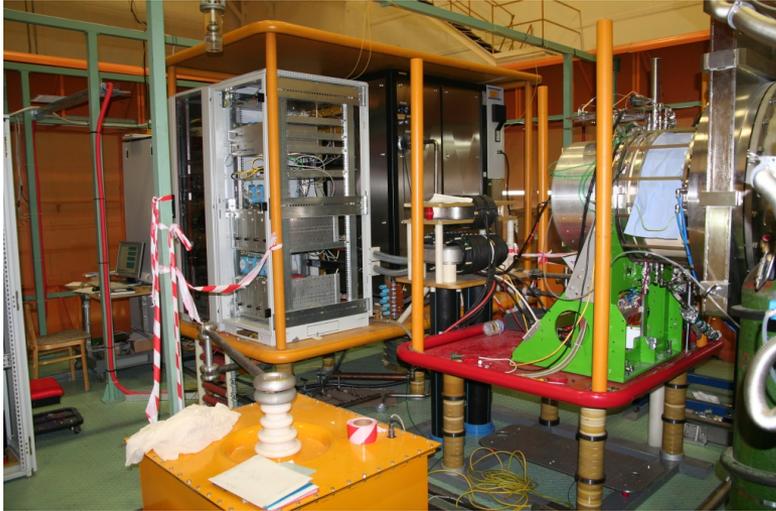


**Ионный источник**



**Питание в/ч генератора плазмы**

# Источники питания стенда



**Вспомогательные источники питания**



**Высоковольтное питание  
ионного источника**



**Высоковольтный вывод**



**Основной в/в источник питания 1МВ,2А**

# Испытательный стенд источников положительных ионов 40кВ/2МВт/100сек



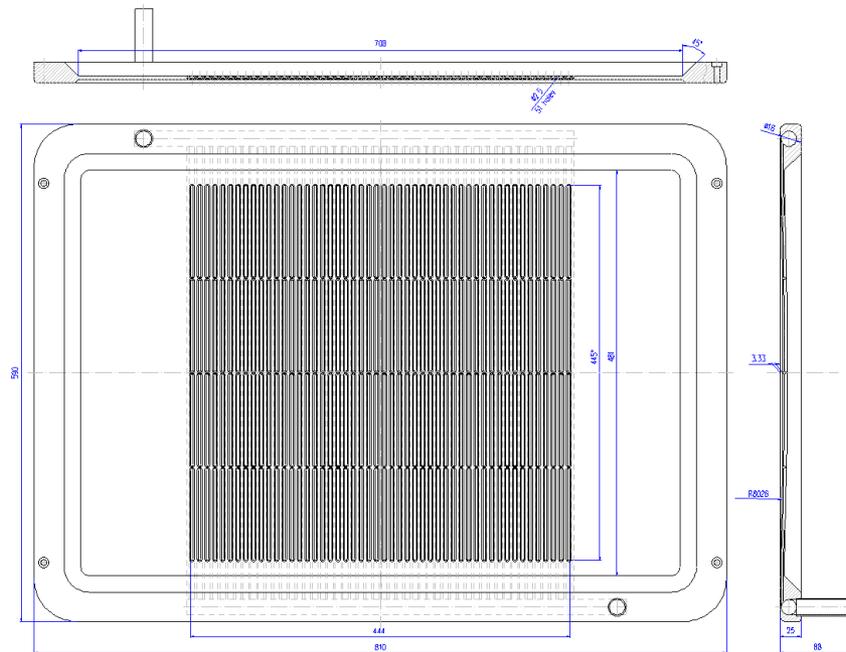
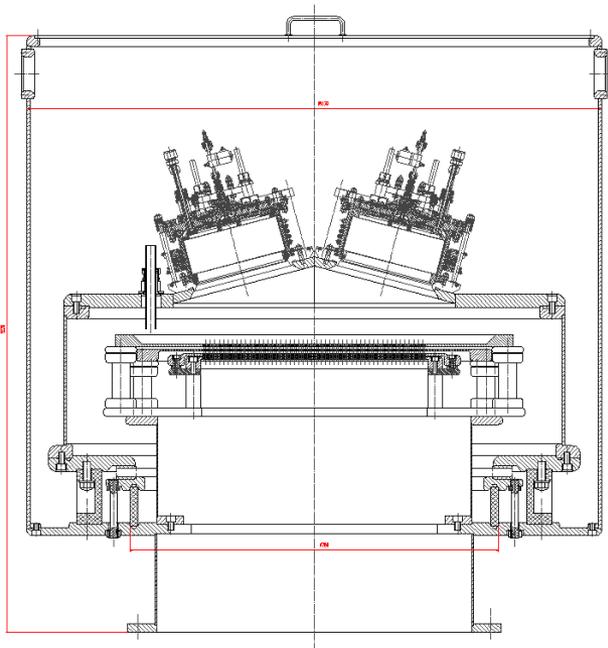
Вакуумный объем



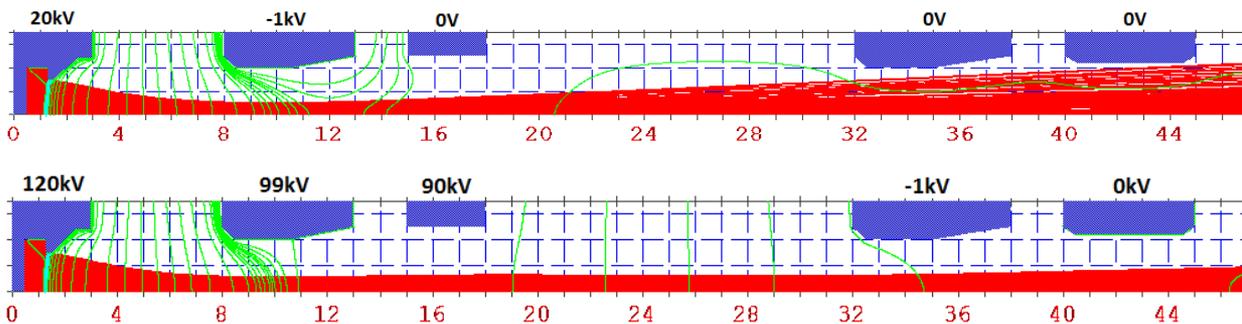
Высоковольтный модулятор

# Ионный источник 175А, 20-120кэВ, 3600сек

Применения: ГДМЛ и нейтронный источник на основе ГДЛ



Плазменная сетка ИОС



Пример элементарной ячейки ИОС с возможностью переключения энергии

# Проект ГДМЛ

## Инфраструктурный комплекс разработки новых технологий удержания термоядерной плазмы

- реализует перспективные наработки плазменных лабораторий ИЯФ, определяющие мировой уровень в области открытых ловушек;
- решает широкий спектр фундаментальных и прикладных задач;
- включён в проект термоядерной программы РФ. Подготовка кадров.

## Цель: разработка термоядерного реактора

- *Экологичный* за счёт использования перспективного топлива без трития;
- *экономически эффективный*, за счёт простоты и модульности конструкции на основе линейной ловушки.

## Задачи комплекса ГДМЛ

- Разработка и проверка новых методов и технологий удержания термоядерной плазмы в линейных ловушках, в том числе: режима газодинамического удержания при высоких температурах плазмы, диамагнитного удержания, винтовых пробок, и др.
- Достижение суб-термоядерных параметров в водородной плазме с эффективностью удержания  $Q > 0.1$  в импульсах более секунды;
- Работа в режиме прототипа технологического и материаловедческого источника термоядерных нейтронов;
- Исследование взаимодействия плазмы со стенкой в линейной ловушке

# Физико-технический базис проекта

---

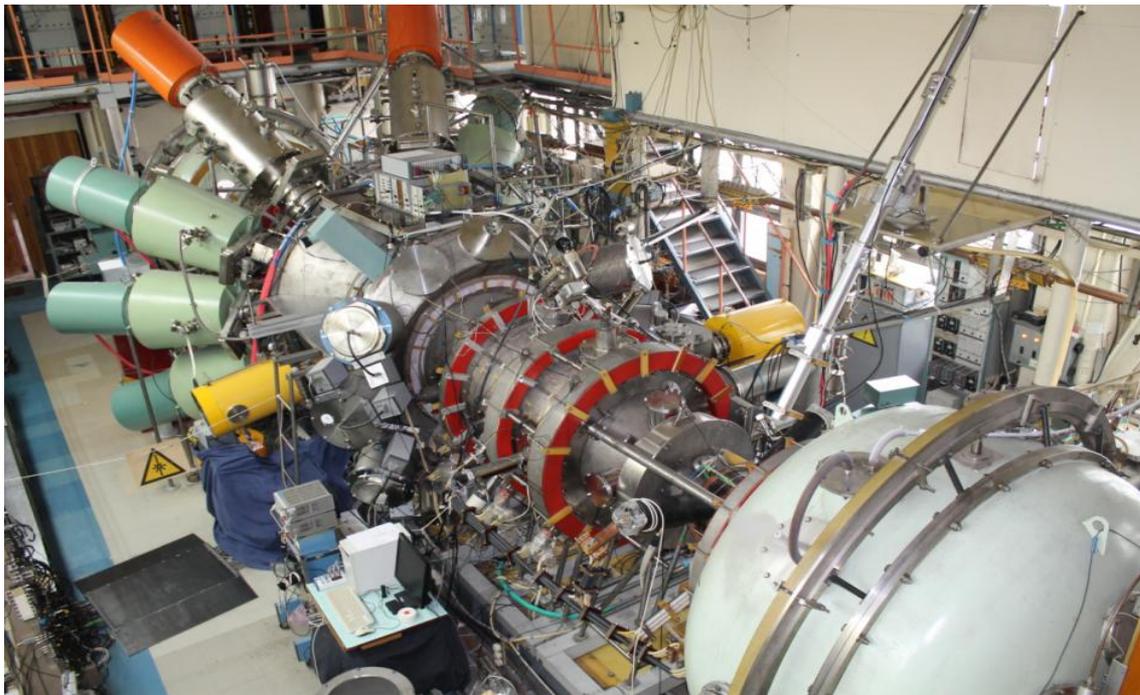
## Достижения ГДЛ

- Удержание плещущихся ионов с большим  $\beta$
- Подавление МГД неустойчивости средней кривизной силовых линий
- Подавление конвекции дифференциальным вращением плазмы
- Подавление электронных потерь расширителем
- Пинчевание быстрых ионов

## Достижения ГОЛ-3

- Технология электронных пучков
- Турбулентный нагрев электронов
- Демонстрация многопробочного удержания в широком диапазоне изменения плотности плазмы

# Задел по проекту ГДМЛ



ГДЛ



СМОЛА

- На газодинамической ловушке ГДЛ продемонстрировано устойчивое удержание плазмы высокого давления  $\beta \sim 0.6$ , достигнута температура 1кэВ, отработан старт с использованием гиротронов
- На установке ГОЛ-3 обнаружено эффективное (аномальное) многопробочное удержание в широком диапазоне плотностей плазмы;
- Заканчивается сооружение установки ГОЛ-NB для исследования удержания квазистационарной плазмы в многопробочной ловушке;
- Построена и введена в эксплуатацию установка СМОЛА для проверки новой технологии винтовых пробочных узлов для ГДМЛ.
- Изготавливается ловушка САТ для экспериментов с плазмой с  $\beta \sim 1$

# Установка ГДМЛ

## Модульная конструкция из крупных блоков

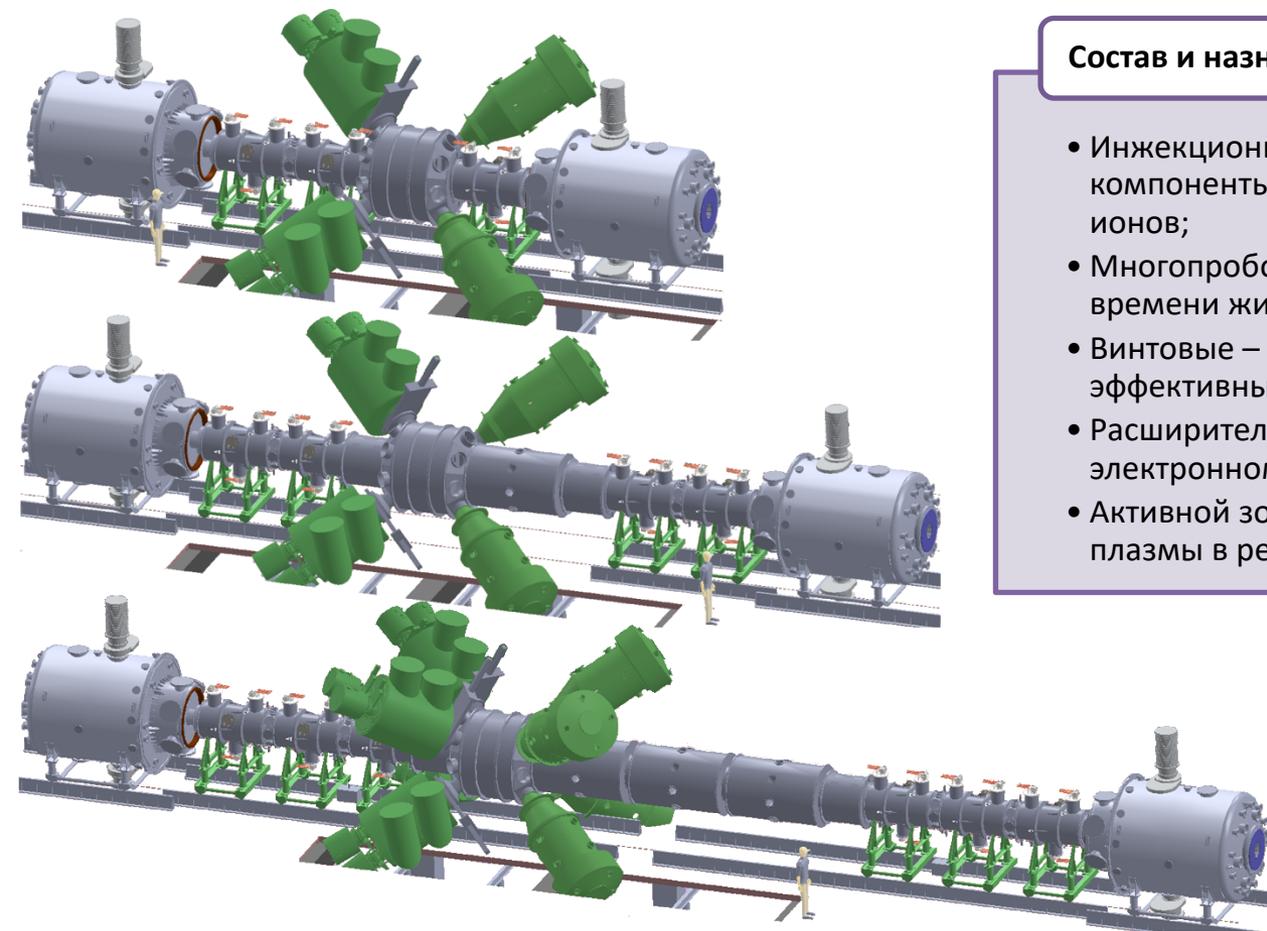
- придаёт гибкость и надёжность системе;
- позволяет решать задачи с разными составом и конфигурацией установки.

## Состав и назначение модулей

- Инжекционные – для нагрева ионной компоненты плазмы и создания плещущихся ионов;
- Многопробочные – для повышения продольного времени жизни частиц в плазме;
- Винтовые – новый, потенциально более эффективный вариант многопробочных;
- Расширители – для термоизоляции по электронному каналу;
- Активной зоны – для накопления горячей плазмы в режиме диамагнитного удержания.

## Параметры

- Длина – до 30 м;
- Сверхпроводящая магнитная система, на поле от 3 -13Тл;
- Мощность до 30МВт в импульсах 1с и более.



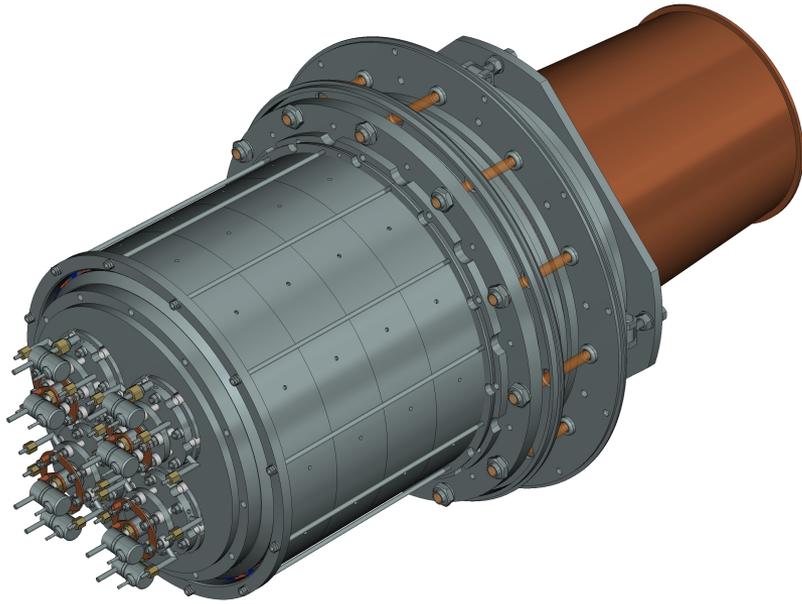
# Подготовка технического задания для проекта магнитной и вакуумной систем активной зоны

---

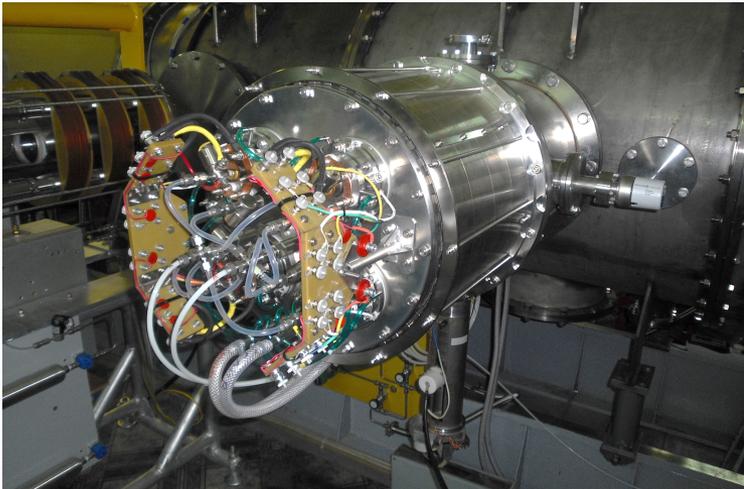
## Экспертные группы:

- Системы питания
- Магнитная система
- Вакуумная система
- Атомарная инжекция
- Диагностики
- Системы дополнительного нагрева:
  - ICRH;
  - ECRH
- Многопробочные системы:
  - Гофрированная, спиральная

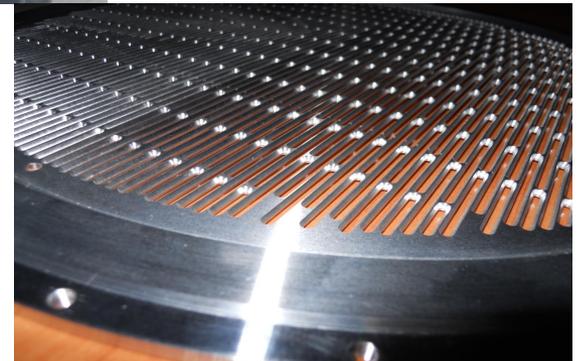
# Ионный источник 160А, 15кэВ для ГДМЛ



Сеточная система  
- триодная,  $\varnothing 340$ , F3.5м



Вид ионного  
источника

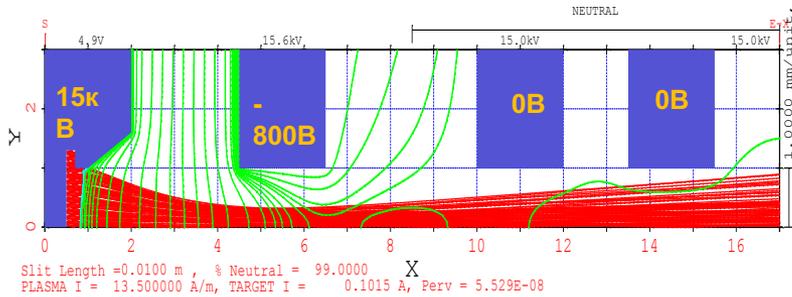


# Инжектор NB15-40

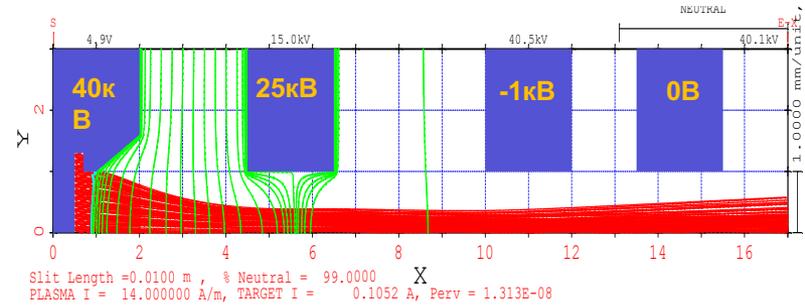
Параметры	Значение
Общее количество инжекторов (ГДМЛ)	4 (8)
Энергия частиц пучка	15 кэВ /40 кэВ
Мощность нейтрального пучка	- 1.7 МВт (15 кэВ) - 3.5 МВт (40 кэВ)
Фокусное расстояние ИОС	4м
Размер пучка в фокусе	5/14 см
Содержание частиц полной энергии	80%
Продолжительность импульса	30 мс

# Формирование пучка в тетродной ИОС - схема "ускорение-доускорение"

15 кэВ



40 кэВ



Расчетные угловые расходимости пучка в зависимости от плотности тока пучка до и после переключения энергии с 15 кэВ на 40 кэВ:

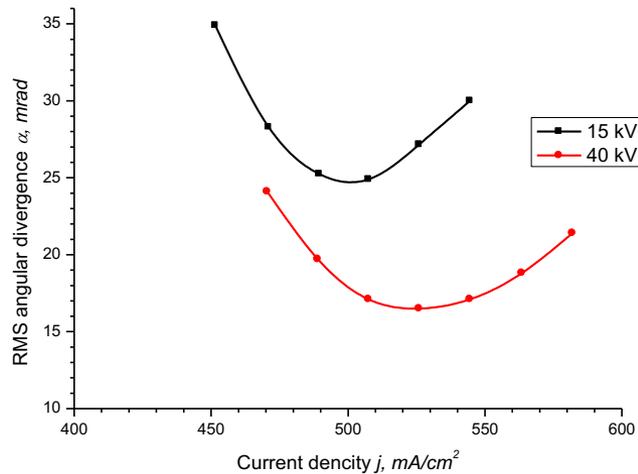
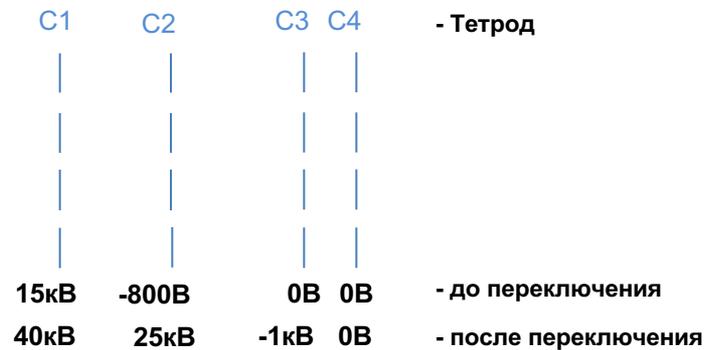
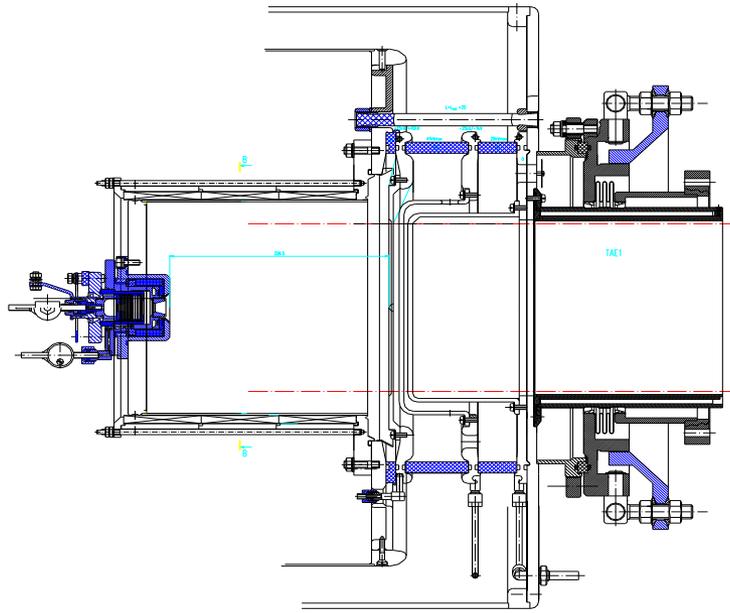


Схема включения:



# Прототип ионного источника



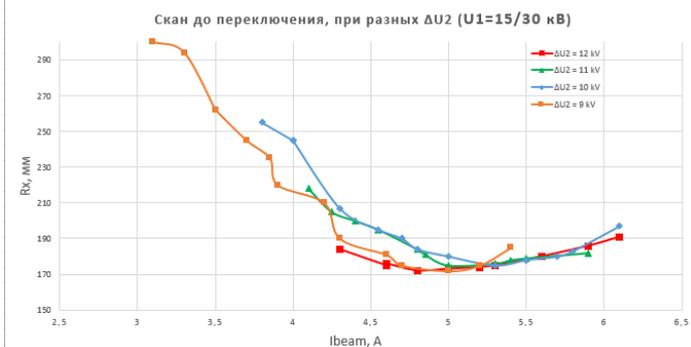
Один дуговой генератор  
Плазменная камера с магнитными стенками  
Сеточный узел с возможностью сборки в триодный и тетродный вариант  
Сетки апертурой 190 мм с щелевой геометрией



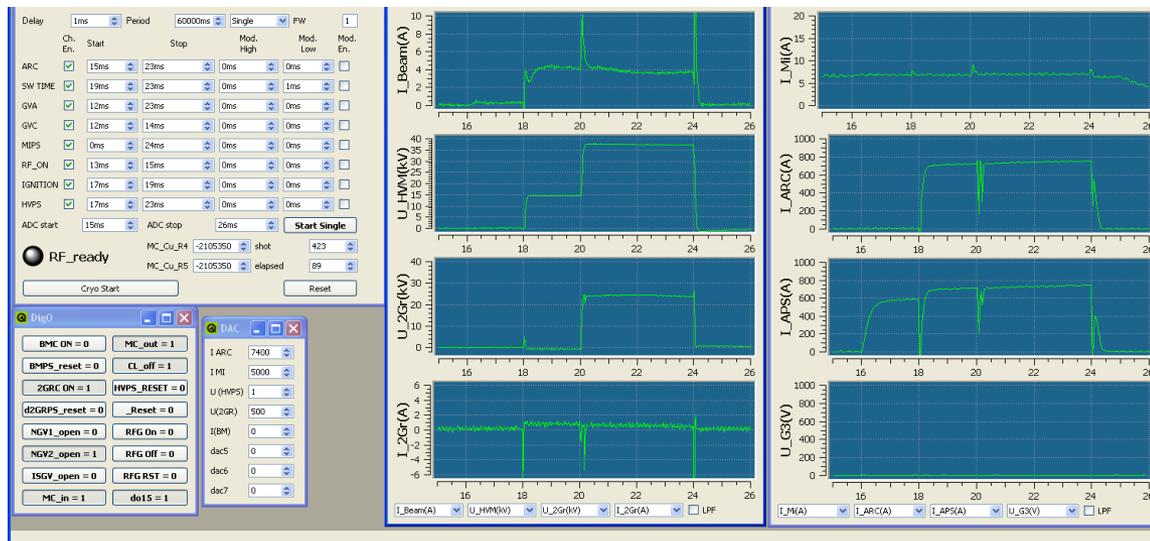
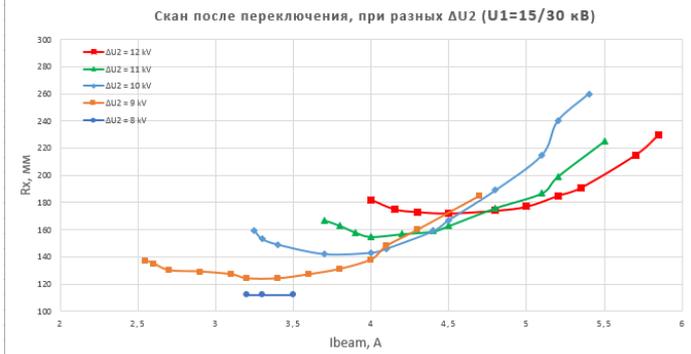
# Параметры пучка прототипа инжектора NB15-40

Зазор 2.45/2.5/1.6

До переключения: Оптимальный радиус 172мм, при токе пучка 4,8-5 А



После переключения: при уменьшении  $\Delta U_2$  пучок сужается



# Временное возможное решение – использование бесперебойных систем питания большой (до 32МВт) мощности разработки НГТУ

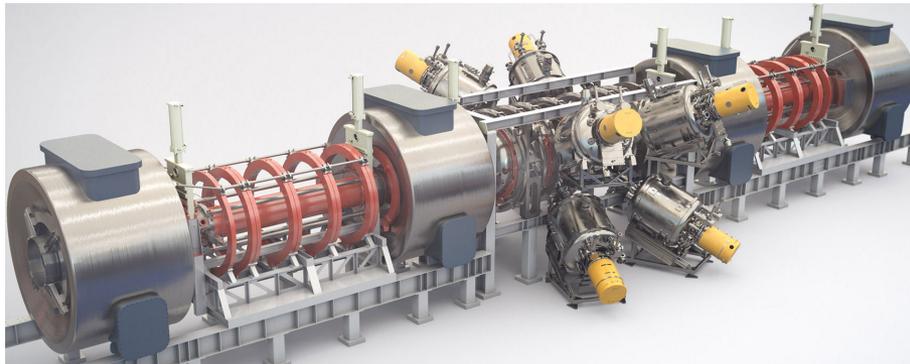


# Международное сотрудничество

## Tri Alpha Energy США

- Совместная разработка новых технологий атомарной инжекции;
- Контрактные поставки изготовленных в ИЯФ нагревных и диагностических инжекторов на ТАЕ;
- Совместные исследования плазмы и термоизоляции в расширителях;
- Обмен информацией и разработка технологий стабилизации плазмы;
- Диагностические системы.

Действующая установка C2-W “Norman” ТАЕ  
(2017г)

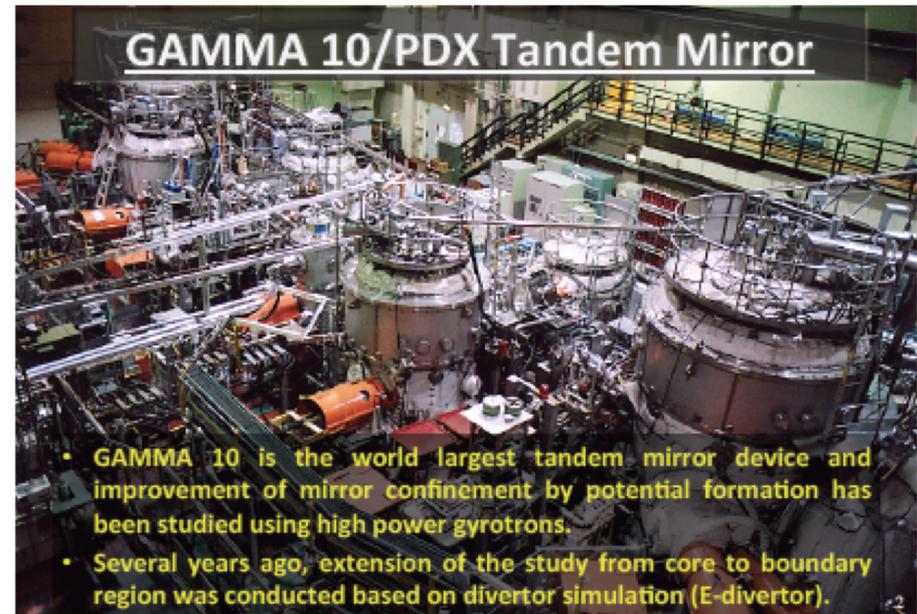


## Institute of nuclear energy technology safety, Hefei, China

- Совместная разработка инженерных систем ГДМЛ;
- Численная оптимизация параметров ГДМЛ и нейтронного источника
- Нейтронные расчеты;
- Проблемы безопасности;

## Plasma Research Center, University of Tsukuba

- Совместная разработка новых технологий атомарной инжекции;
- Контрактные поставки изготовленных в ИЯФ нагревных и диагностических инжекторов на ТАЕ;
- Совместные исследования плазмы и термоизоляции в расширителях;
- Обмен информацией и разработка технологий стабилизации плазмы;
- Диагностические системы.



- GAMMA 10 is the world largest tandem mirror device and improvement of mirror confinement by potential formation has been studied using high power gyrotrons.
- Several years ago, extension of the study from core to boundary region was conducted based on divertor simulation (E-divertor).

- ГДЛ в Ланджоу
- Возможно в Университете г.Висконсин, США;

**Спасибо за внимание!**