

Работы ИЯФ в рамках ФП «Разработка технологий УТС и инновационных плазменных технологий»:

*Ионный источник с активным охлаждением электродов*

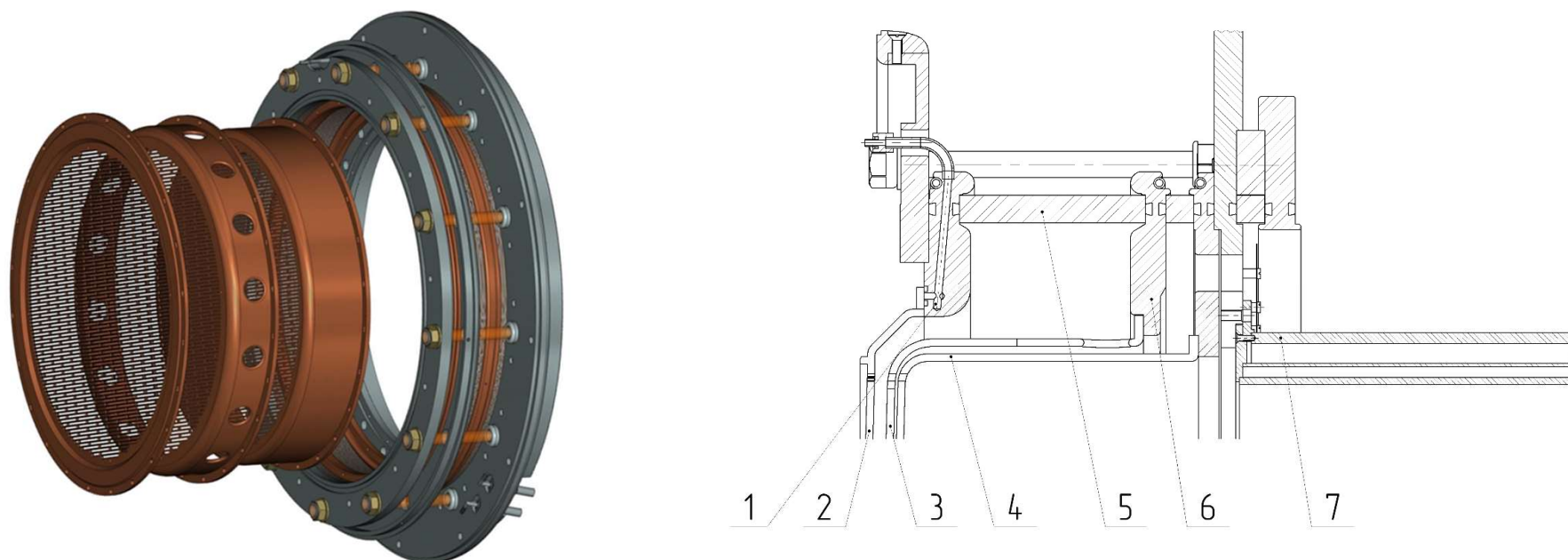
Сорокин А.В., Амиров В.Х., Бруль А.В., Давыденко В.И., Дейчули П.П.,  
Иванов А.А., Капитонов В.А., Ращенко В.В.

## Инжекторы с инерциальным охлаждением электродов

	Проект	год	Длительность, с	Энергия частиц, кэВ	Ток ионного пучка, А
1	RuDI-Textor	1999	10 (50%)	50	2
2	C-2 (TAE)	2008	1	40	40
3	C-2W (TAE)	2015	0.03	15	150
4	TCV	2015	2	30	50
5	ST-40	2020	2	55	33

При работе инжектора на электродах ионного источника выделяется тепловая энергия около 1% от мощности ионного пучка. Инерция нагрева обеспечивает прирост температуры до 150 градусов к концу импульса. Дальнейшее увеличение длительности или мощности импульса невозможно из-за тепловых деформаций электродов.

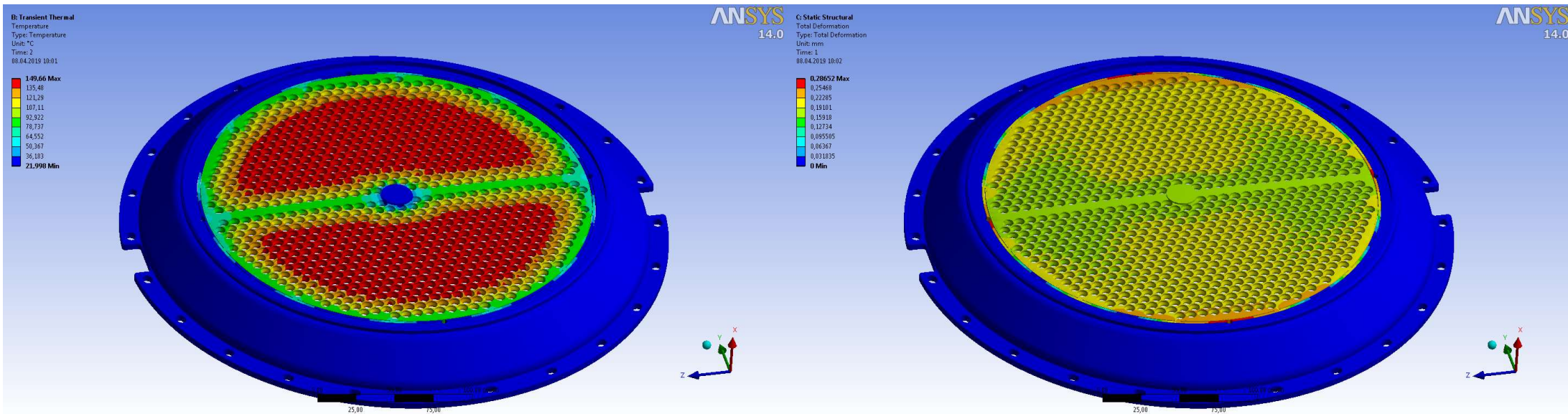
## Ионно-оптическая система с инерциальным охлаждением электродов



**Ионно-оптическая система инжектора: 1 – канал охлаждения, 2,3,4 – электроды, 5 – керамический изолятор, 6 – установочный фланец, 7 – патрубок нейтрализатора**

Конструкция ионно-оптической системы является развитием конструкции ИОС инжектора RuDI и не позволяет ввести активное охлаждение электродов одновременно с возможностью юстировки. Также требуется применение дорогостоящих проходных изоляторов большого размера

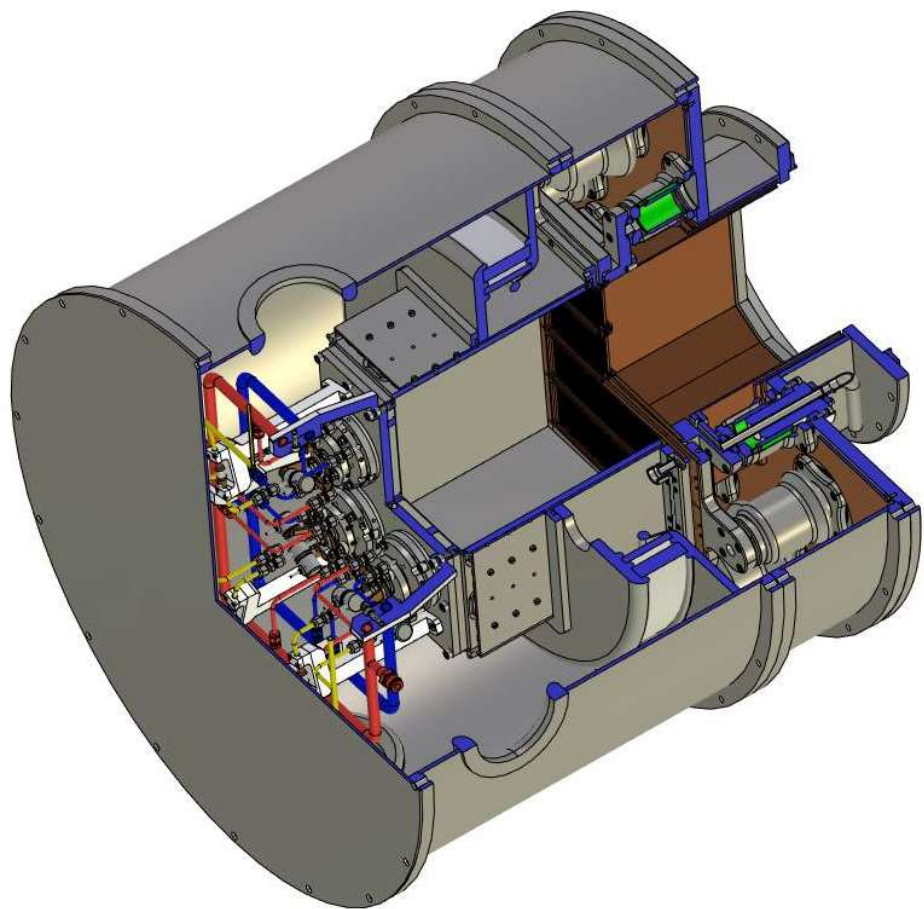
# Пример расчета термомеханических деформаций электродов ИОС



**Нагрев (слева) и деформация (справа) плазменного электрода инжектора ST-40 импульсом 17 кВт длительностью 2 с**

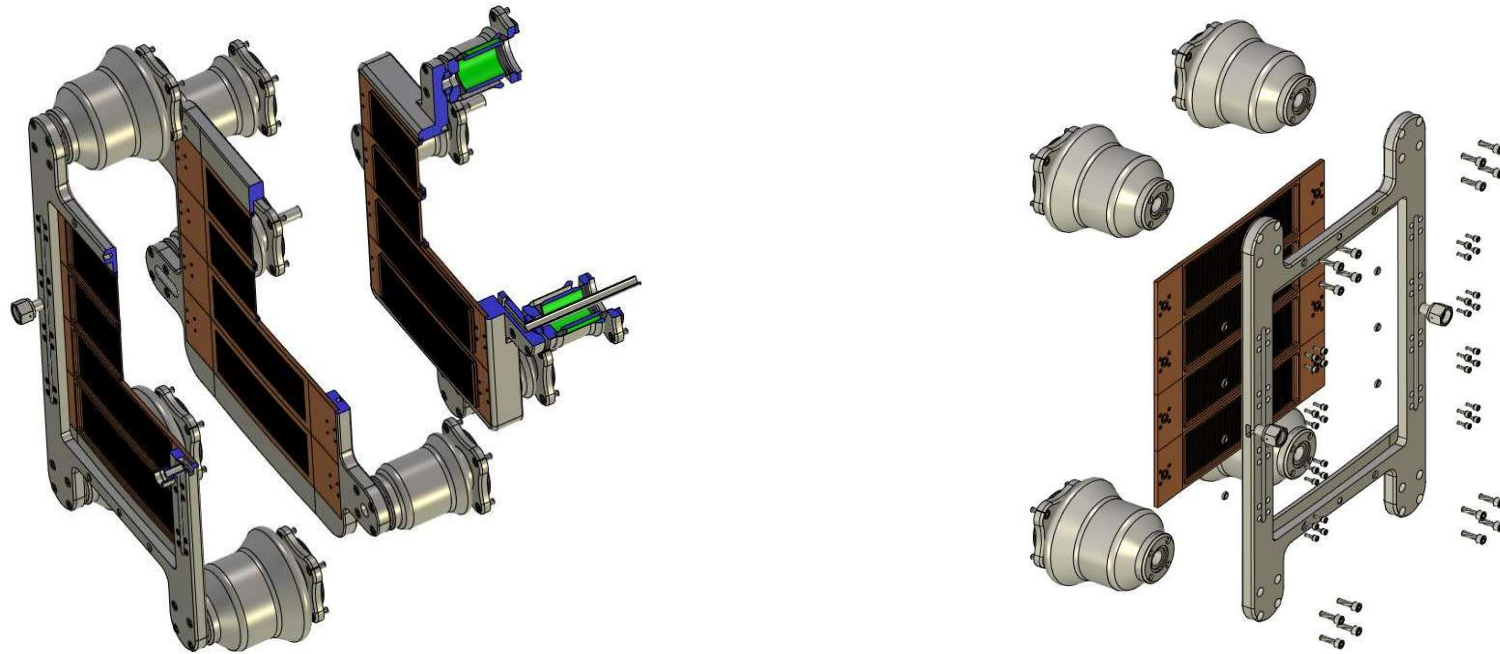
При нагреве электродов ИОС происходит их деформация, что ведет к изменению фокусного расстояния и увеличению угловой расходимости пучка. Как результат, снижается качество формирования пучка или происходит пробой между электродами.

## Ионный источник с активным охлаждением электродов



В рамках мероприятия 1.1.4 «Разработка и испытание мощных систем инжекции атомарных пучков для нагрева плазмы и поддержания тока, в том числе стационарных» необходимо создание экспериментального образца атомарного инжектора на положительных ионах низкой энергией (15 кэВ), но с рекордным током пучка (не менее 150 А) и длительностью  $\geq 30$ мс для установки ГДЛ. В качестве базового варианта выбран ионный источник инжектора С-2W. Параллельно ведется разработка и изготовление источника другой конструкции на требуемые параметры тока и напряжения, с частично активным охлаждением электродов.

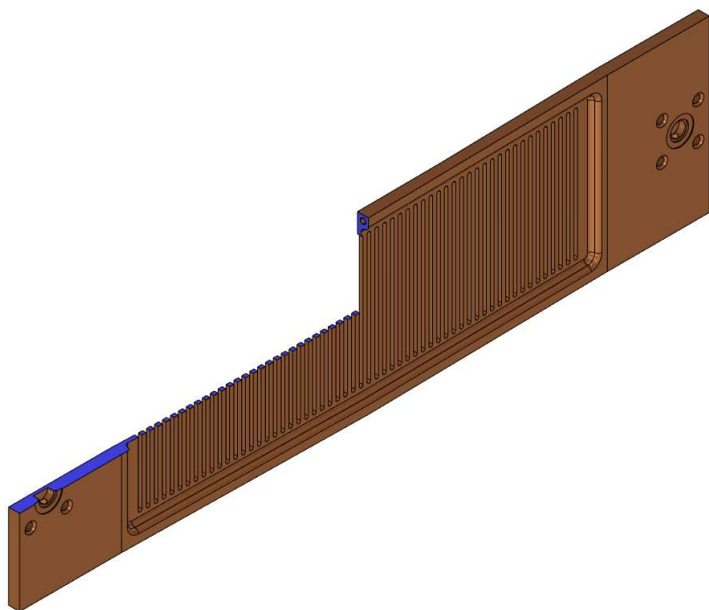
## Конструкция электродов



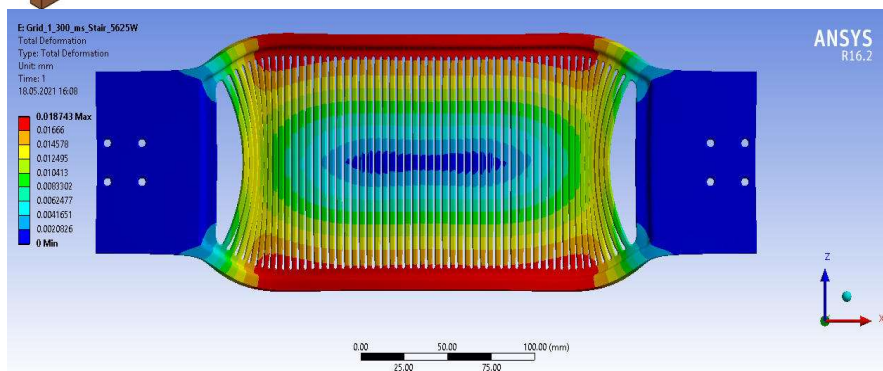
*Комплект электродов и конструкция крепления сегментов электрода к держателю*

Электроды состоят из 4 одинаковых сегментов размером 250x90 мм. Все 4 сегмента расположены на специальном держателе, через который подается охлаждающая вода. Механическое крепление держателей выполнено на металлокерамических стойках, внутри которых производится подача воды. Фокусировка в направлении поперек щелей не осуществляется, в направлении вдоль щелей осуществляется за счет наклона сегментов.

# Конструкция сегмента электрода ионно-оптической системы

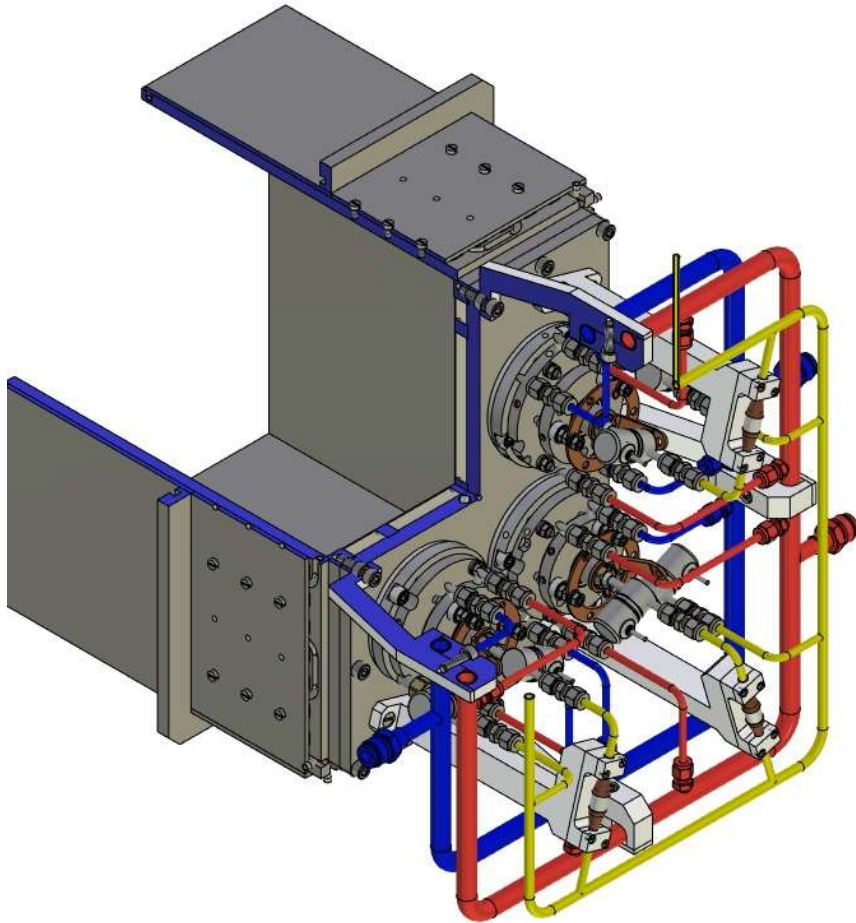


В каждом из сегментов имеется 2 канала охлаждения, идущих вдоль длинной стороны. Фокусировка в направлении поперек щелей не осуществляется (но возможна), в направлении вдоль щелей осуществляется за счет наклона сегментов. Сегменты электродов изготавливаются из хромоциркониевой бронзы, в которых сверлятся каналы охлаждения диаметром 3 мм. После пайки коллекторов в сегментах на станке с ЧПУ изготавливаются щели отверстий ионно-оптической системы и придается окончательная форма поверхности сегмента.



*Результат моделирования для 300 мс импульса нагрева.* Максимальная величина деформации составляет 0,015-0,02 мм, что пренебрежимо мало в сравнении с ускоряющим зазором и шириной щели элементарной ячейки.

## Конструкция источника плазмы

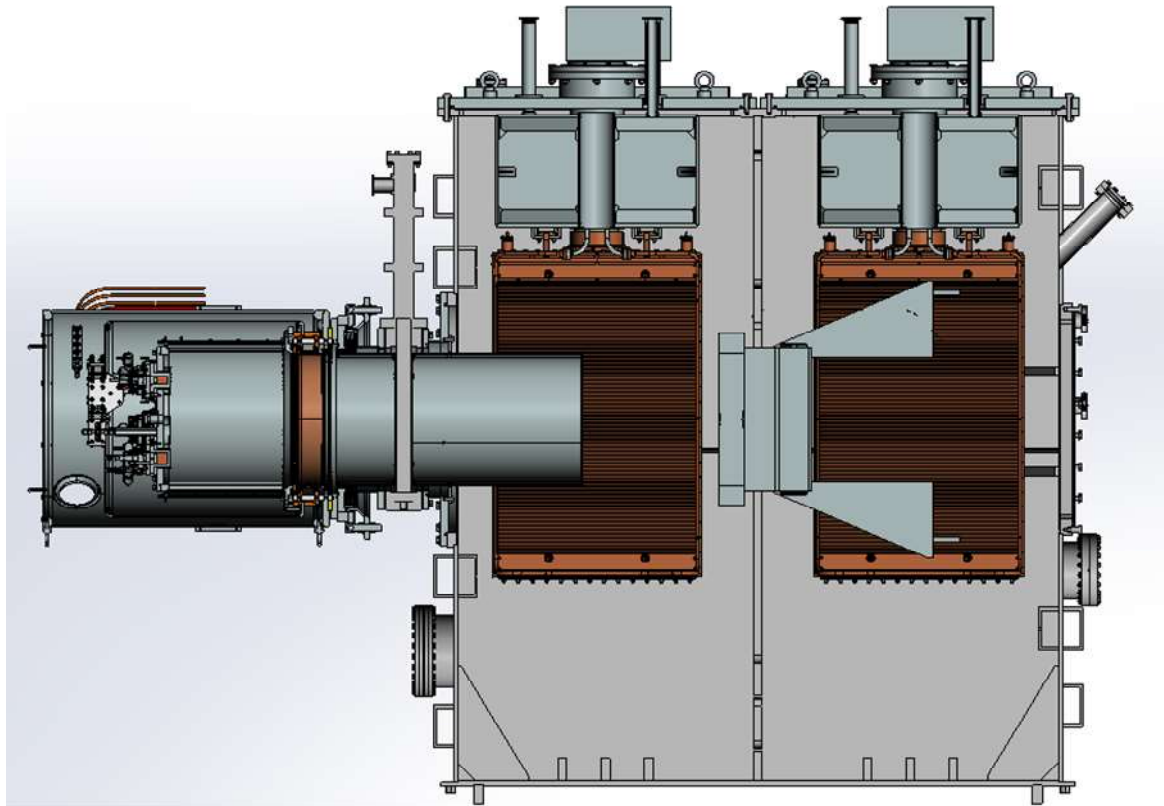


Источник плазмы разработан на основе конструкции источника плазмы инжектора С-2W. Отличие состоит в том, что цилиндрическая мультипольная магнитная стенка заменена на прямоугольную и добавлено ее охлаждение. Четыре дуговых генератора плазмы, аналогичных используемым в инжекторе С-2W, в состоянии обеспечить поток плазмы, достаточный для извлечения тока 150 А.

Выполнена проработка газовых коллекторов, удовлетворяющих требованиям по работе с водородом.



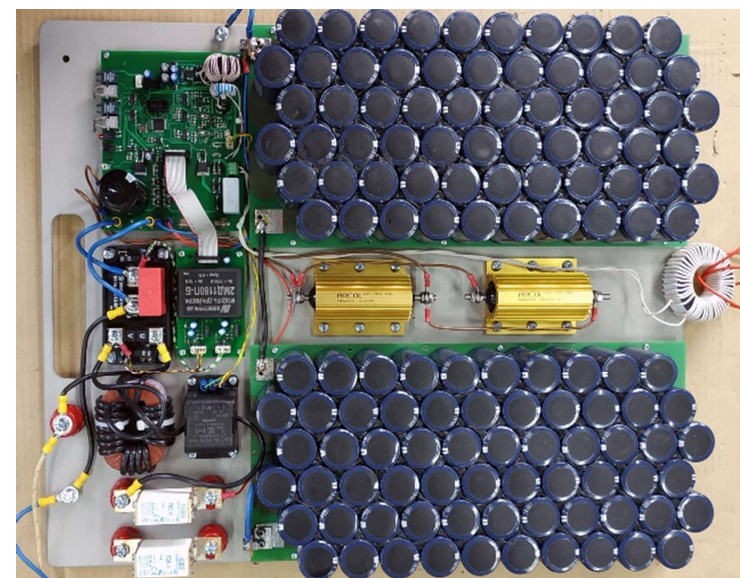
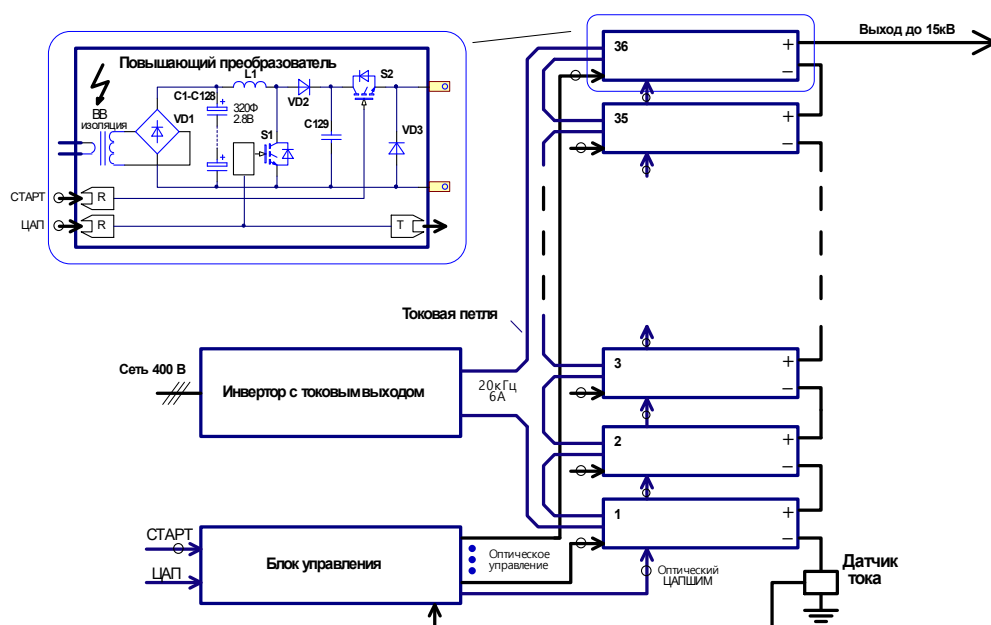
## Стенд испытаний ионного источника



Ионный источник устанавливается на прямоугольную камеру размером  $\sim 1,8 \times 1,2 \times 2,2$  м, внутри которой установлены крионасосы производительностью  $4 \times 150$  тыс. л/с. Внутри размещен отклоняющий магнит на постоянных магнитах и приемник ионов.

# Высоковольтный источник питания инжектора нейтральных атомов с током до 150 А и напряжением до 15 кВ

В источнике используется емкостной накопитель энергии на базе современных суперконденсаторов. Источник состоит из 36 последовательно включенных идентичных ячеек, каждая из которых генерирует импульс с напряжением до 430 В. В конструкцию заложена возможность увеличения проектной длительности импульса 30 мс до 300 мс путем увеличения емкости накопителей. Зарядка накопителей и питание ячеек осуществляется от общего высокочастотного инвертора через токовую петлю, изолированную на полное напряжение. Максимальная потребляемая мощность от сети не превышает 3 кВт.



Электрическая схема модулятора и внешний вид прототипа ячейки

## Выводы

1. Разработан и изготавливается ионный источник принципиально новой конструкции с возможностью активного охлаждения электродов для обеспечения длительности 300 и более миллисекунд
2. Конструкция ионного источника позволяет отказаться от использования набора проходных керамических изоляторов большого диаметра
3. Рабочее напряжение источника может быть существенно увеличено без значительных переделок конструкции путем замены изоляторов
4. Конструкция электродов обеспечивает минимальные тепловые деформации при пассивном охлаждении, при выбранной конструкции сегментов охлаждение происходит между рабочими импульсами пучка.
5. Конструкция допускает замену сегментов в случае низкого качества изготовления. Как результат, качество пучка должно существенно вырасти.
6. Разработан и изготавливается пучковый тракт для тестирования инжектора при работе с длительностью импульсов 300 мс.
7. Разработана новая конструкции подключения дуговых генераторов, позволяющая упростить подключение, уменьшить количество электрических контактов и т.д.
8. Разработана новая система подачи рабочего газа с автоматической регулировкой давления, соответствующая правилам работы с горючими и взрывоопасными газами (подводящие пластиковые трубки заменены металлокерамикой, установлены детекторы водорода, применен измеритель газового расхода во взрывобезопасном исполнении
9. Изготавливается модульная высоковольтная система питания источника с длительностью 300 мс на основе суперконденсаторов.

Спасибо за внимание!