

# **РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДРАЙВЕРА ДЛЯ НАГРЕВНЫХ АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ С ОХЛАЖДАЕМЫМ ЗАЩИТНЫМ ЭКРАНОМ**



**N**\*Novosibirsk  
State  
University  
\*THE REAL SCIENCE

Гаврисенко Даниил

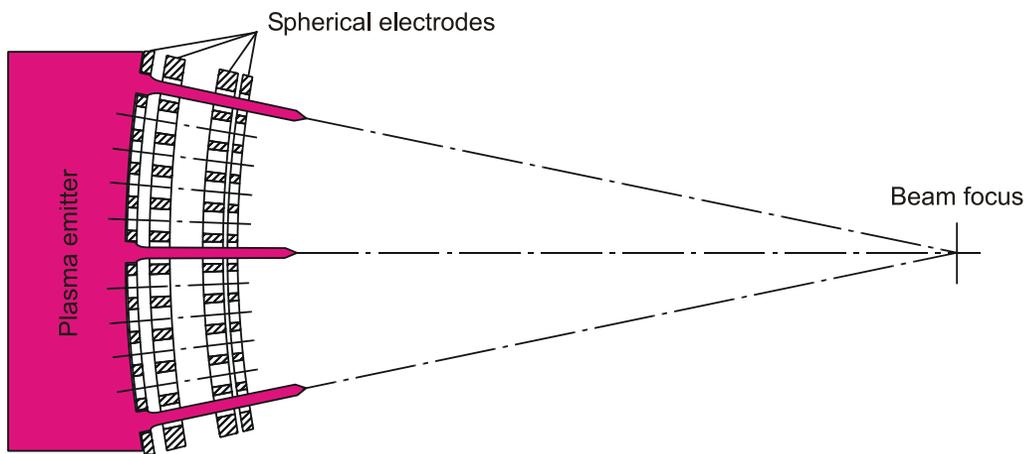
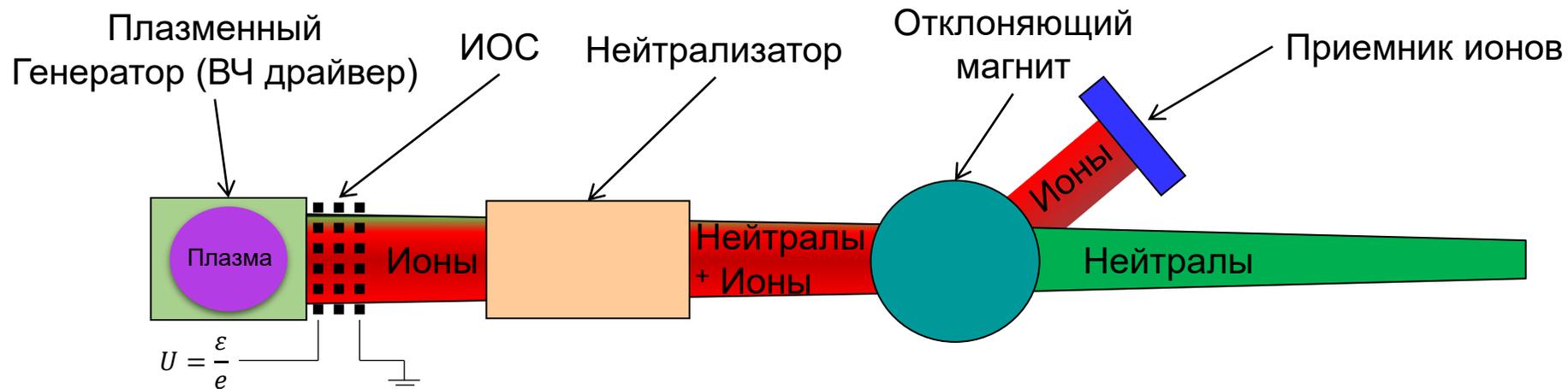
ИЯФ СО РАН

*Зимняя школа по физике высоких  
плотностей энергий 2024*

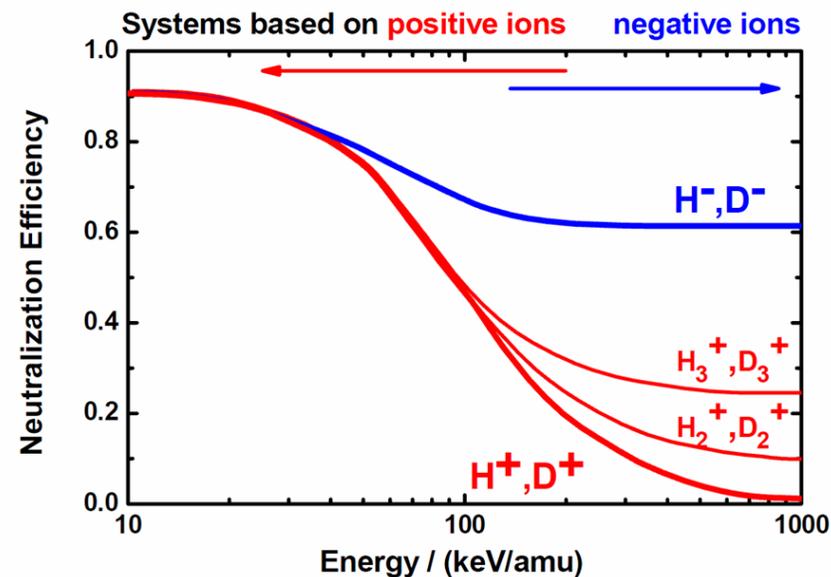
# План презентации:

- Схема работы инжектора
- Примеры существующих инжекторов
- Устройство высокочастотного генератора плазмы
- Описание экспериментального стенда
- Результаты измерений

# Схема работы инжектора



Устройство ИОС



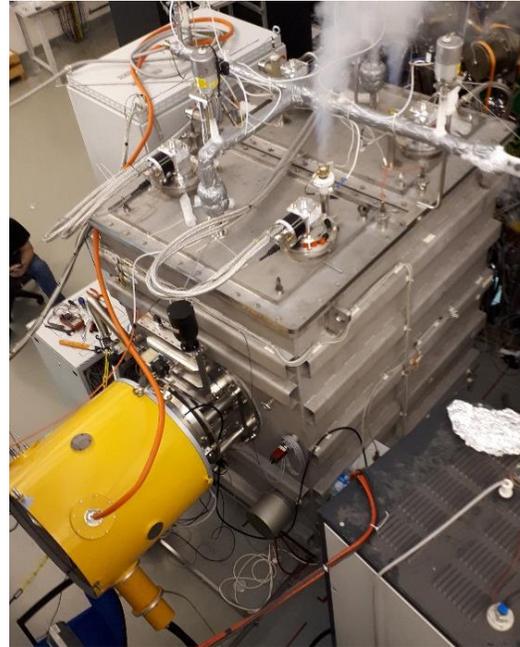
# Примеры существующих инжекторов



TCV, Швейцария

*Параметры инжектора:*

- Мощность – до 1 MW
- Энергия - до 25 keV
- Длительность - 2 сек
- Диапазон мощности - 25...100 %
- Модуляция пучка – до 250 Hz



COMPASS-D, Чехия

*Параметры инжектора:*

- Энергия - 80 keV
- Ток – 20 A
- Длительность - 1 сек

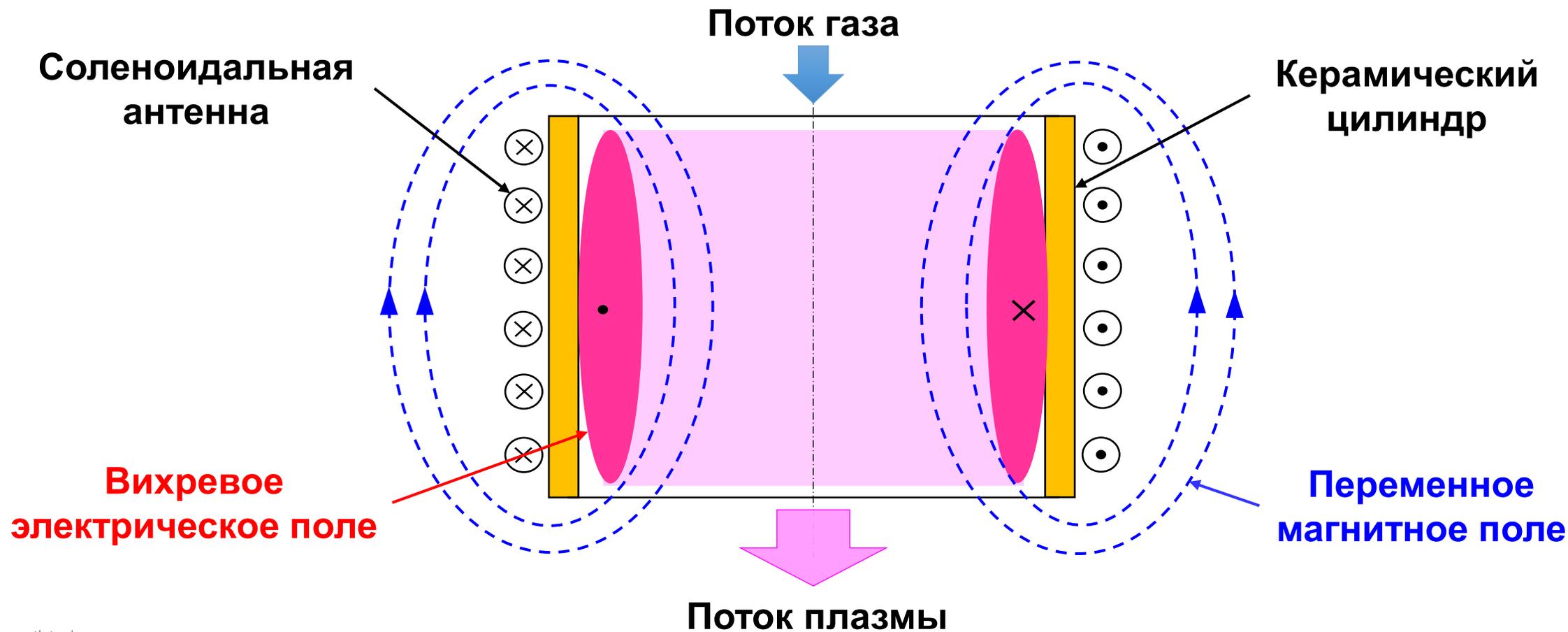


Стенд Н-, Россия

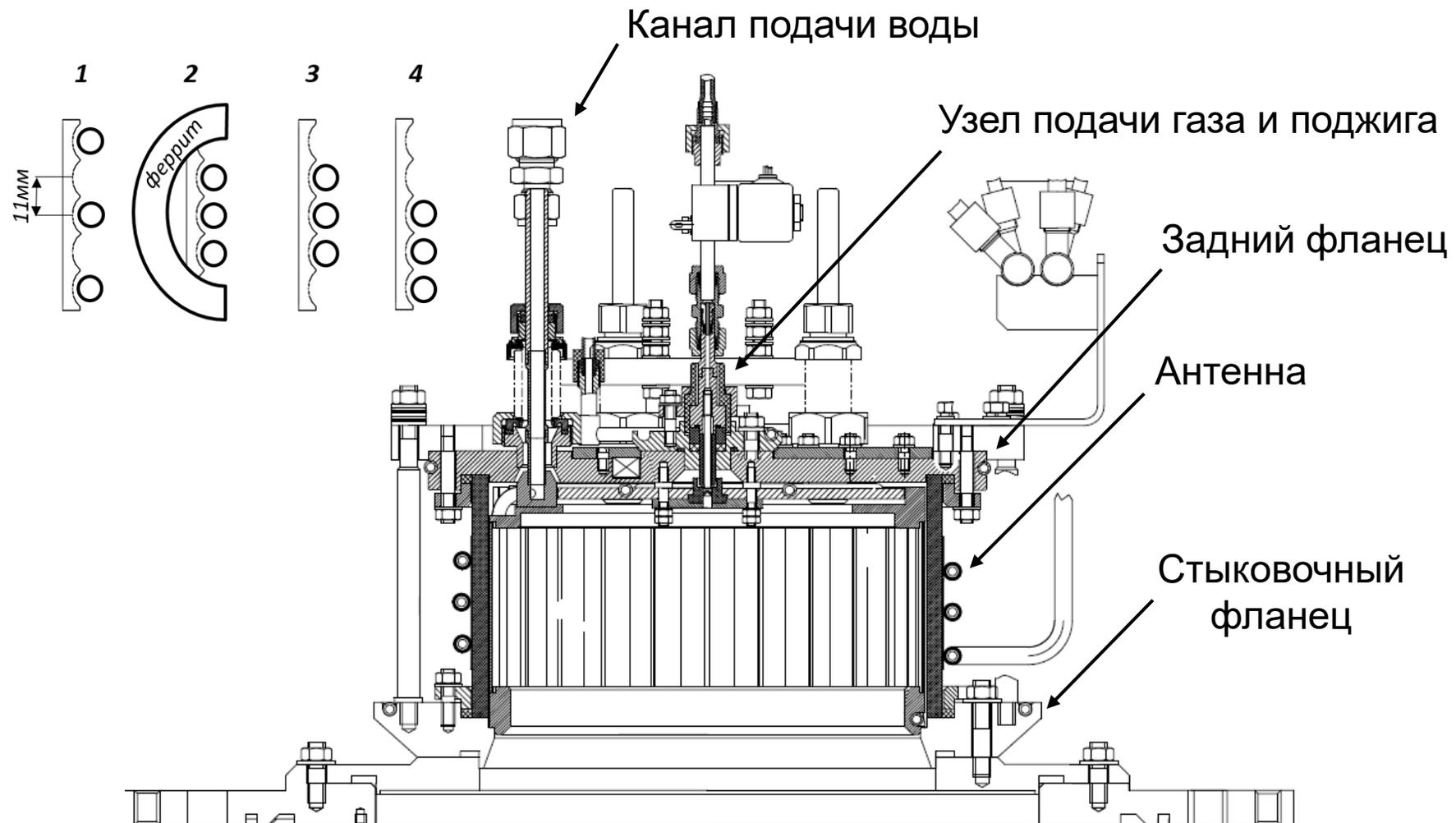
*Параметры инжектора:*

- Энергия - до 500 keV
- Ток И.И. – 1.5 A
- Длительность - 10 сек

# Индукционный высокочастотный разряд



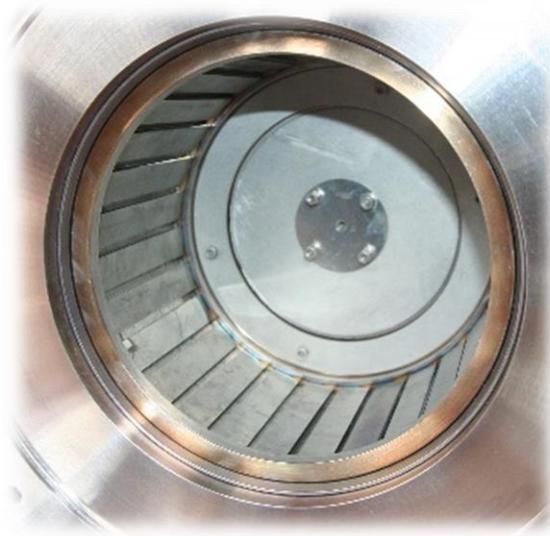
# Устройство ВЧ драйвера



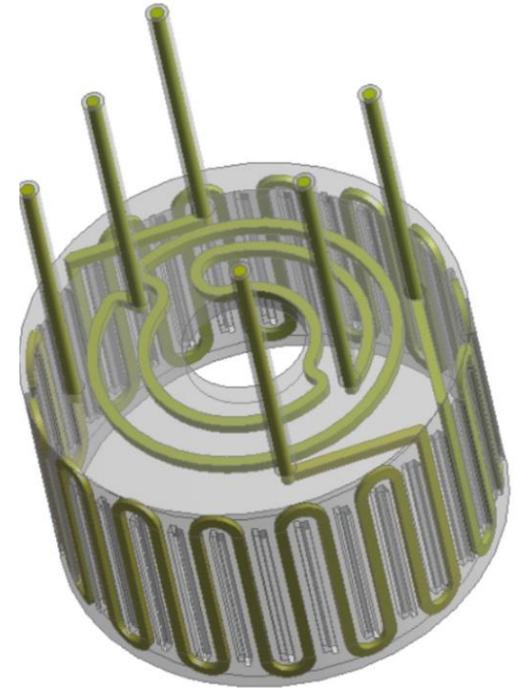
# Защитные экраны



Тонкий экран

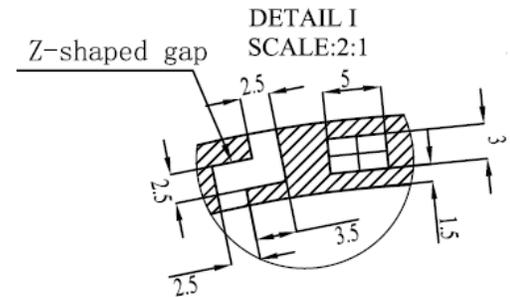
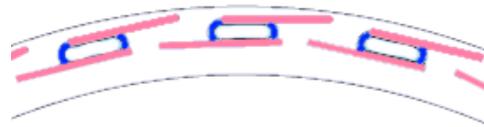


Паяный экран

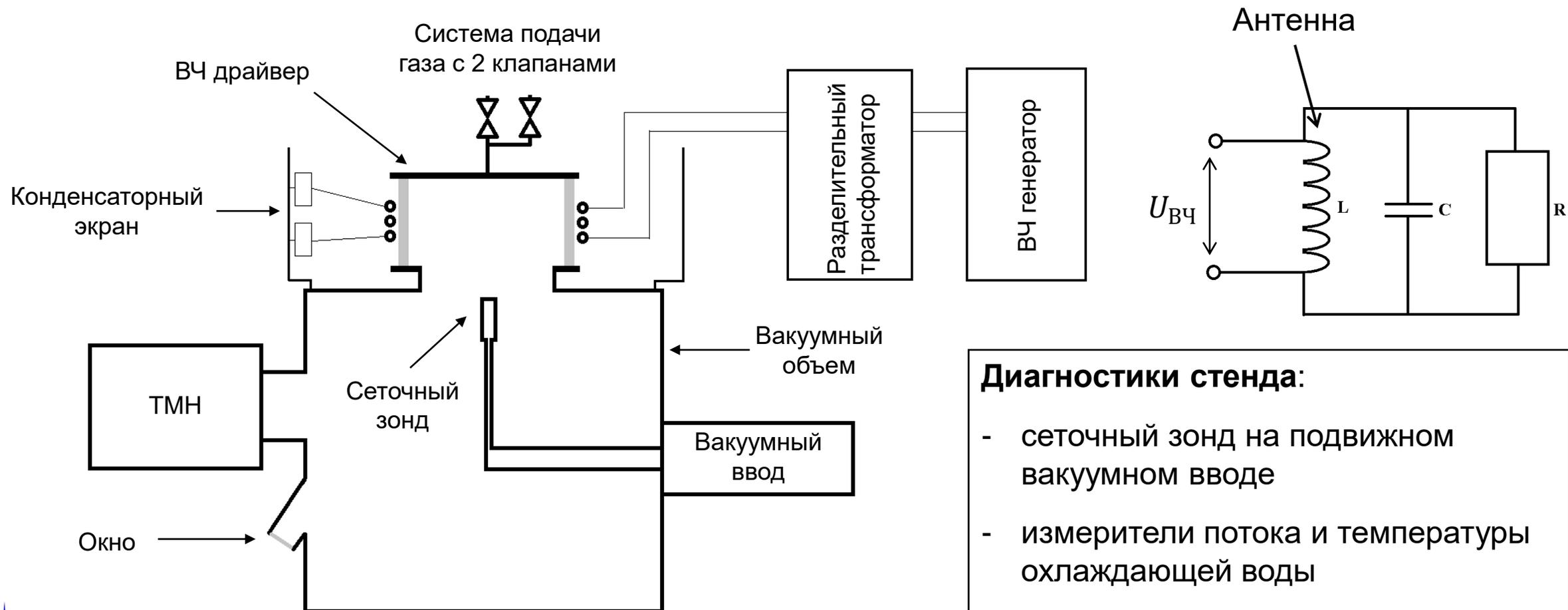


Экран с формованными щелями

Боковая поверхность всех экранов молибденовая



# Схема экспериментального стенда



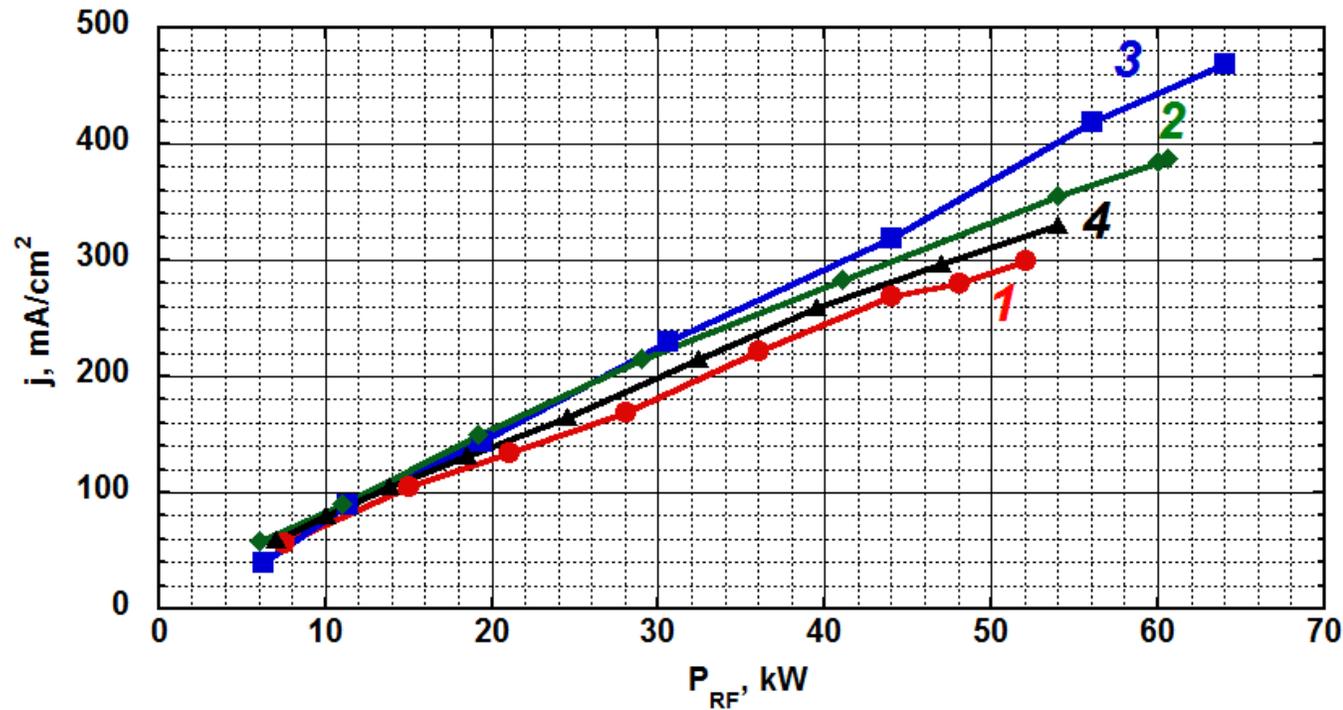
## Диагностики стенда:

- сеточный зонд на подвижном вакуумном вводе
- измерители потока и температуры охлаждающей воды
- тепловизор

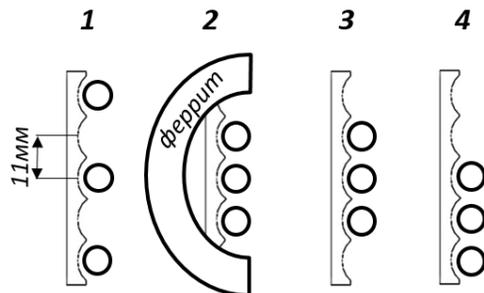
# Тонкий защитный экран



Плотность тока положительных ионов на зонд  $j$  в зависимости от мощности ВЧ генератора  $P_{RF}$



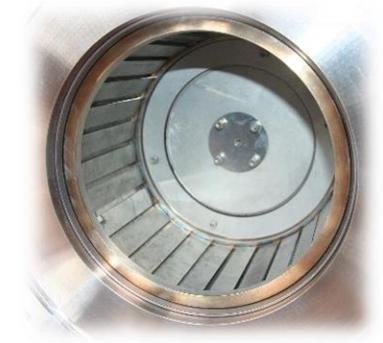
- Максимальная достигнутая плотность тока: **470** mA/cm<sup>2</sup> (**64** кВт, **10.8** кВ на антенне с конфигурацией 3)
- Максимальная эффективность ( $j/P_{RF}$ ) достигнута с конфигурацией 3
- Ферриты не дают значительного преимущества



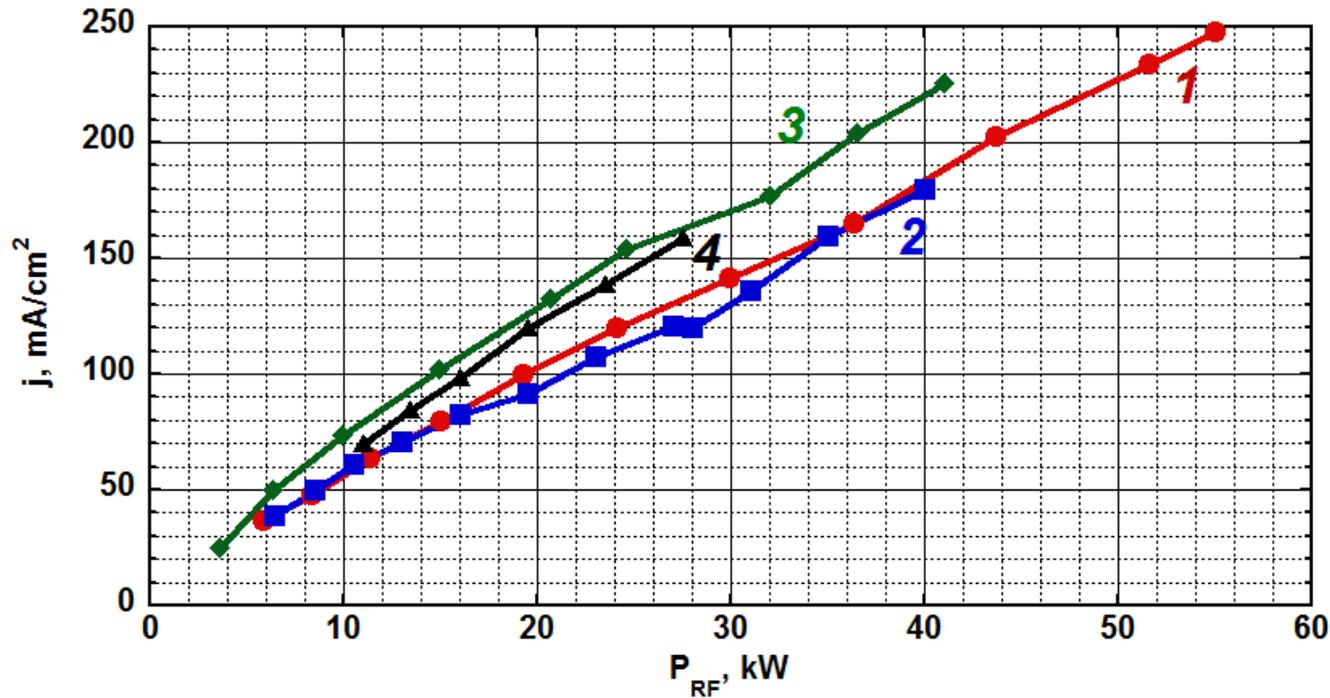
Конфигурации антенны:

- 1 – широкая
- 2 – с ферритами
- 3 – узкая
- 4 – низкая

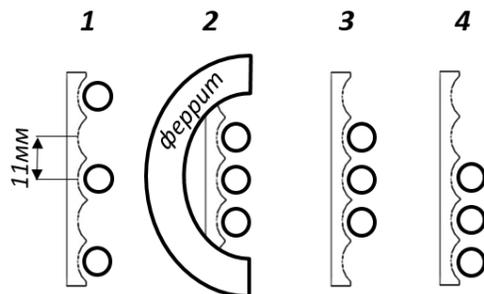
# Паяный защитный экран



Плотность тока положительных ионов на зонд  $j$  в зависимости от мощности ВЧ генератора  $P_{RF}$



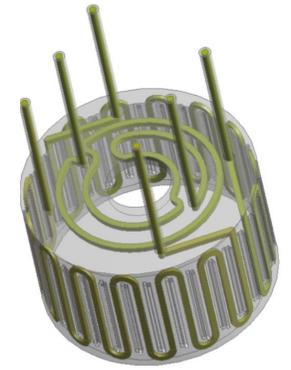
- Максимальная достигнутая плотность тока: **248 mA/cm<sup>2</sup>** (**55 кВт**, **10.4 кВ** на антенне с конфигурацией 1)
- Максимальная эффективность ( $j/P_{RF}$ ) достигнута с конфигурацией 2
- Повышенную эффективность имеет конфигурация 4



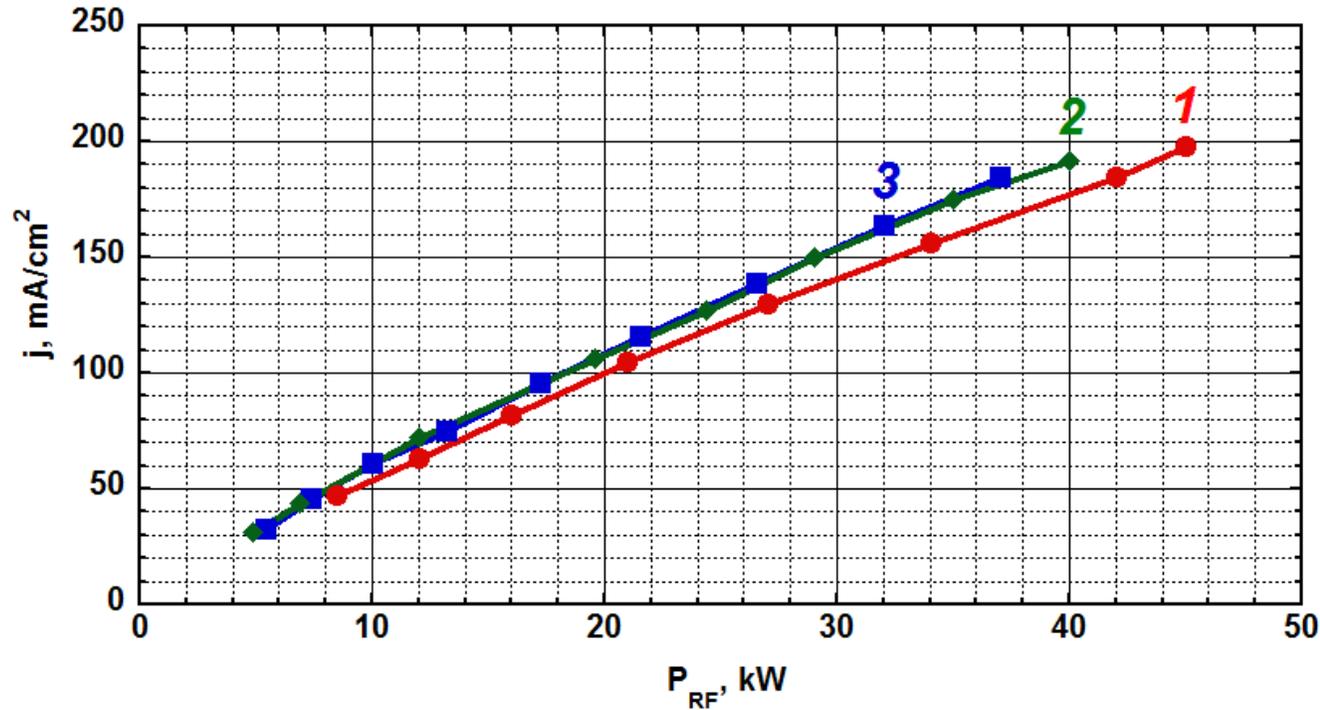
Конфигурации антенны:

- 1 – широкая
- 2 – с ферритами
- 3 – узкая
- 4 – низкая

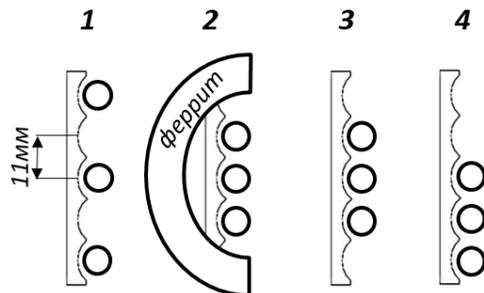
# Экран с формованными щелями



Плотность тока положительных ионов на зонд  $j$  в зависимости от мощности ВЧ генератора  $P_{RF}$



- Максимальная достигнутая плотность тока: **198** mA/cm<sup>2</sup> (**45** кВт, **10.5** кВ на антенне с конфигурацией 1)
- Максимальная эффективность ( $j/P_{RF}$ ) достигнута с конфигурациями 2 и 3
- С данным экраном труднее всего вкладывать мощность плазму

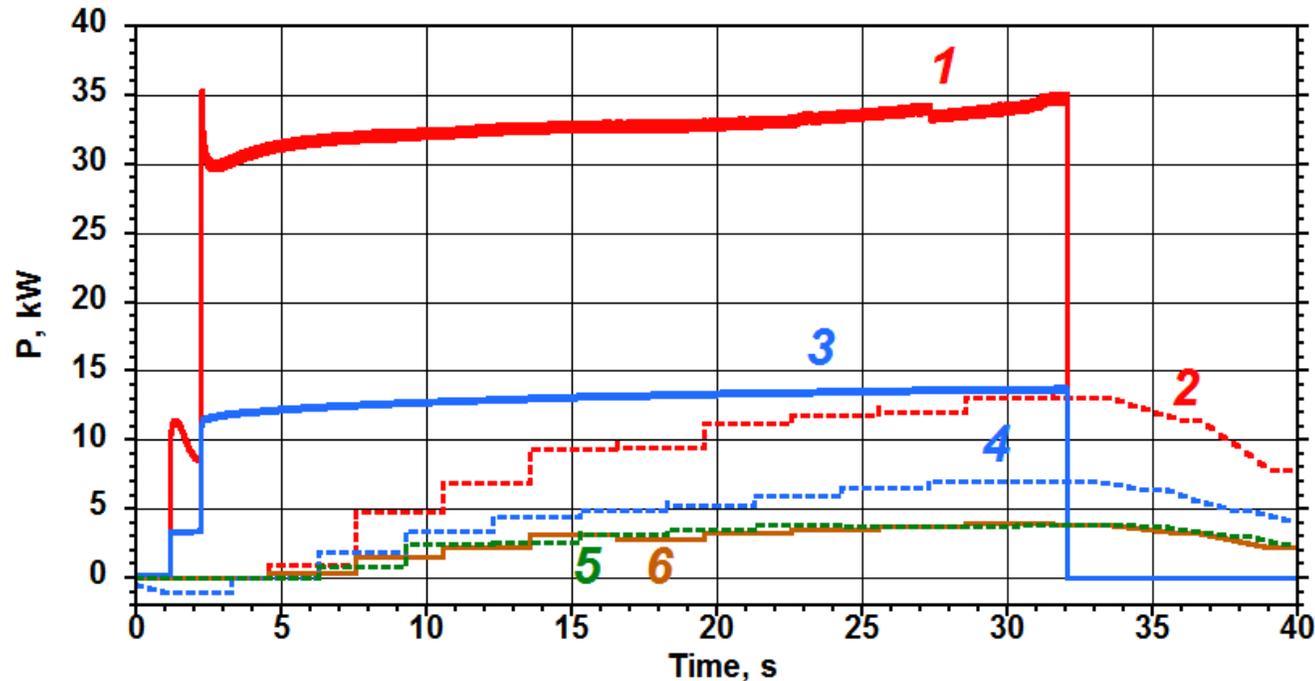


Конфигурации антенны:

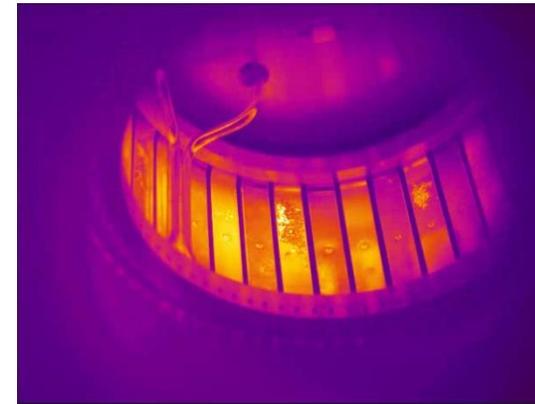
- 1 – широкая
- 2 – с ферритами
- 3 – узкая
- 4 – низкая

# Тонкий защитный экран

Осциллограммы мощностей



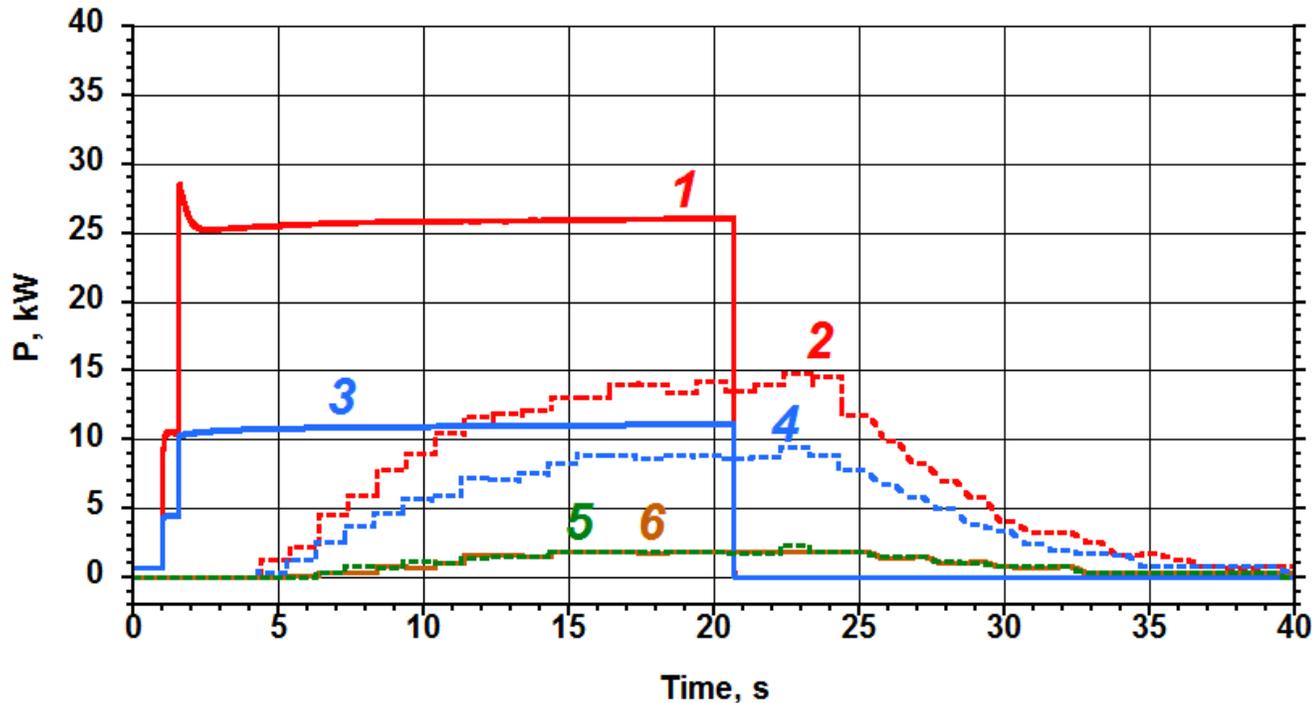
- Эффективность передачи мощности в плазму ~ 60 %
- Стационарный режим не достигнут за 30 сек



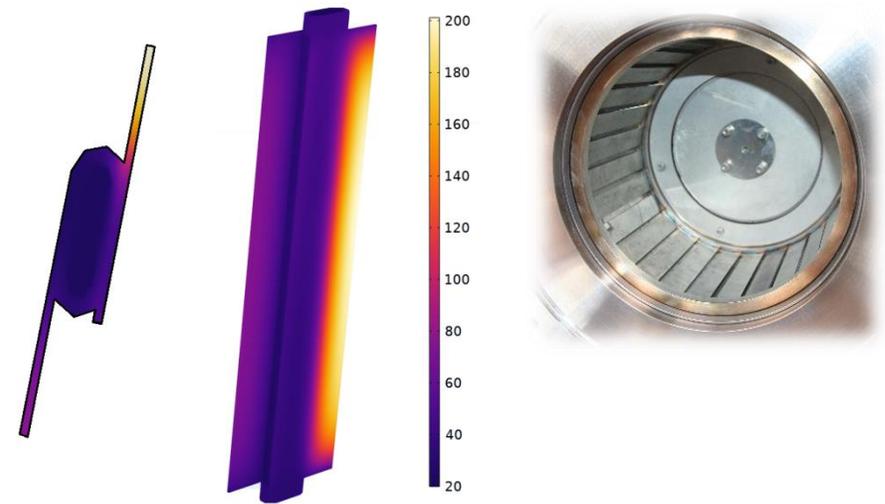
- 1 – мощность ВЧ генератора с ВЧ разрядом
- 2 – мощность уносимая с боковой поверхности защитного экрана с ВЧ разрядом
- 3 – мощность ВЧ генератора без ВЧ разряда
- 4 – мощность уносимая с боковой поверхности защитного экрана без ВЧ разряда,
- 5,6 – мощность уносимая с антенны, узла поджига, заднего и переднего фланцев с ВЧ разрядом и без него.

# Паяный защитный экран

## Осциллограммы мощностей



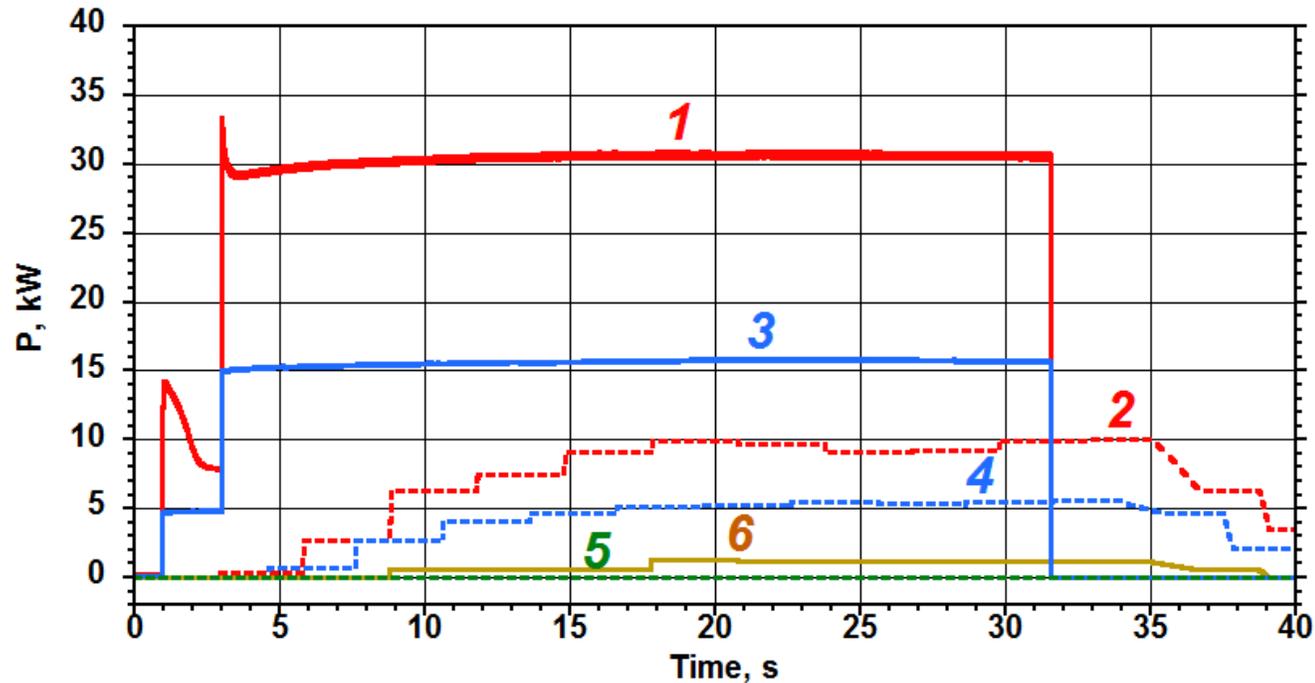
- Эффективность передачи мощности плазме ~ 57 %
- На стационар выходит за 15 с



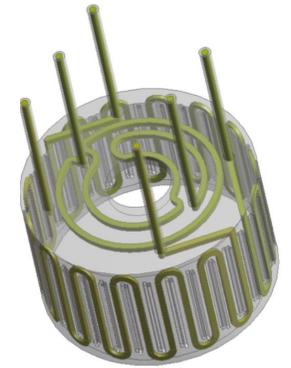
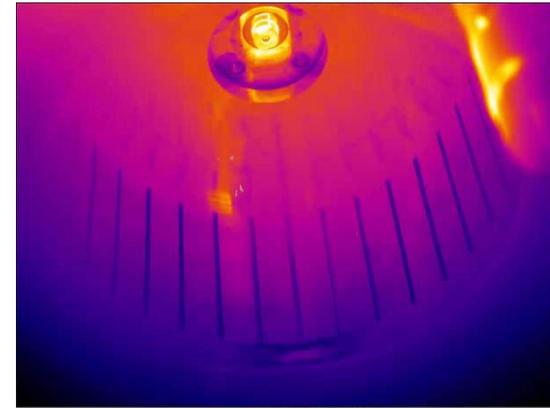
- 1 – мощность ВЧ генератора с ВЧ разрядом
- 2 – мощность уносимая с боковой поверхности защитного экрана с ВЧ разрядом
- 3 – мощность ВЧ генератора без ВЧ разряда
- 4 – мощность уносимая с боковой поверхности защитного экрана без ВЧ разряда,
- 5,6 – мощность уносимая с антенны, узла поджига, заднего и переднего фланцев с ВЧ разрядом и без него.

# Экран с формованными щелями

## Осциллограммы мощностей



- Эффективность передачи мощности в плазму ~ 47 %
- На стационар выходит за 18 с



- 1 – мощность ВЧ генератора с ВЧ разрядом
- 2 – мощность уносимая с боковой поверхности защитного экрана с ВЧ разрядом
- 3 – мощность ВЧ генератора без ВЧ разряда
- 4 – мощность уносимая с боковой поверхности защитного экрана без ВЧ разряда,
- 5 – мощность уносимая с задней стенки защитного экрана без ВЧ-разряда
- 6 – мощность уносимая с задней стенки защитного экрана с ВЧ-разрядом

# Основные результаты

Экран	Тонкий	Паяный	С формованными щелями
Максимальная мощность/ напряжение на антенне	64 кВт/ 10.8 кВ	55 кВт/ 10.4 кВ	45 кВт/ 10.5 кВ
Плотность тока/ток на выходе ВЧ драйвера	470 мА/105 А	248 мА/57 А	198 мА/50 А
	<ul style="list-style-type: none"><li>- Высокая эффективность</li><li>- Не подходит для стационарной работы</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Достаточная эффективность</li><li>- Обеспечивает стационарную работу</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Затрудняет вклад ВЧ мощности в плазму</li><li>- Обеспечивает стационарную работу</li></ul>

**Спасибо за внимание!**