

Инжекторы быстрых атомов водорода

Полосаткин Сергей Викторович

<http://www.inp.nsk.su/students/plasma/sk/tpe.ru.shtml>

Инжекторы быстрых нейтралов для термоядерного синтеза

Нагрев плазмы, поддержание тока

$E=20$ кэВ – 1 МэВ, $P=1-20$ МВт

Диагностика плазмы

Ослабление пучка – n_i

Поток нейтралов перезарядки – $f(E_i)$

Резерфордовское рассеяние – T_i

Активная спектроскопия (CXRS) – T_i, n_{imp}

Motional Stark Effect – $B, I(r)$

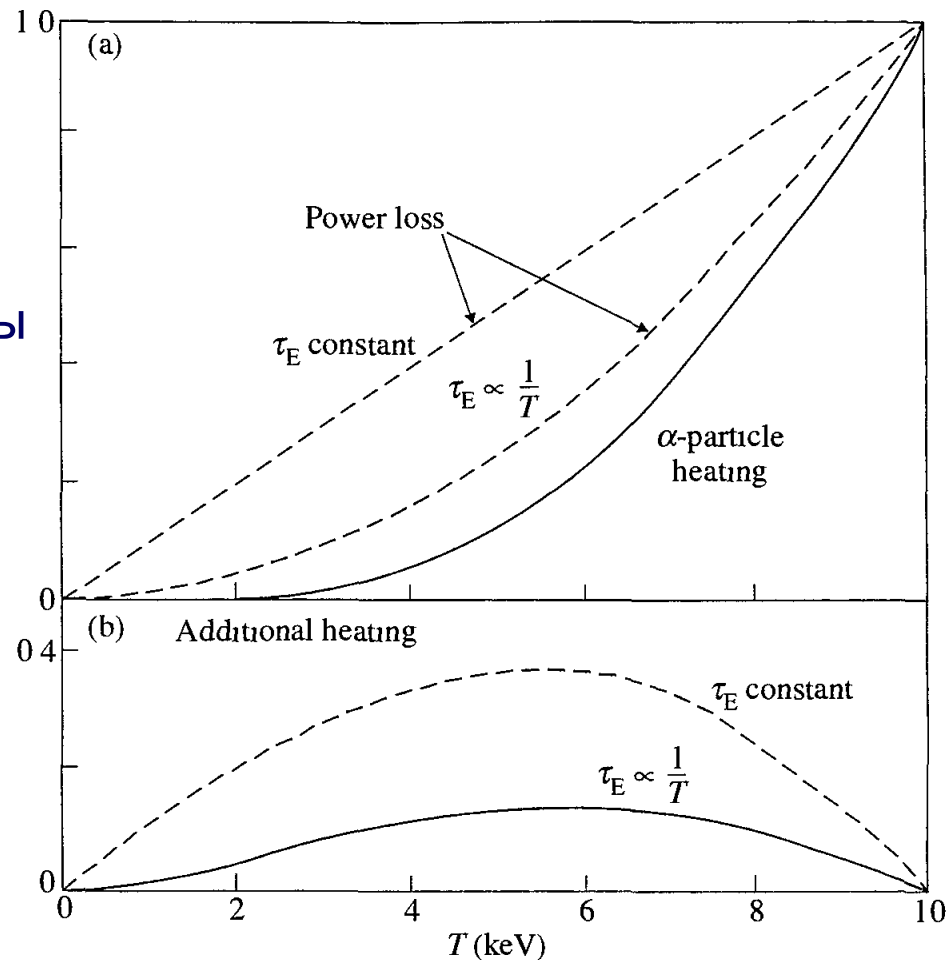
$E=20$ кэВ – 100 кэВ, $P=0,1-1$ МВт

Малая расходимость, модуляция пучка

Инжекторы быстрых нейтралов для термоядерного синтеза

Баланс энергии в горячей плазме:

- Теплопроводность $\sim T$
- Тормозное излучение $\sim T^{1/2}$
- + Нагрев током $\sim T^{-3/2}$
- + Нагрев α -частицами $\sim T^{5/2}$
- + Дополнительный нагрев плазмы



Захват и торможение быстрых атомов в плазме

Захват быстрых ионов:

-Перезарядка $H_f^0 + H_T^+ = H_T^0 + H_f^+$

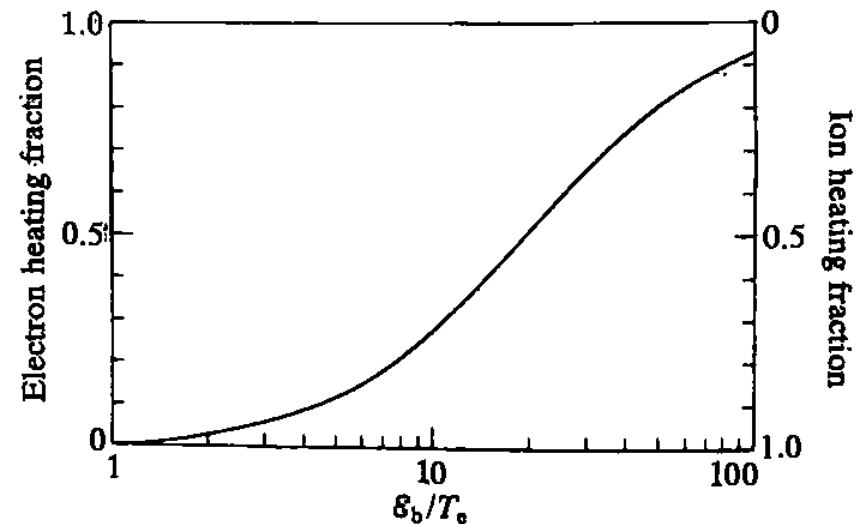
-Ионизация $H_f^0 + e = H_f^+ + 2e$

Торможение ионов:

$H_f^+ + e = H_f^+ + e$

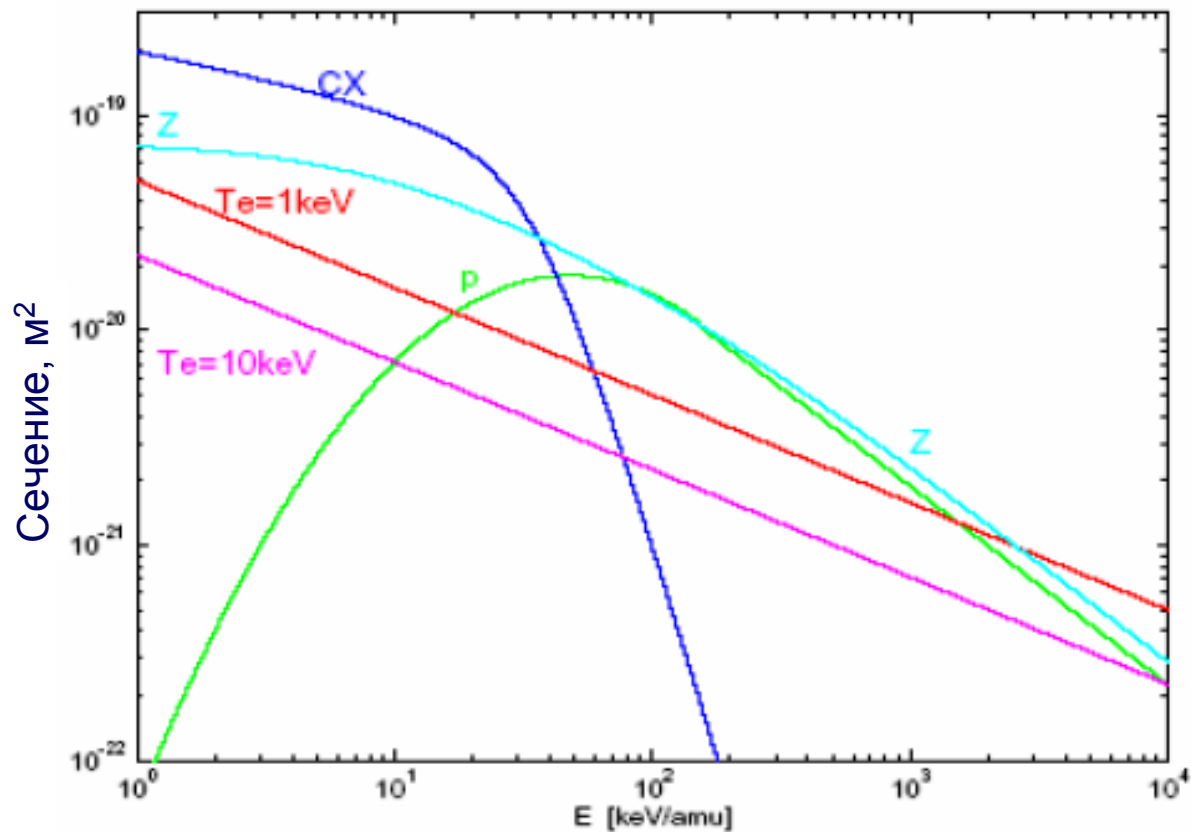
$H_f^+ + i = H_f^+ + i$

Доля энергии, передаваемая ионам и электронам от нейтрального пучка



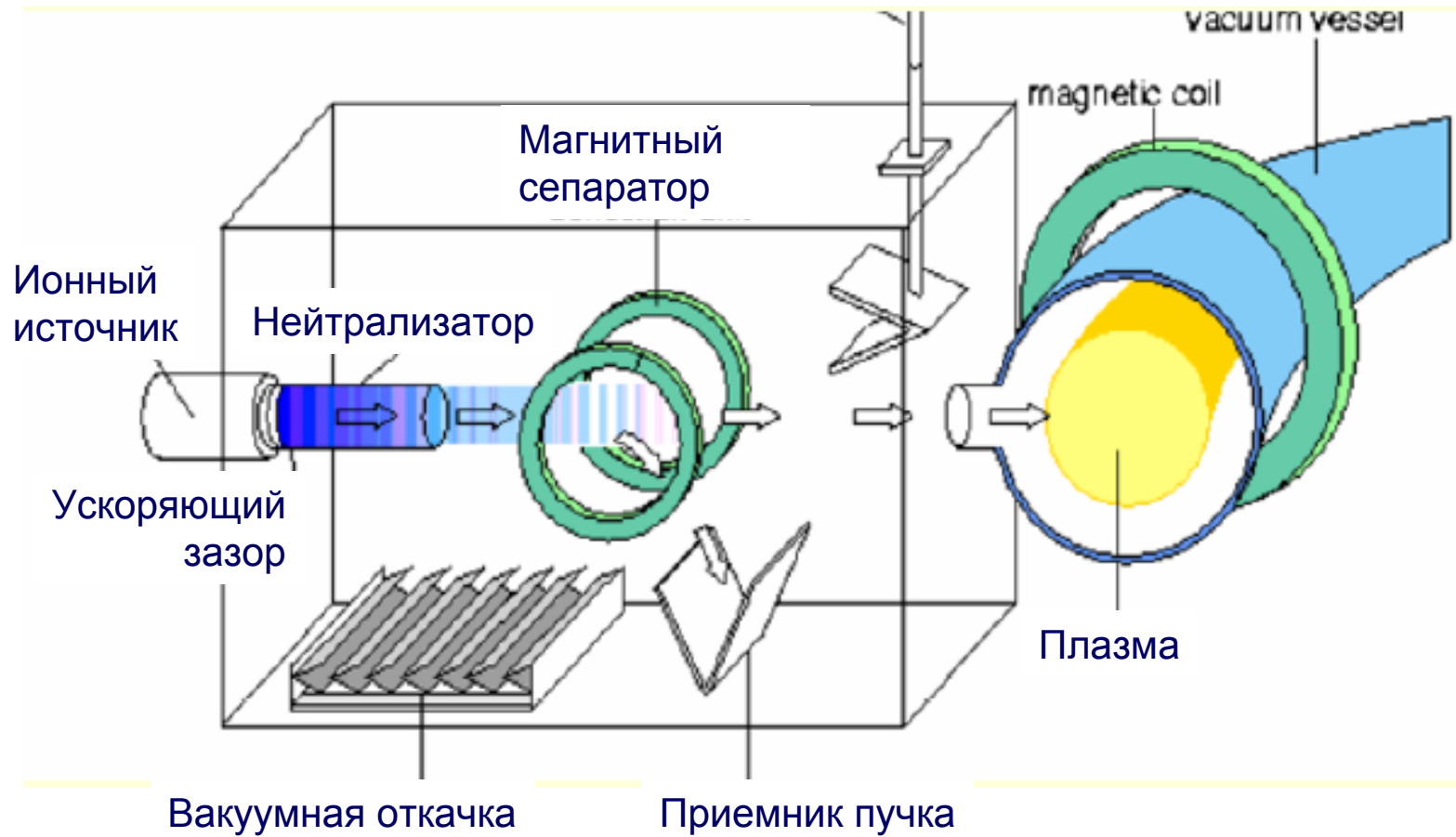
J. Wesson Tokamaks

Сечения перезарядки на протонах (CX) и примесях (Z), сечения ионизации электронами ($T_e=1, 10$ кэВ) и протонами (p)



Крупные плазменные установки $n_l \sim 10^{20} \text{ m}^{-2}$
Энергия частиц больше 100 кэВ

Инжекторы быстрых нейтралов для термоядерного синтеза



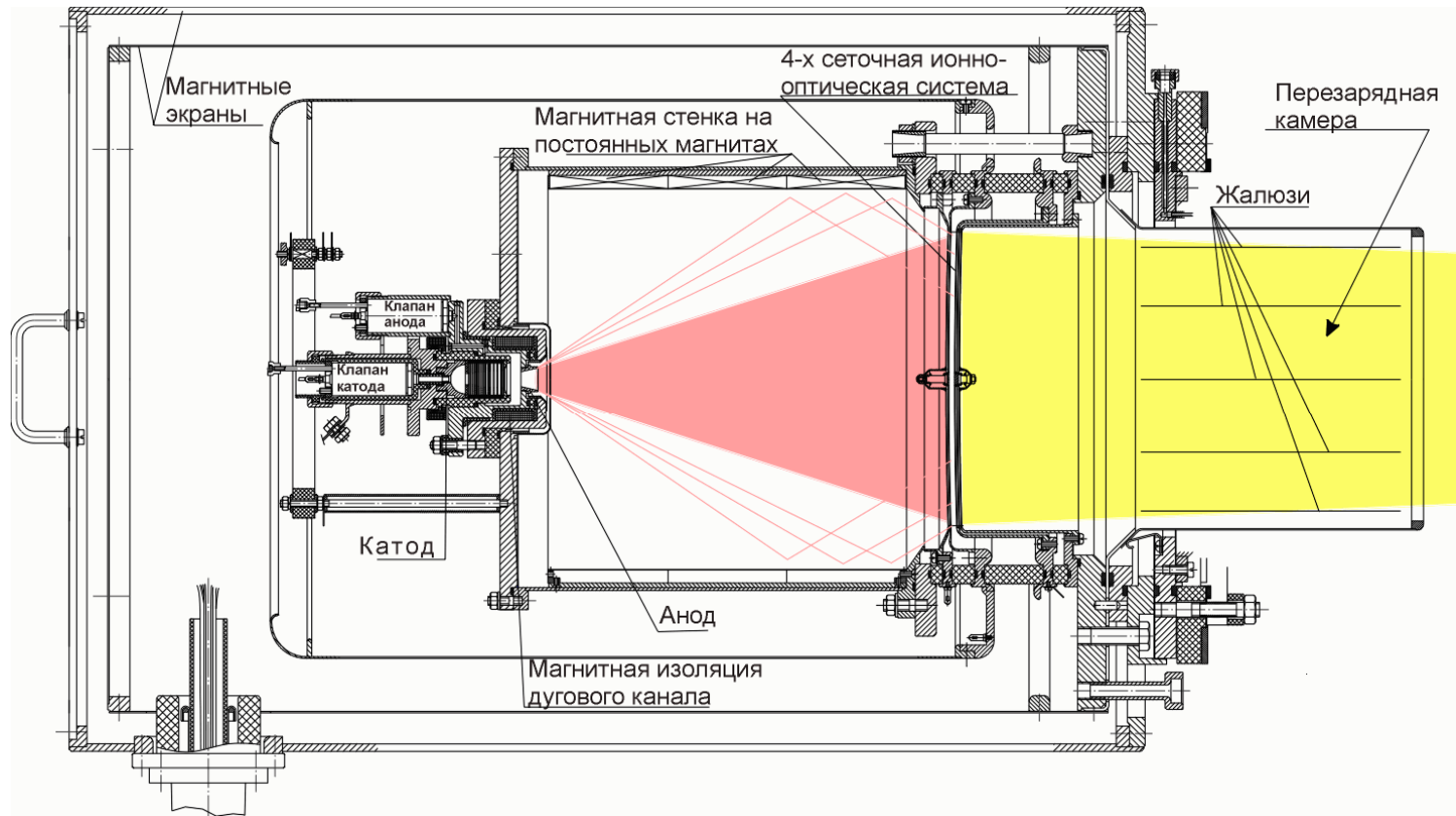
Дуговой ионный источник

Высокая эффективность

Простота

Малая доля молекулярных ионов

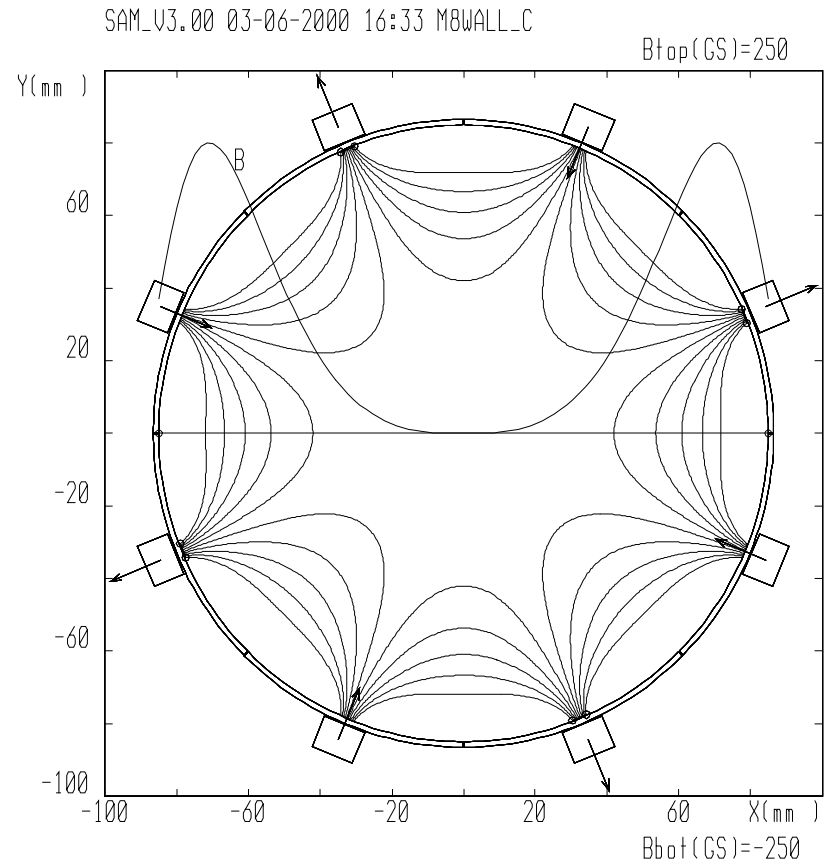
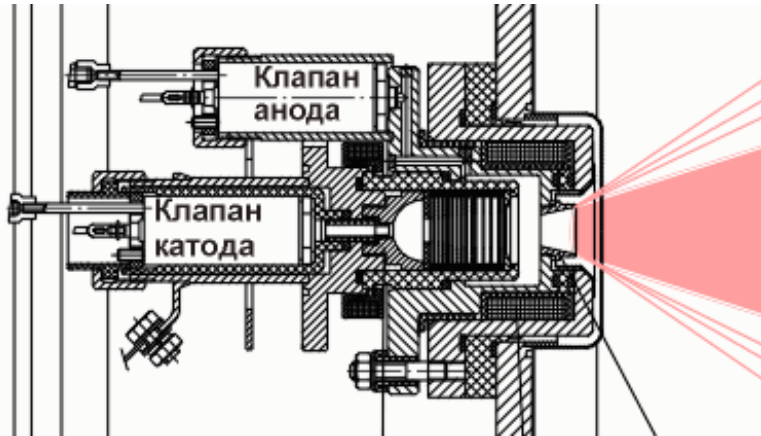
Ограничение по времени работы



Инжекторы СТАРТ

Магнитная стенка 16 магнитов NdFeB

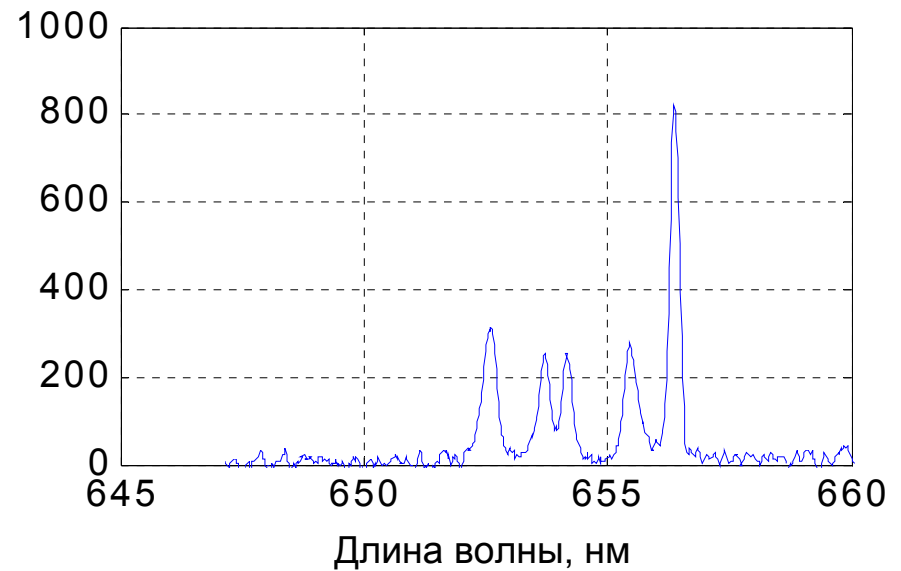
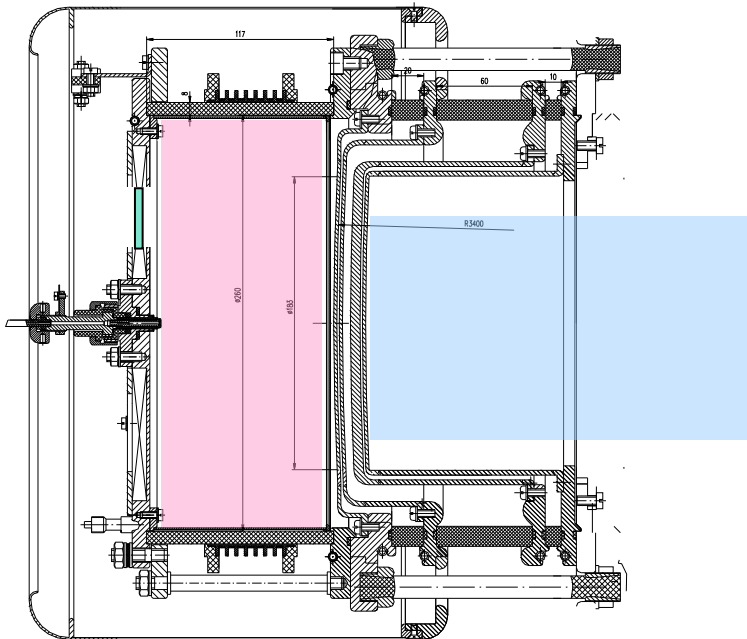
Дуга 1200 А, 90 В, 5 мс



ВЧ ионный источник

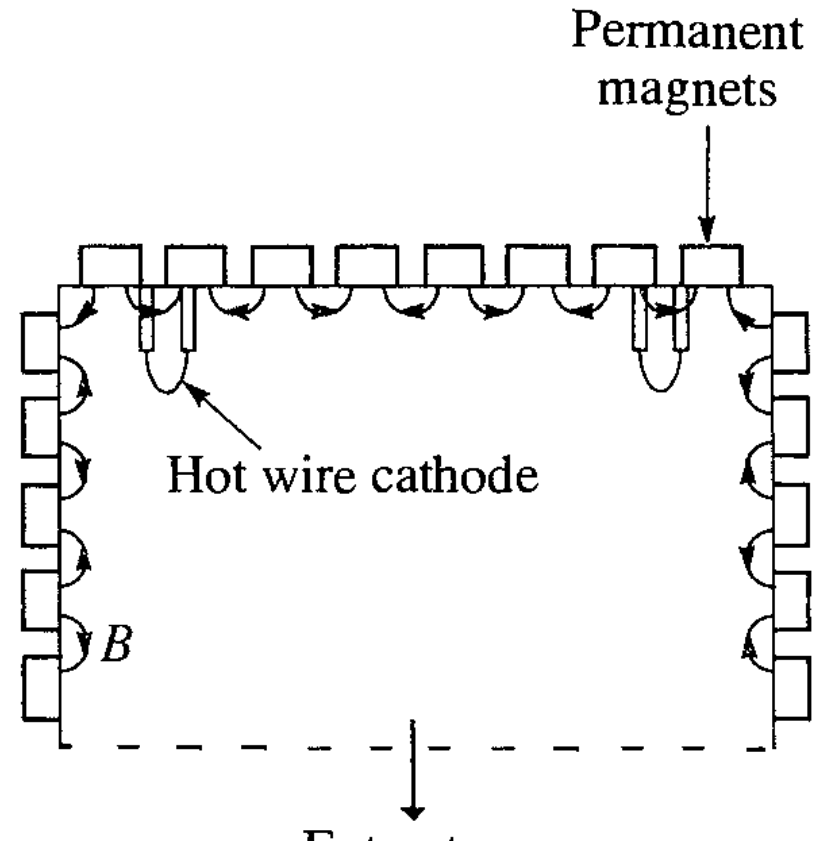
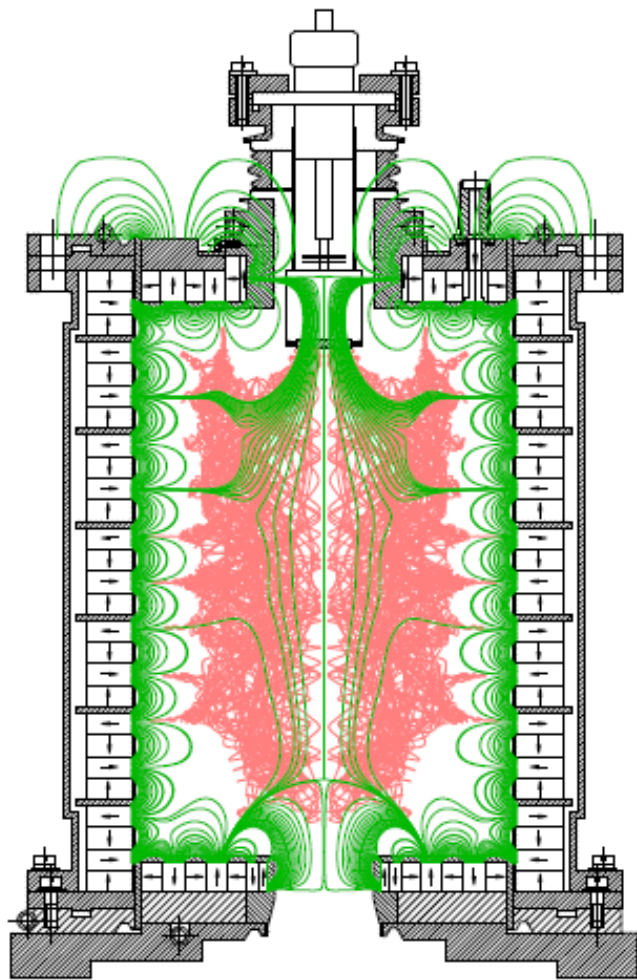
Большая длительность работы

Высокое (~40%) содержание молекулярных ионов



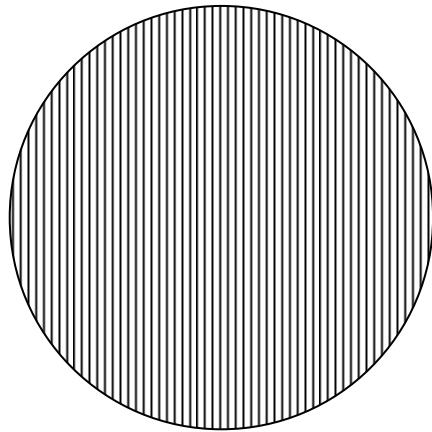
ВЧ разряд 20 МГц, 30 кВт, 1 с

Ионный источник с накаливаемыми катодами

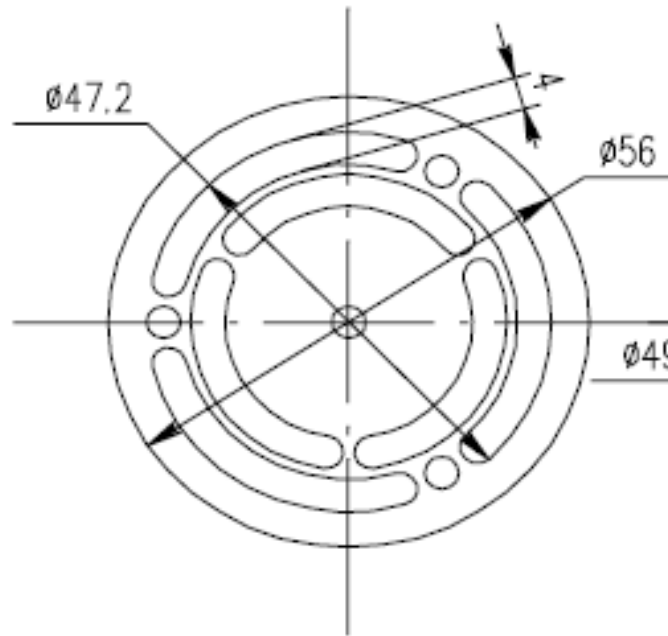


Виды апертур

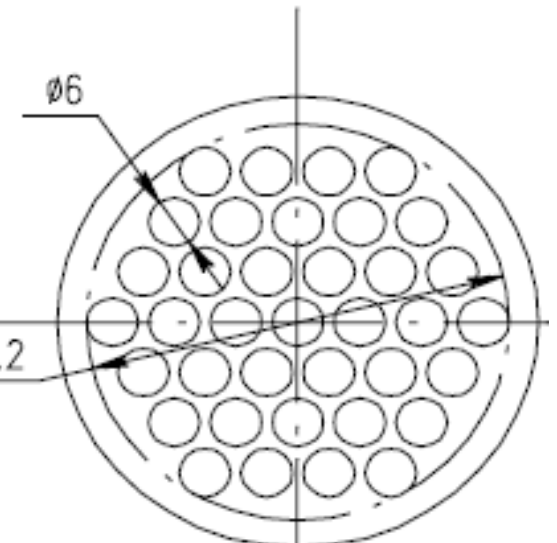
Сетки (СТАРТ-3)



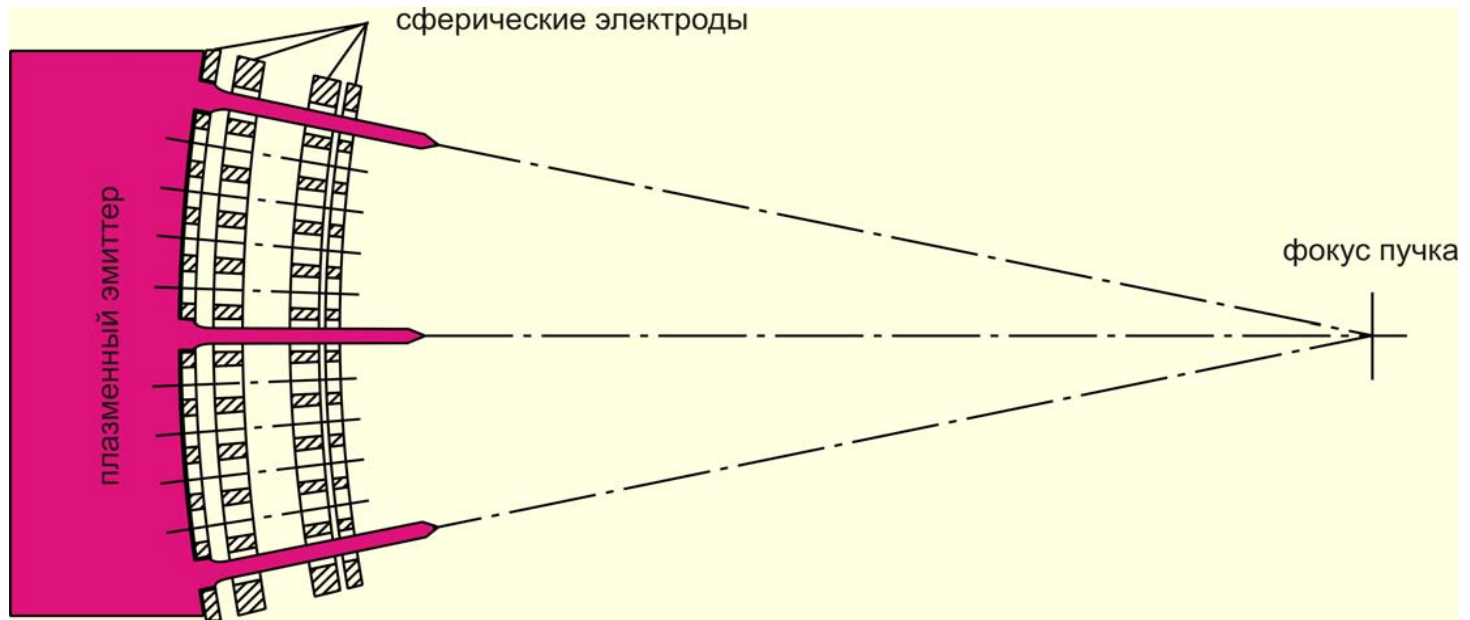
Щелевая



Гексагональная



Геометрическая фокусировка



Плотность тока в фокусе
$$j(r, F) = \frac{I_b e^{-r^2/(\delta\alpha F)^2}}{\pi^2 F^2 \delta\alpha^2}$$

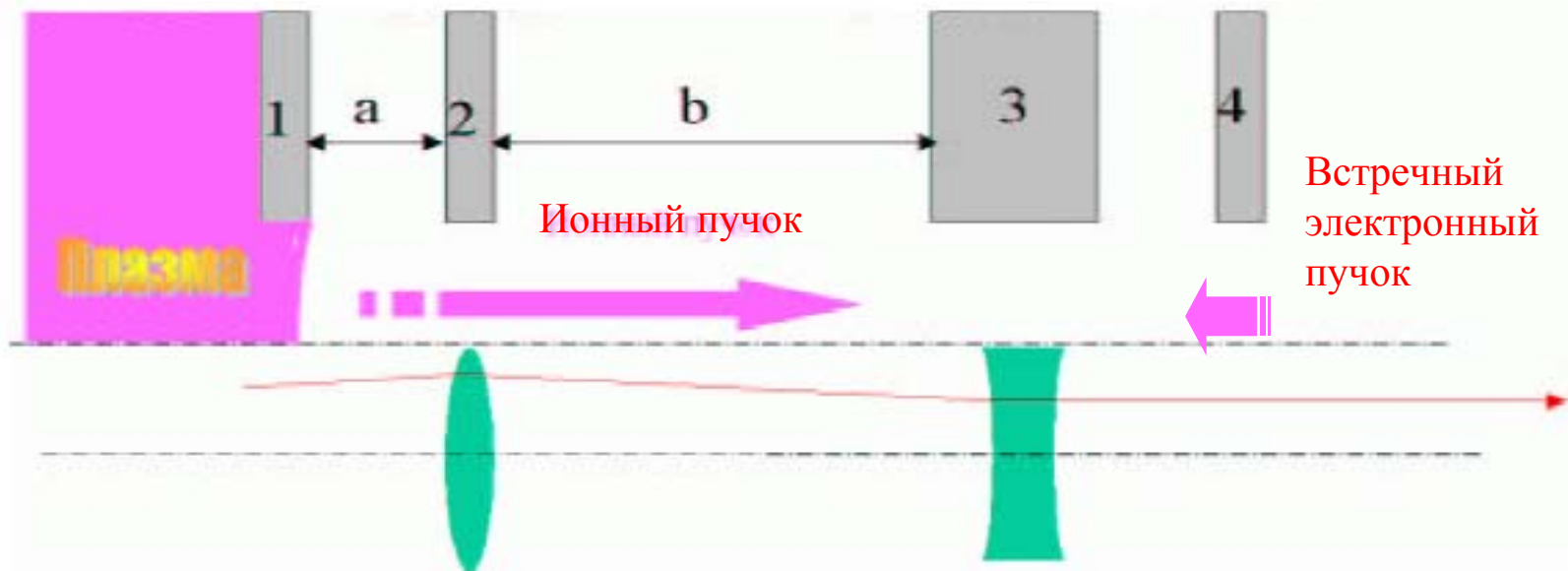
Ионно-оптическая система

Плазменный
U=25 кВ

Вытягивающий
U=22,5 кВ

Ускоряющий
U=-300 В

U=0



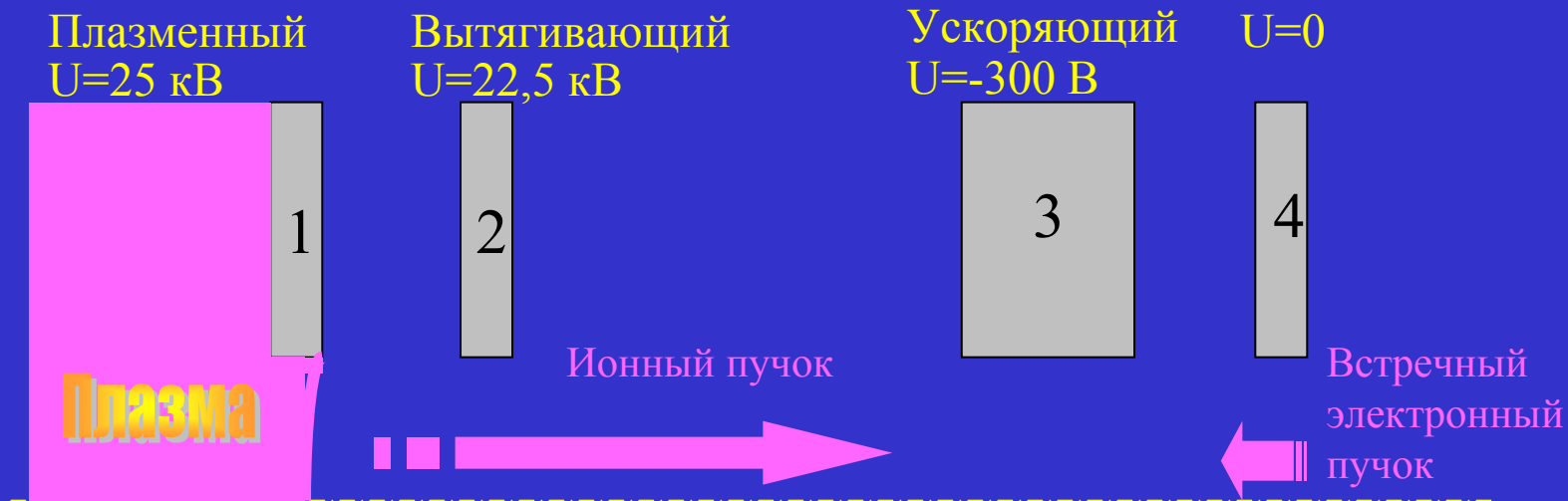
Влияние на расходимость пучка

Электростатических линз:

$$\alpha_l = \frac{r}{4U_0} \left(\frac{U_1 - U_2}{b} - \frac{\frac{U_1 - U_2}{b} - \frac{U_0 - U_1}{a}}{2\sqrt{1 - \frac{U_1}{U_0}}} \right)$$

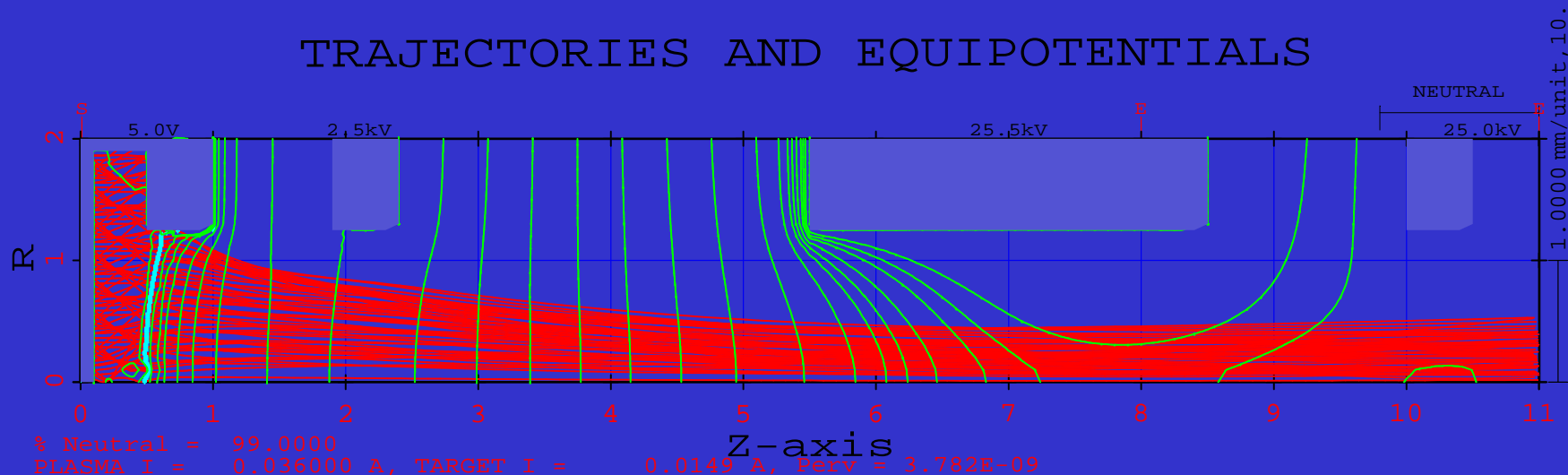
Пространственного заряда:

$$\alpha_{sp} \approx \frac{5 r I (a + b)}{U_0^{3/2} \sqrt{e / M}}$$



Расчет на PBGUNS: оптимальный ток для всей ИОС
55 – 60 А, минимальная расходимость ≈ 12 мрад

TRAJECTORIES AND EQUIPOTENTIALS



Управление параметрами пучка

Напряжение связано с ионным током по закону трех вторых $U \sim I^{2/3}$

Ток ионного пучка пропорционален плотности анодной плазмы $I \sim n_{pl}$

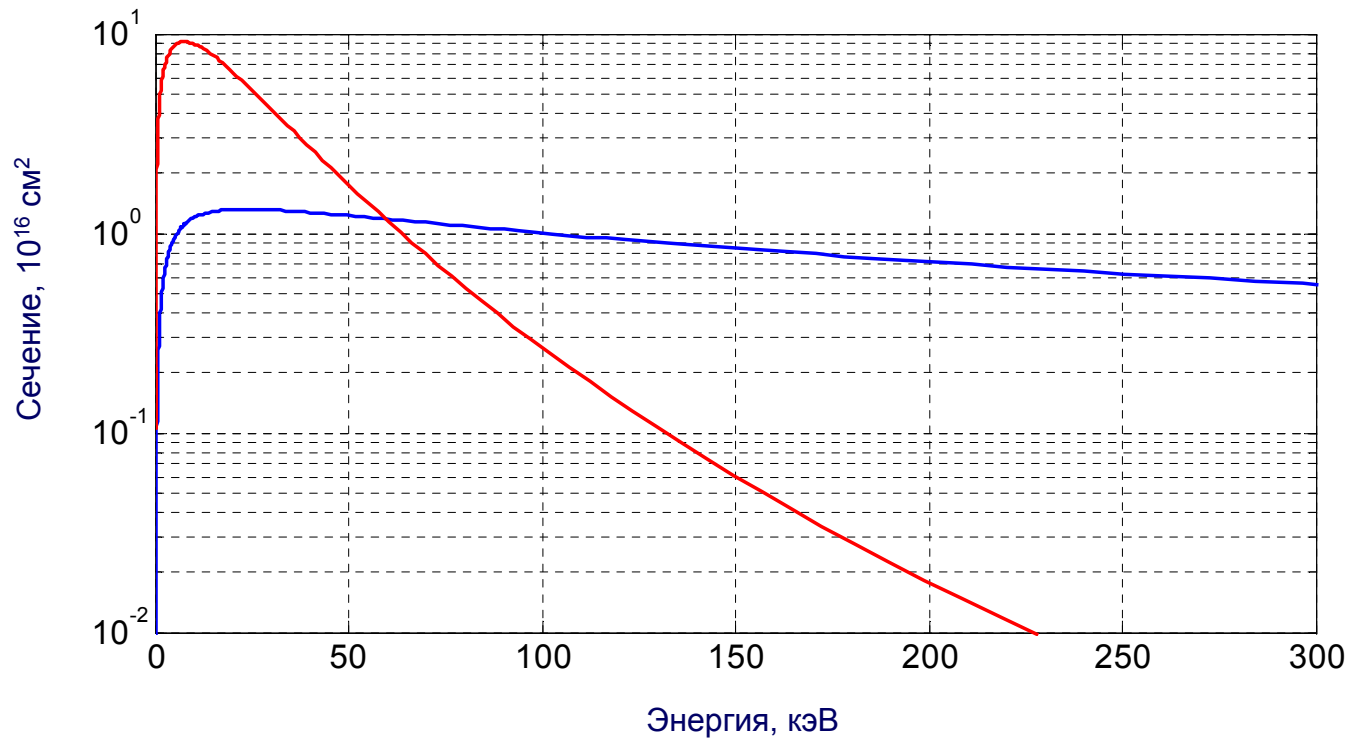
Плотность плазмы зависит от тока дуги и величины напуска газа

Нейтрализатор (газовая мишень)

Процессы в газовой мишени:

Перезарядка $H^+ + H_2 = H + H_2^+$

Ионизация $H + H_2 = H^+ + e + H_2$



Эффективность нейтрализации

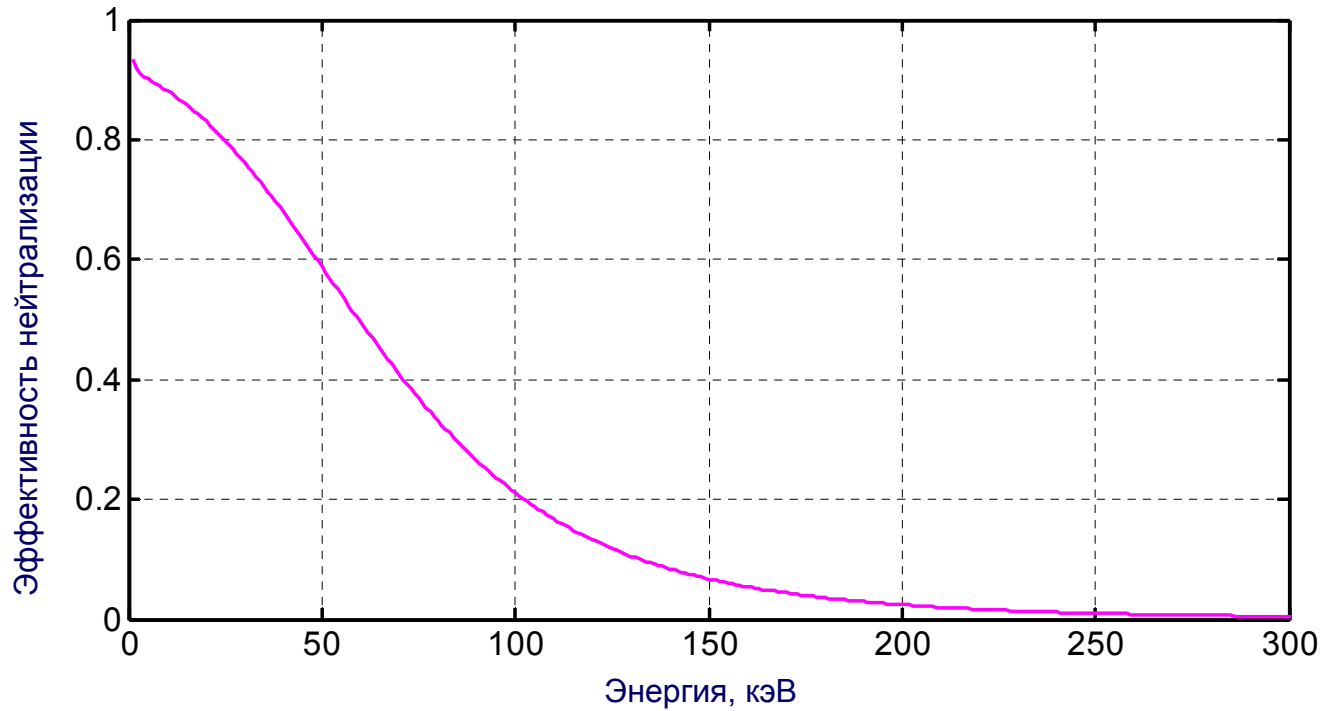
$$k = \frac{\sigma_{cx}}{\sigma_{cx} + \sigma_i}$$

Нейтрализатор (газовая мишень)

Процессы в газовой мишени:

Перезарядка $H^+ + H_2 = H + H_2^+$

Ионизация $H + H_2 = H^+ + e + H_2$



Эффективность нейтрализации $k = \frac{\sigma_{cx}}{\sigma_{cx} + \sigma_i}$

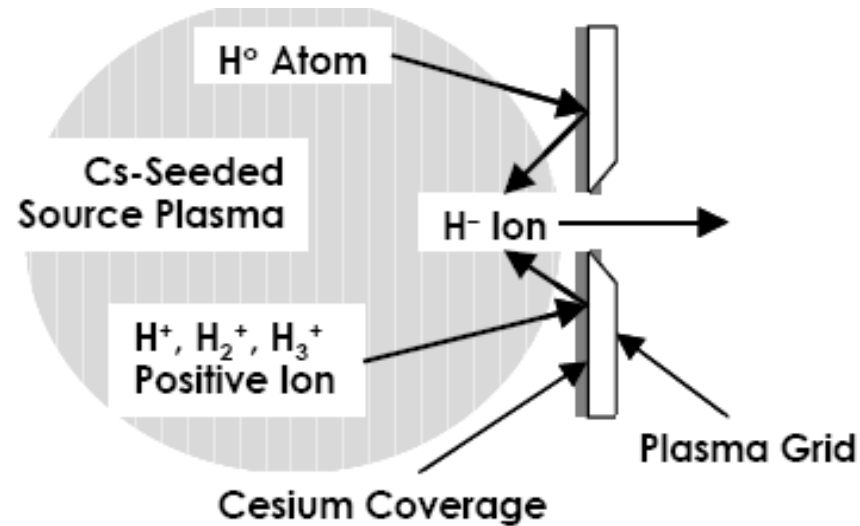
Инжекторы на основе отрицательных ионов

Энергия связи электрона в ионе H^- 0.75 эВ

Эффективность нейтрализации 90 – 70 %

Предпочтительны при энергии ионов больше 100 кэВ

Источники отрицательных ионов

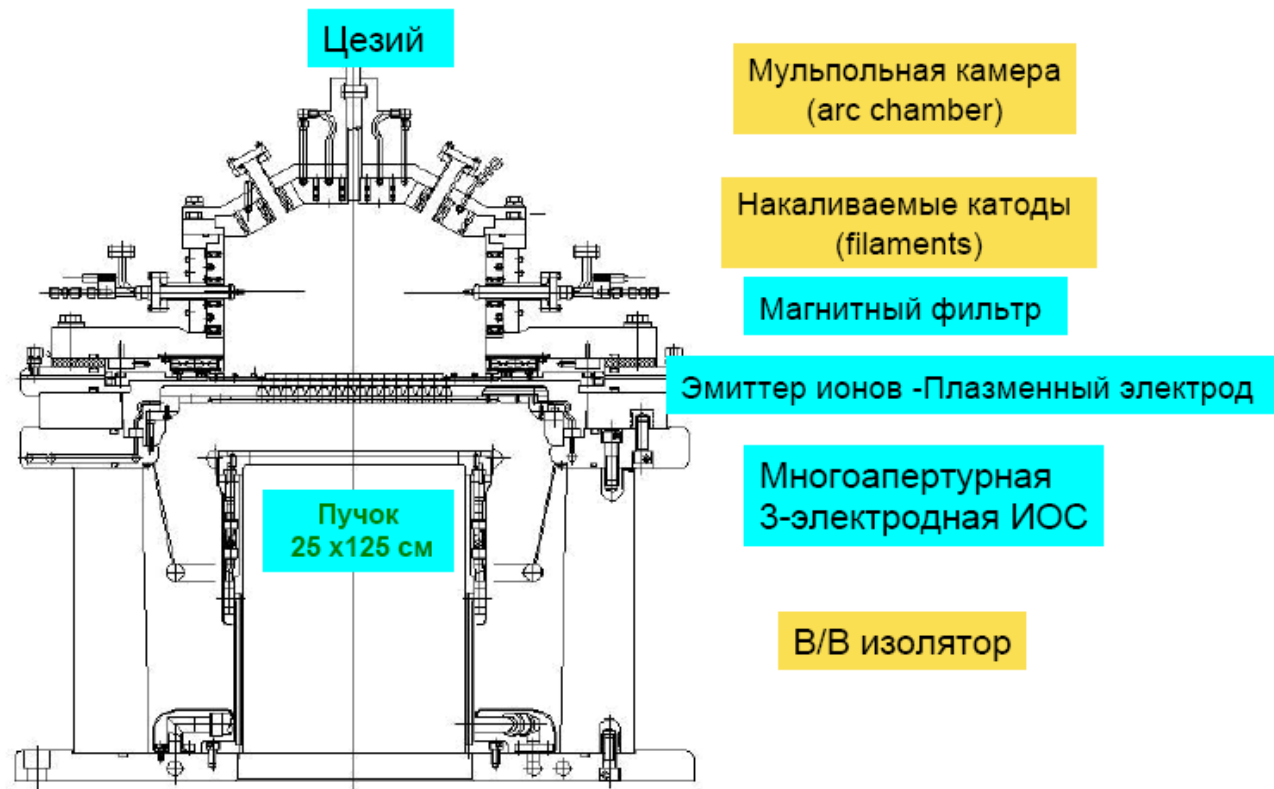
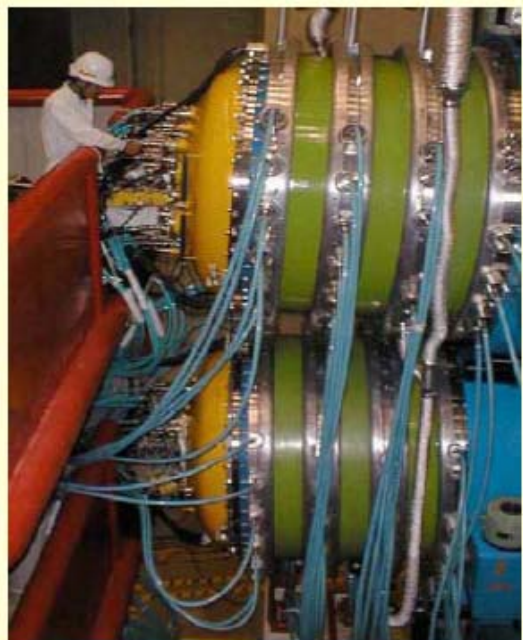


Отрицательные ионы образуются на поверхности покрытой цезием плазменной сетки

Источники отрицательных ионов для нагрева плазмы

		Проект	Получено	Разработка и сооружение	Работа
JT-60U JAERI	D-	0.5 МэВ 10 МВт 10 сек	0.4 МэВ 5.8 МВт 1сек 0.36 МэВ 1.5 МВт 25сек	1988-1996	1996- 2002
LHD NIFS	H-	180 кэВ 2 x 5 МВт 10 сек	174 -183 кэВ 13.1 МВт 1,6 с 86 кэВ / 0.8 МВт / 64с	1992-1998	1998- по наст. время
ITER	D-	1 МэВ 3 x 16.7 МВт 3600 сек	0.8 МэВ 140 mA 0.5сек	JAERI Cadarache Garching	

Источники отрицательных ионов для нагрева плазмы



Поперечное сечение источника Н- для LHD (BL-1)

Системы питания атомарных инжекторов

Напряжение 20-50 кВ

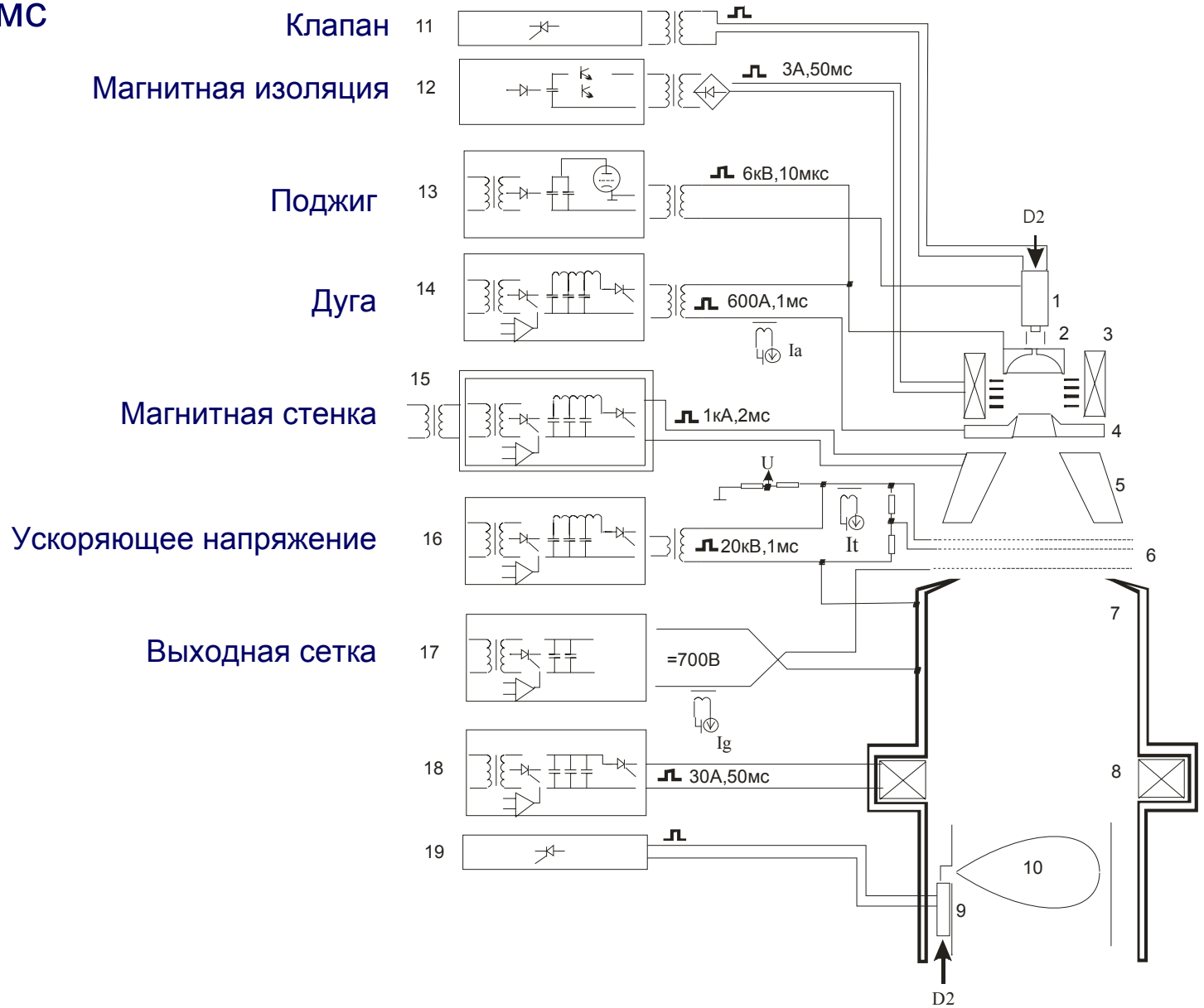
Ток 1-60 А

Длительность импульса 1 мс – 10 с

Ионный источник находится под высоким напряжением

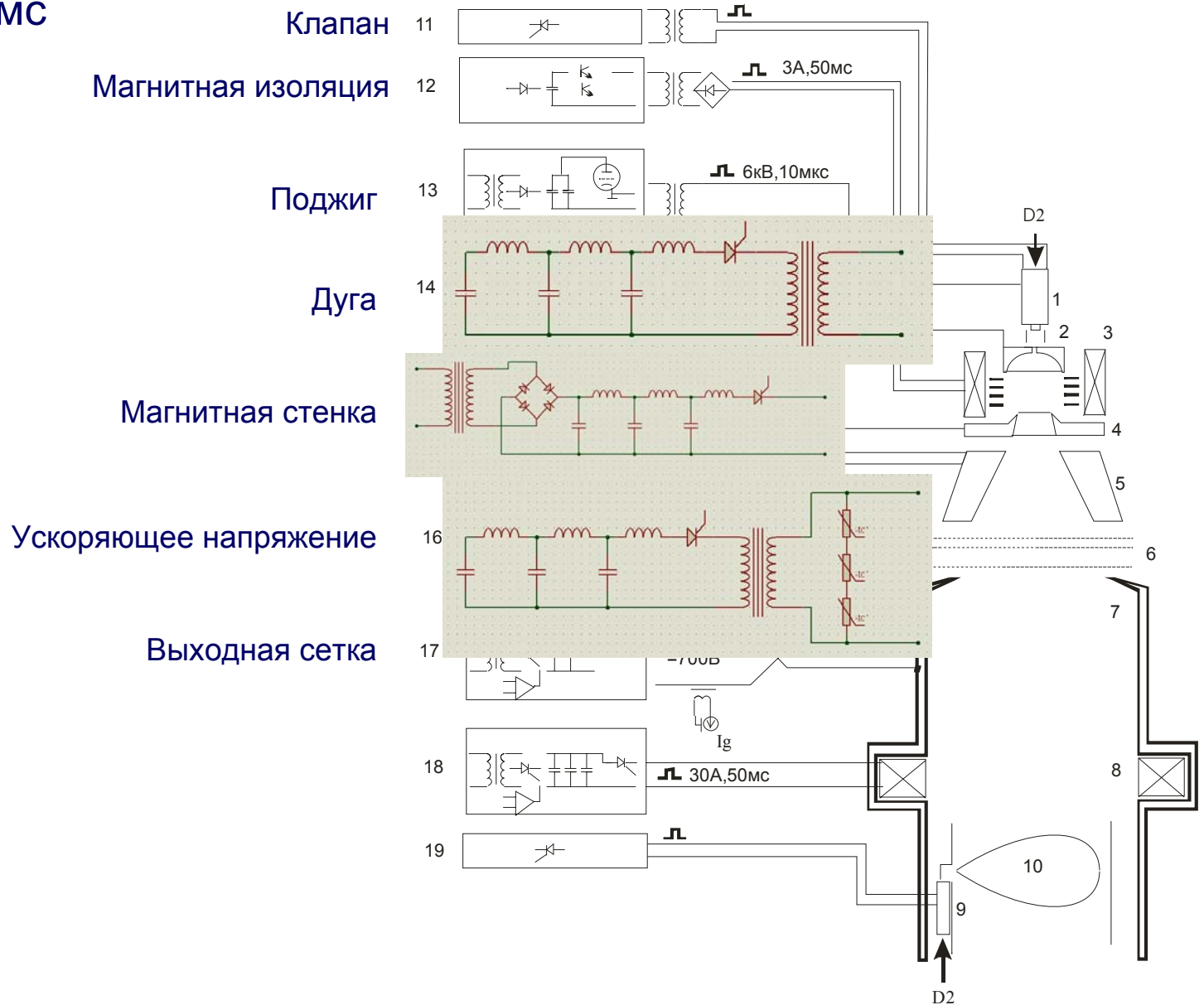
Система питания инжектора СТАРТ

25 кВ, 60 А, 5 мс

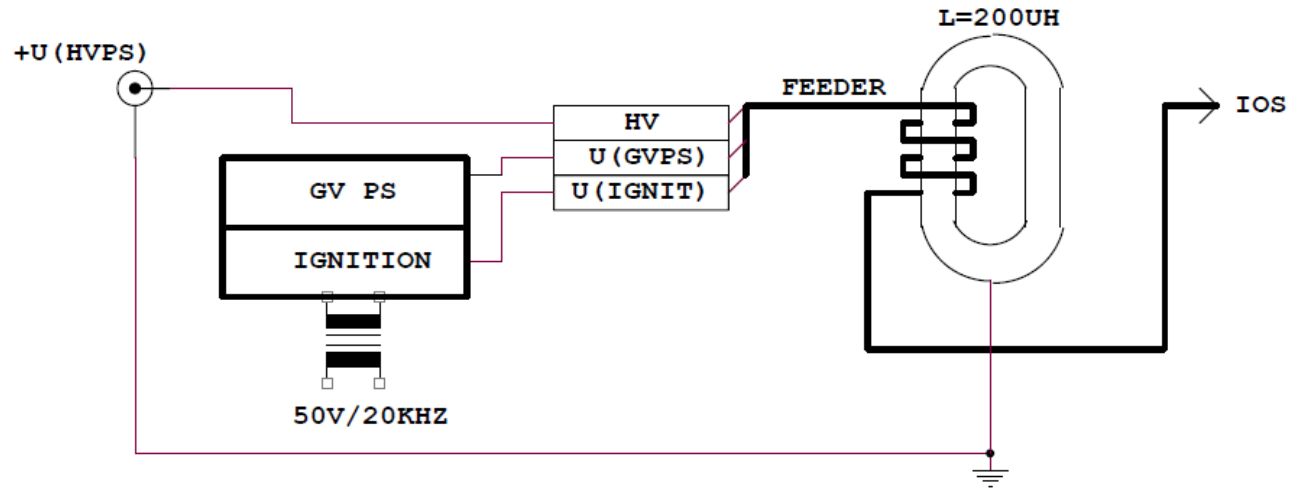


Система питания инжектора СТАРТ

25 кВ, 60 А, 5 мс



Защита от пробоев



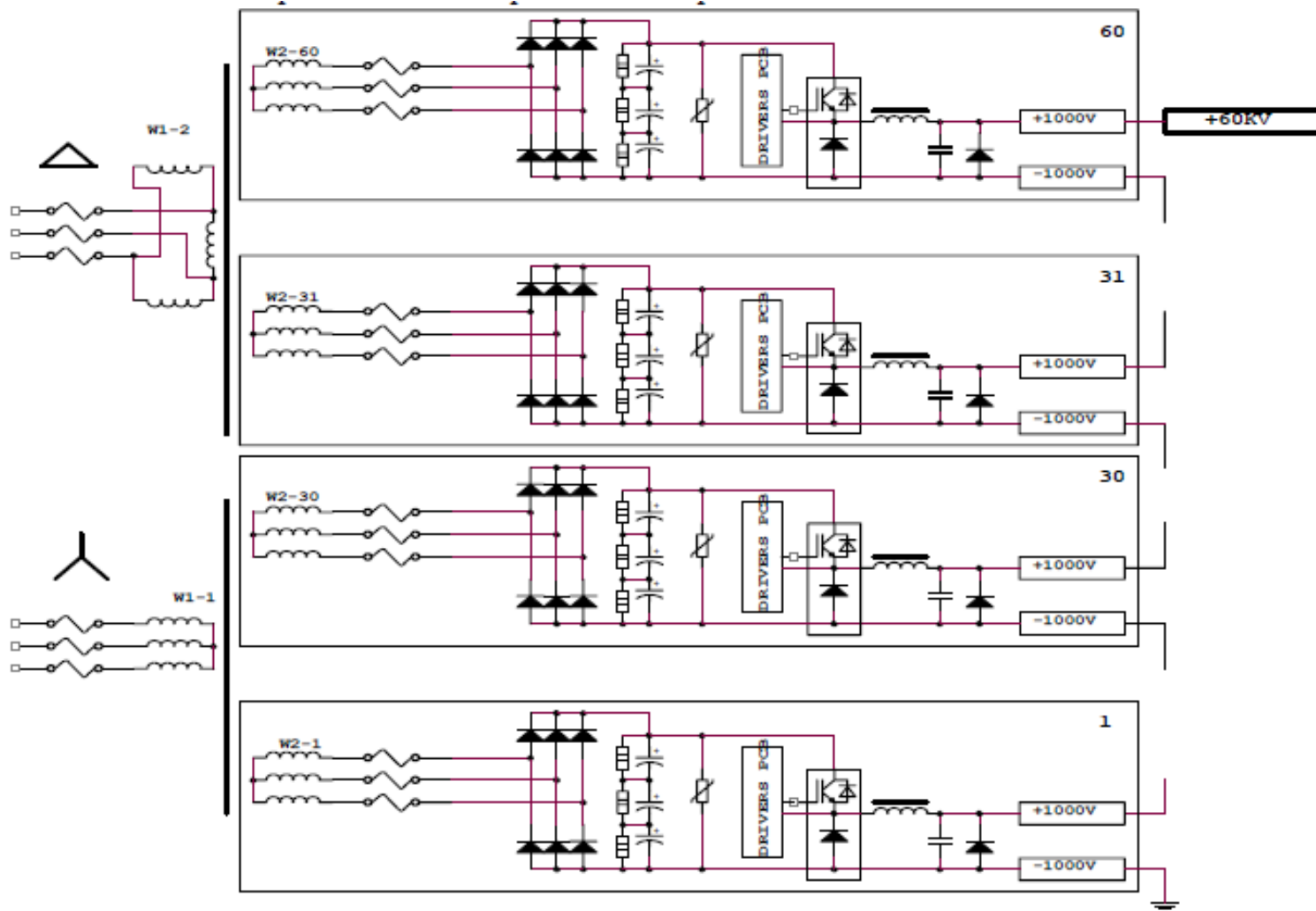
Ограничение энергии в пробое 1 Дж

- Быстрое закорачивание системы питания при пробое (кrouбар)
- Снаббер – индуктивность в цепи высокого напряжения



Система питания нагревного инжектора

40 кВ, 50 А, 1 с



Система питания нагревного инжектора

40 кВ, 50 А, 1 с

