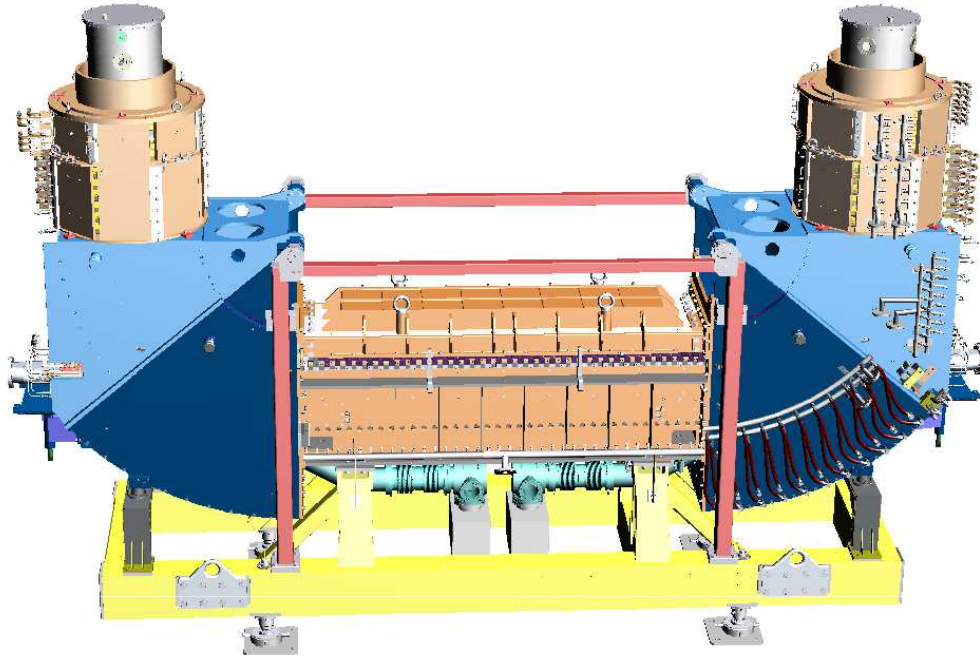


СЭО бустера

В. Рева, ИЯФ СО РАН; И.Мешков, ОИЯИ
и объединенная команда ОИЯИ ИЯФ

Рабочее совещание в ОИЯИ, г.Дубна
20 июня 2022



NICA Booster Electron Cooling System (ECS)

**Система охлаждения
для бустера NICA**



NICA Synchrotrons and their cooling systems

Evgeny Syresin on behalf of team (ESCOOL-2021)

ИЯФ СО РАН в рамках сотрудничества изготовил и поставил в Дубну систему электронного охлаждения для бустера NICA с параметрами энергии до 50 киловольт. В 2021 году в ОИЯИ было получено первое охлаждение на ионах железа. Ниже показан сигнал Шоттки спектрометра на 4-гармонике частоты обращения пропорциональный разбросу продольного импульса в ионном пучке. Видно, что за достаточно непродолжительное время ионный пучок охлаждается в продольном направлении.

Параметры эксперимента:

Тип ионов $^{56}\text{Fe}^{14+}$

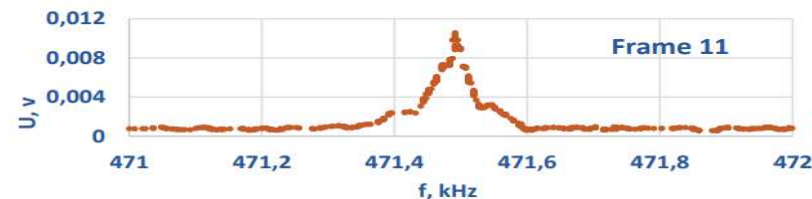
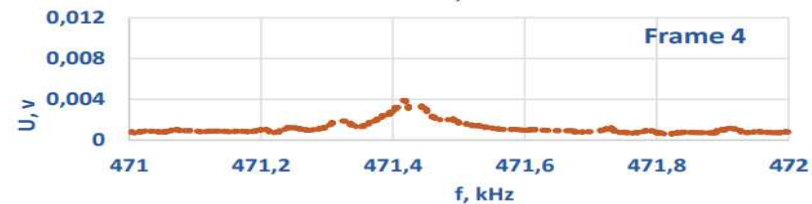
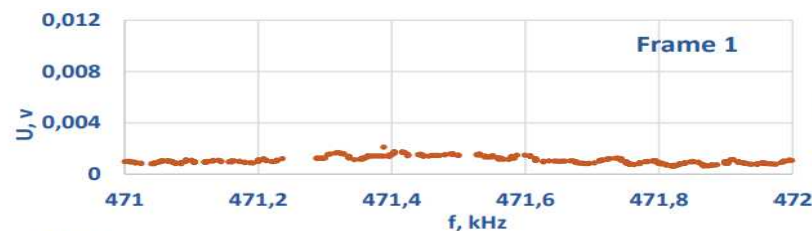
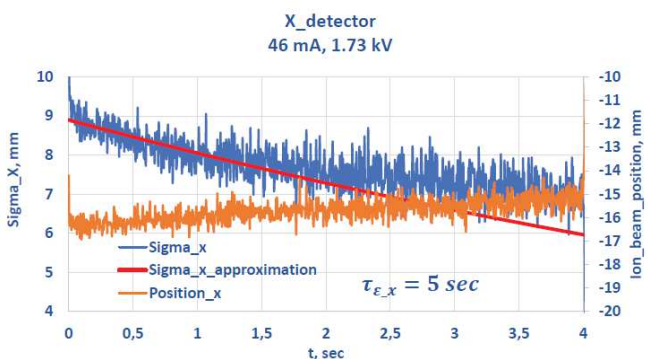
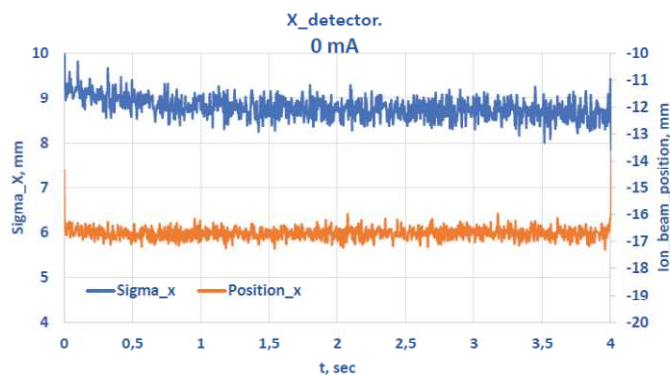
Энергия ионов 3.2 Mev/u

Энергия электронов 1.73 – 1.93 кэВ

Ток электронного пучка 0.02 – 0.13 А

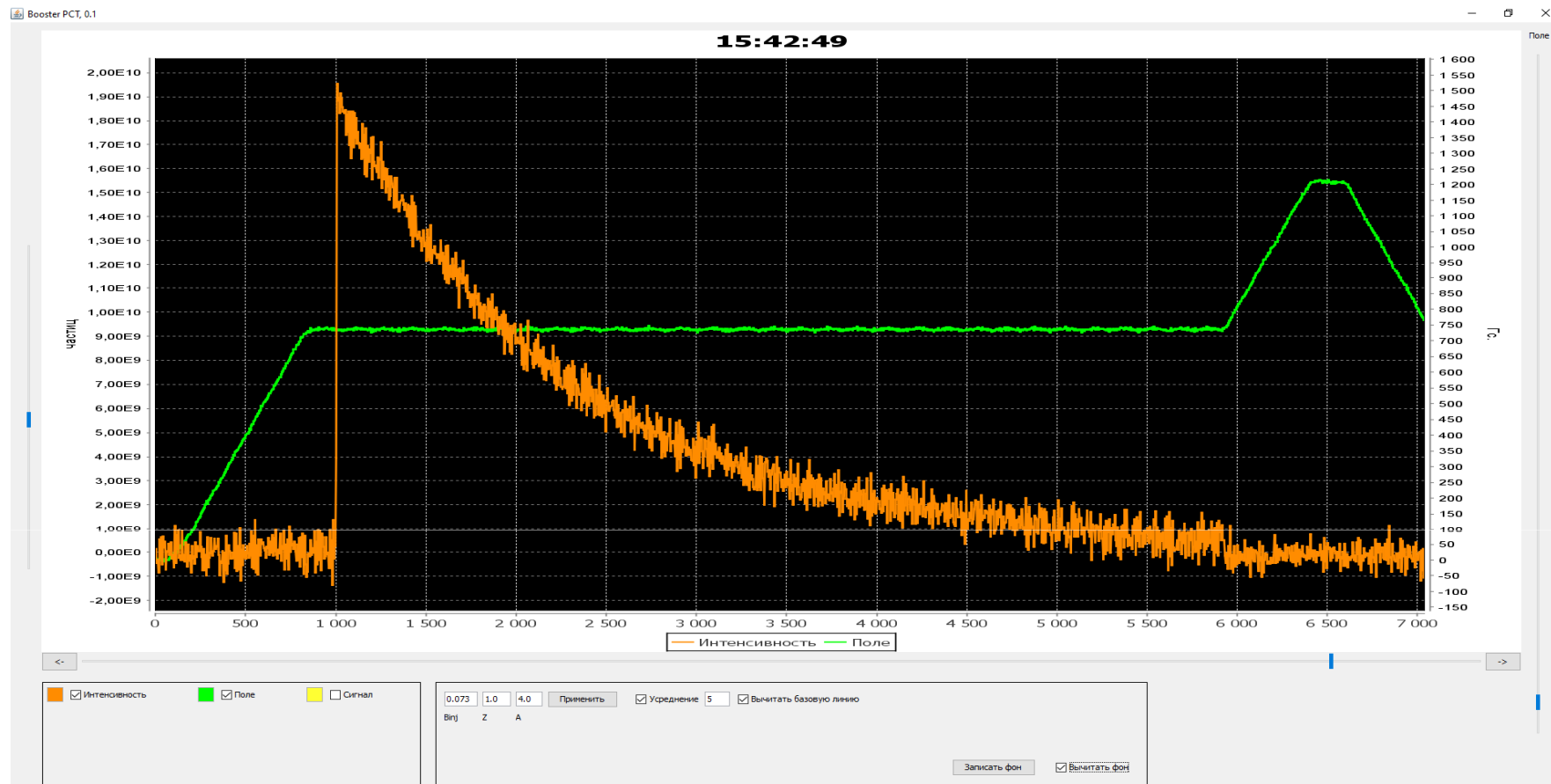
Диаметр электронного пучка 28 мм

Магнитное поле 700 Гс



Первые признаки электронного охлаждения в СЭО для бустера НИКА.

Результаты настройки Бустера 26.12 2020 (Мешков И.Н.).



Сигнал РСТ (Parametric Current Transformer) при циркуляции на столе МП на энергии инжекции (до $2 \cdot 10^{10}$ ppp). Потери пучка He^{1+} , 3.2МэВ/нуклон в течение 6 секунд позволяют сделать оценки интегрального давления в пучковой камере на уровне $2-3 \cdot 10^{-10}$ Торр (при условии определяющих давление атмосферных течей в камеру на теплых участках СЭО и ВЧ).

Оценки влияния вакуума

Потеря и приобретение электрона.

Н. Бор. Прохождение атомных частиц через вещество. М.:1950.

D. Dinev. Processes in high-energy heavy-ion acceleration. ЭЧАЯ, 2009, т.40, в.2, с.497-536.

B. Franzke. Vacuum requirements for heavy ion synchrotrons. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-28, No. 3, June 1981

Table I: Cross sections for electron capture σ_C and loss σ_L (in units of $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{molecule}$) for some charge states q and specific energies T of U- and Pb-ions incident on H_2 or N_2 . Errors range from $\pm 10\%$ up to $\pm 30\%$.

Формула Борна

$$\sigma_0 = 4\pi a_0^2 \frac{Z_t^2 + Z_i^2}{Z_i^2} \left(\frac{v_0}{v} \right)^2$$

$a_0 = 0.53 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-2}$ боровский радиус

$v_0 = \alpha c = 2.2 \cdot 10^8 \text{ cm/s}$ скорость электрона в атоме

$\alpha = 1/137$ постоянная тонкой структуры

Z_t заряд вещества через которую проходит частица

Z_i заряд частицы – текущий или будущий ?

v скорость заряженной частицы

Ion/Target	T(MeV/u)	σ_C	σ_L
Pb ⁺⁴⁰ / N ₂	5.9	0.13	0.16
Pb ⁺⁵⁵ / N ₂	5.9	0.22	0.086
U ⁺⁴⁰ / H ₂	7.80	0.012	0.001
U ⁺⁶³ / H ₂	10.00	0.0036	0.0016
U ⁺⁶³ / N ₂	10.00	0.16	0.080

σ_{0_i} и $\sigma_{0_{i+1}}$ попытка подогнать под формулу Бора с разными трактовками значения i

Энергия MeV/u	частица 0	частица 1	вещество	σ 10^{-16} cm^{-2}	σ_{0_i} 10^{-16} cm^{-2}	$\sigma_{0_{i+1}}$ 10^{-16} cm^{-2}
2.1	He ¹⁺	He ²⁺	He ($Z_t=2$)	0.044	0.25	0.063
2.1	He ¹⁺	He ²⁺	N ₂ ($Z_t=7$)	0.21	2.35	0.59
2.1	He ¹⁺	He ²⁺	Ar ($Z_t=18$)	0.48	14	3.59
0.334	He ¹⁺	He ⁰	He ($Z_t=2$)	0.018		
0.334	He ¹⁺	He ⁰	N ₂ ($Z_t=7$)	0.017		
0.334	He ¹⁺	He ⁰	Ar ($Z_t=18$)	0.018		

И.С.Дмитриев, Я.А. Теплова, Ю.А. Белкова, Н.В. Новиков, Ю.А. Файнберг
 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ ПОТЕРИ И ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ В ИОН –
 АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ
 Препринт НИИЯФ МГУ No 2008-2/838

Видно, что для однозарядного гелия наиболее вероятно погибнуть потеряв свой второй электрон. Сечение перезарядки в нейтральный атом мало при энергии 0.33 МэВ и, из общих соображений, будет падать с ростом энергии.

Так как расхождение с формулой Бора достаточно большое (или автор не достаточно корректно ее использует), то возникает желание пересчитать экспериментальные значения под нужную энергию и сорт ионов

Энергия MeV/u	частица 0	частица 1	вещество	σ 10^{-16} cm^{-2}	Life-time, τ (s) 10^{-10} mbar
3.2	He ¹⁺	He ²⁺	H ₂ (Z _t =1)	0.01	156
3.2	He ¹⁺	He ²⁺	He (Z _t =2)	0.03	52
3.2	He ¹⁺	He ²⁺	N ₂ (Z _t =7)	0.14	11
3.2	He ¹⁺	He ²⁺	Ar (Z _t =18)	0.32	4.8

$$\tau = \frac{1}{n_a \beta c \sigma}$$

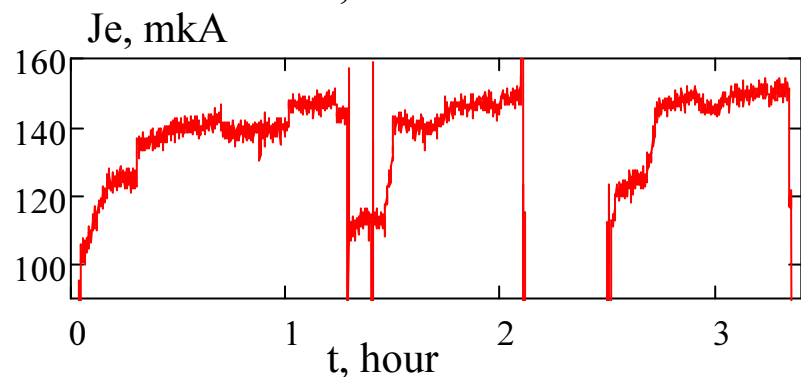
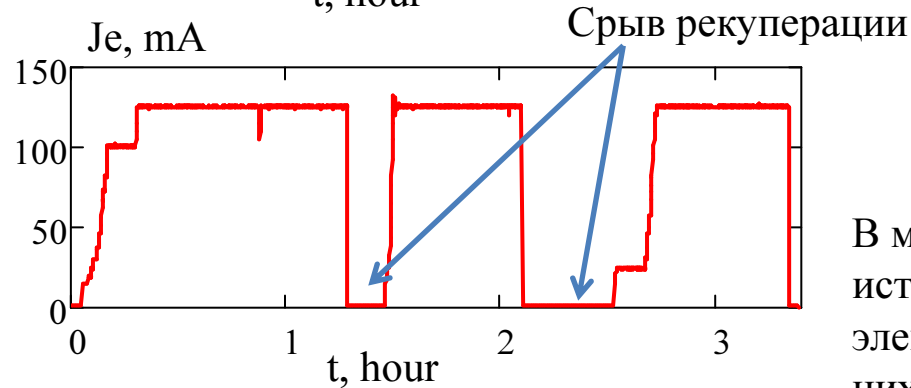
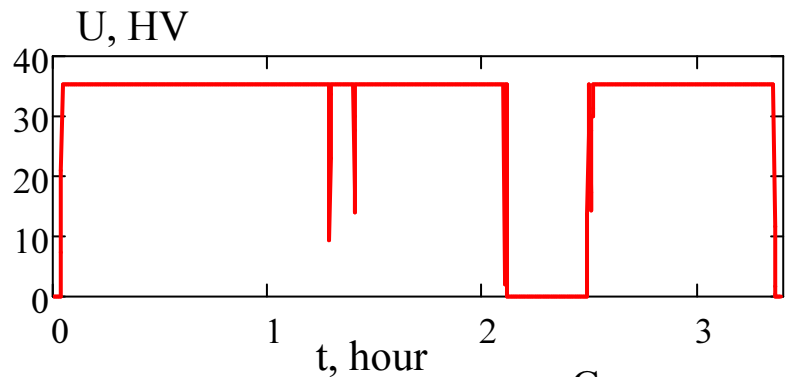
Во время запуска СЭО вакуум в теплом промежутке достигал значения 10^{-11} mbar , что должно давать долгое время жизни при любом сортовом составе остаточного газа (тем более, что здесь не учтена длина СЭО как доля периметра от кольца).

Но если считать, что вакуумные условия определяют время жизни, то, наверно, для экспериментов по охлаждению He²⁺ - был бы предпочтительнее, так как время жизни связанное с потерей электронов исчезнет (нечего терять). Появится время жизни по перезарядке, но скорей всего существенно что-то оно не испортит.

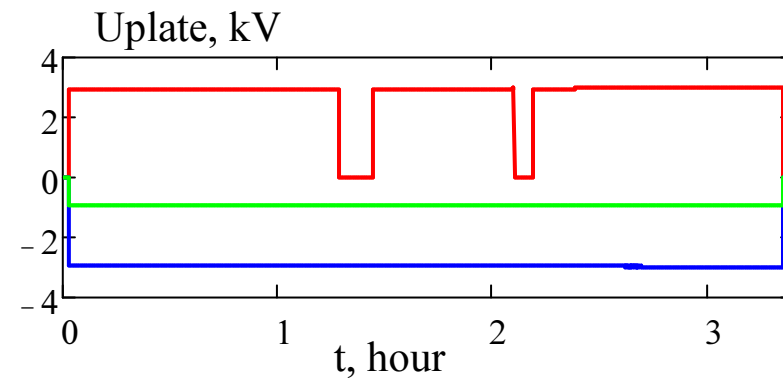
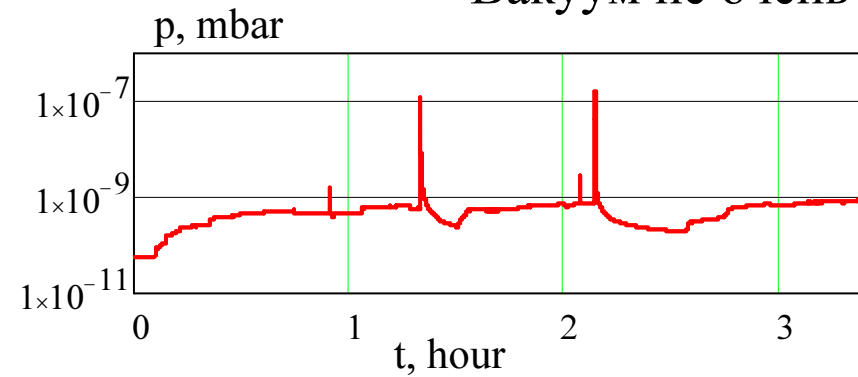
А сила трения существенно возрастет.

Рекуперация на высокой энергии СЭО для бустера

08.04.2022

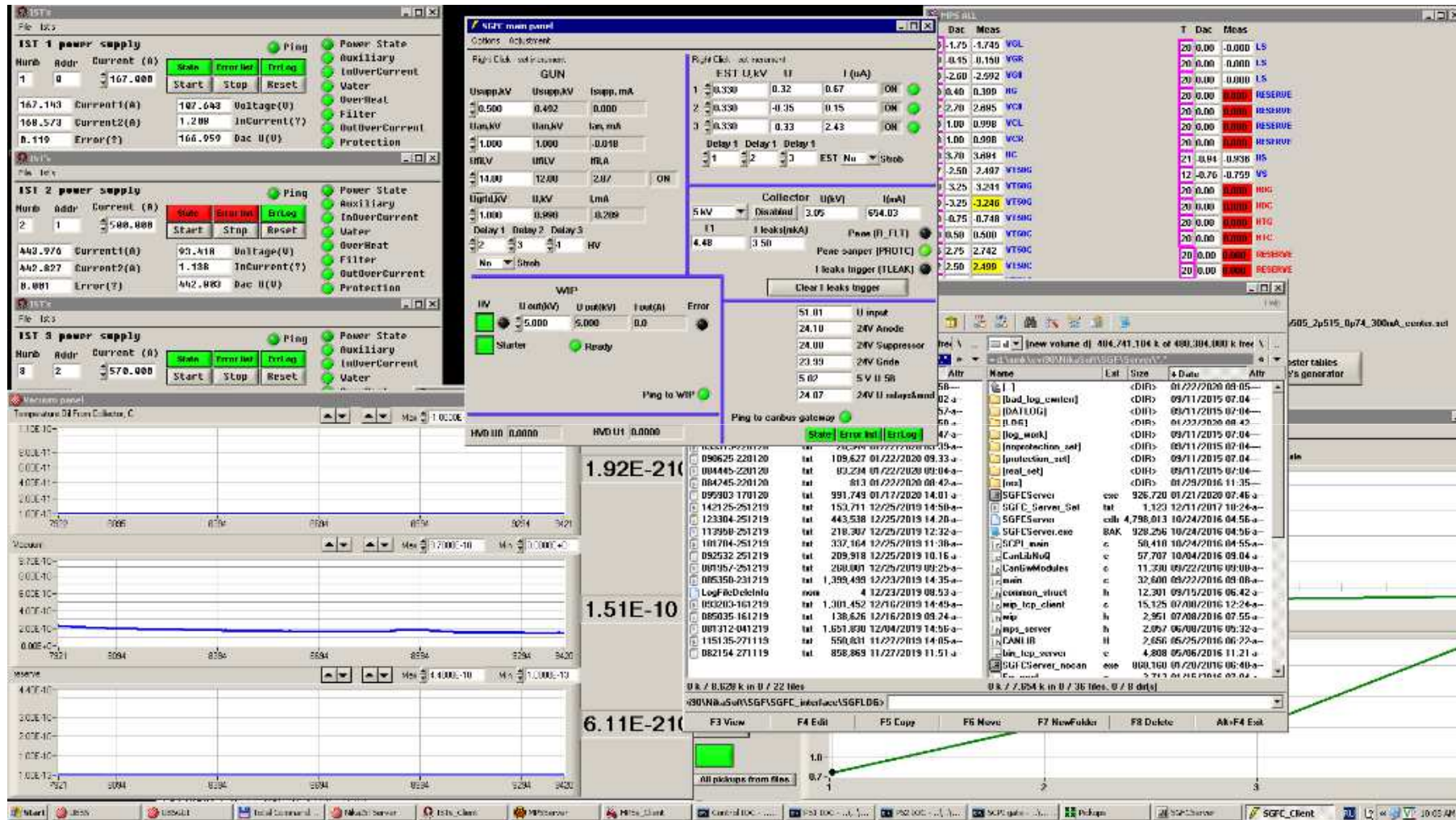


Вакуум не очень



В момент срыва рекуперации выключаются источники питания положительных пластин электростатического поворота, так как именно на них летит основной ток. Ток потерь в стабильном состоянии можно оценить как 40 мкА (разница между случаями когда ток электронов есть и когда нет). Для полного тока пучка 130 мА, коэффициент рекуперации $3 \cdot 10^{-4}$, что не очень хорошо. Нужно потратить время и попытаться получше настроить прохождение пучка. Тогда и проблем с выключением электростатических пластин может стать меньше.

Рекуперация на низкой энергии СЭО для бустера



Вакуум достаточно хороший

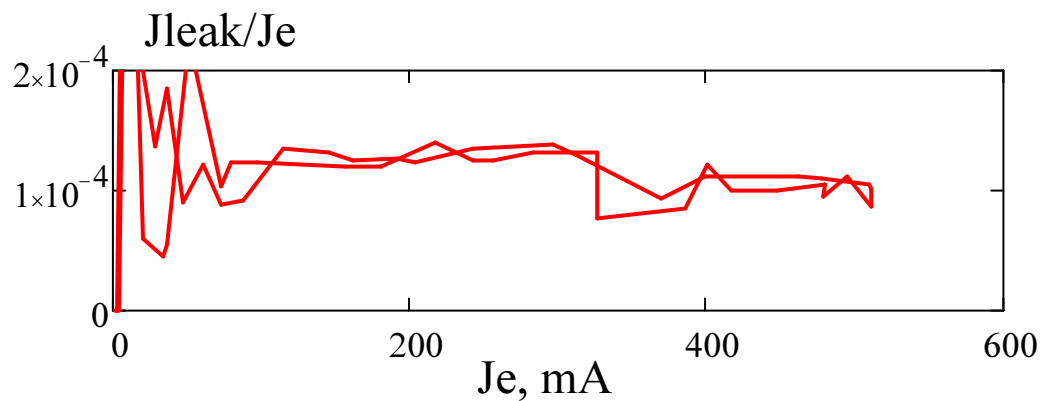
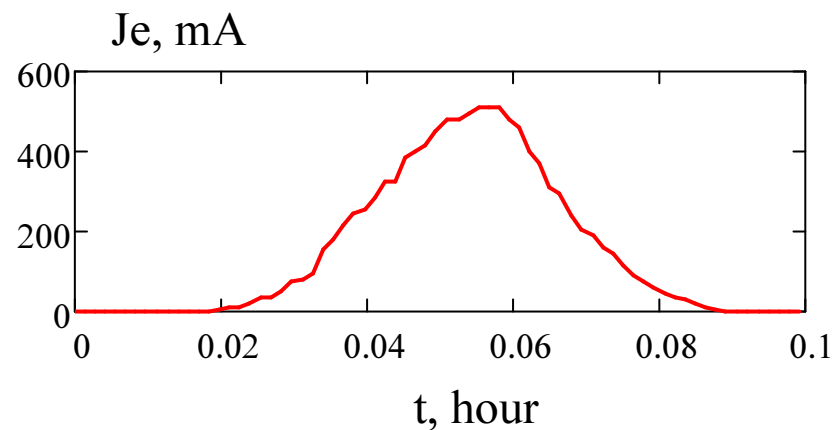
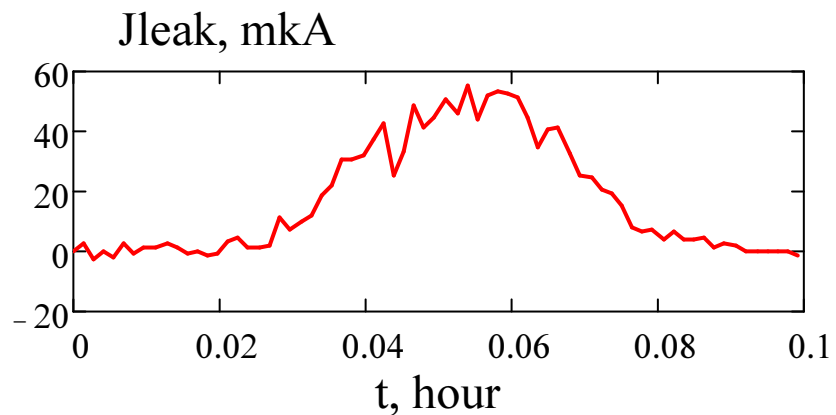
$J_e = 650 \text{ mA}$

5kV_600_mA_22012020_1504.bmp

Рекуперация на высокой энергии СЭО для бустера

$E_e=35$ keV, $EST=2.93$ kV

IST1/2/3=123/361/470

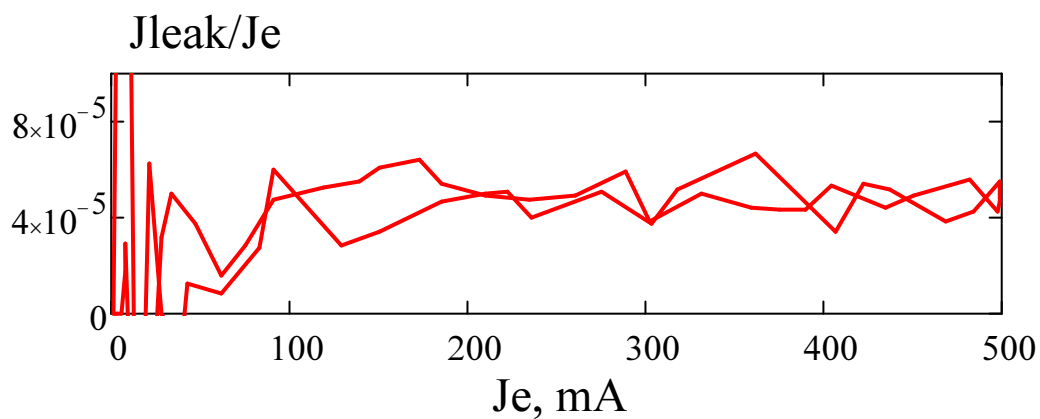
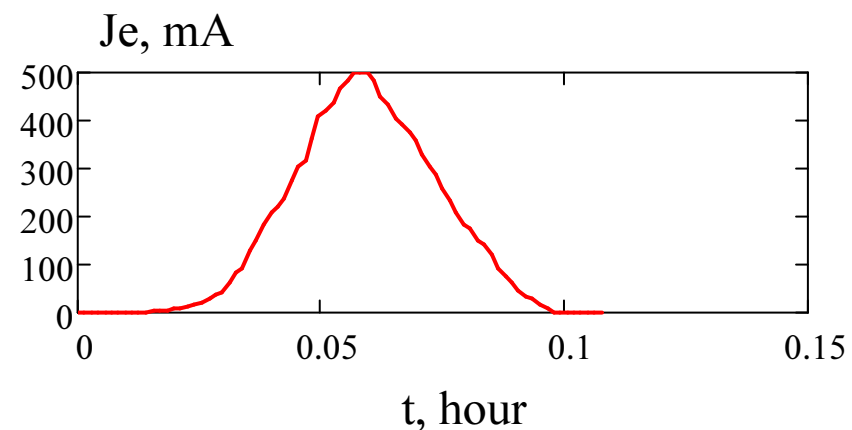
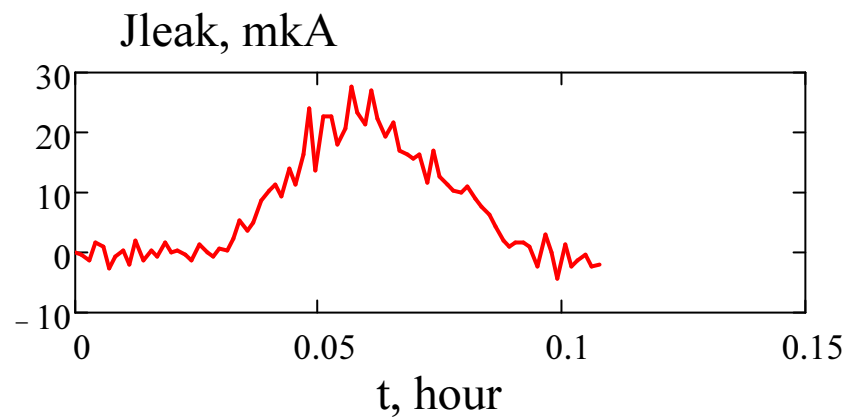


"152954-270422.txt"

Рекуперация на высокой энергии СЭО для бустера

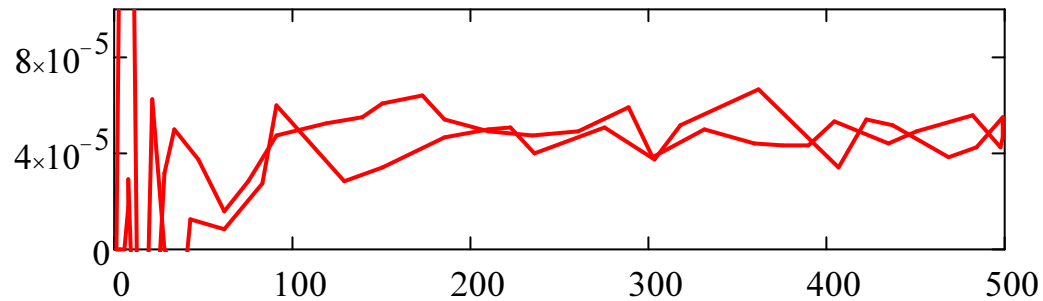
$E_e=30$ keV, $EST=2.5$ kV

IST1/2/3=123/361/470

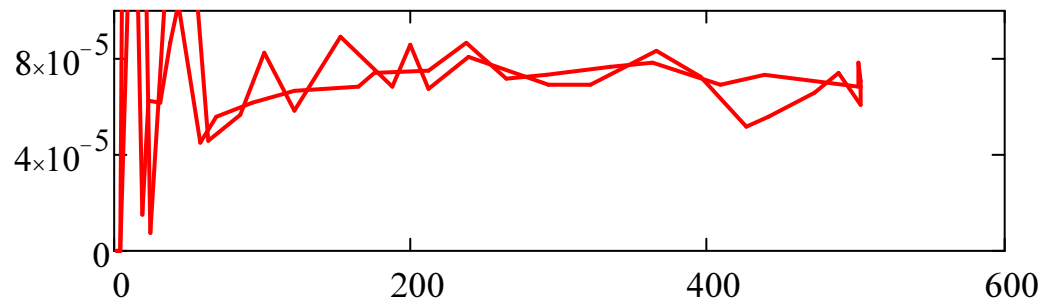


"132624-270422.txt"

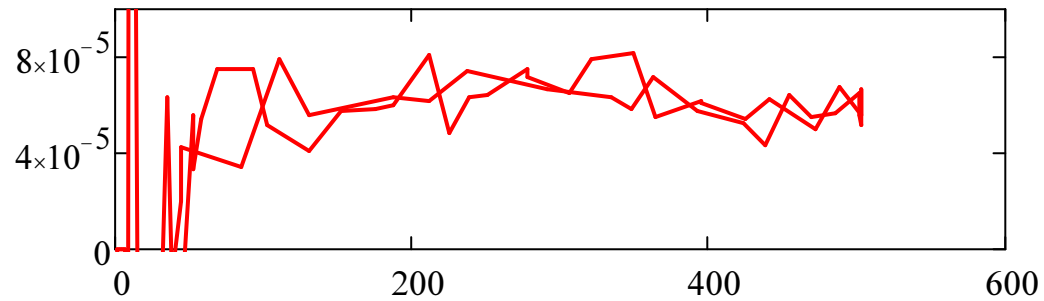
Чувствительность к значениям напряжения на электростатических пластинах



$E_e=25 \text{ keV}$, $EST=2.04 \text{ kV}$
"132624-270422.txt"



$E_e=25 \text{ keV}$, $EST=2.05 \text{ kV}$
"134234-270422.txt"

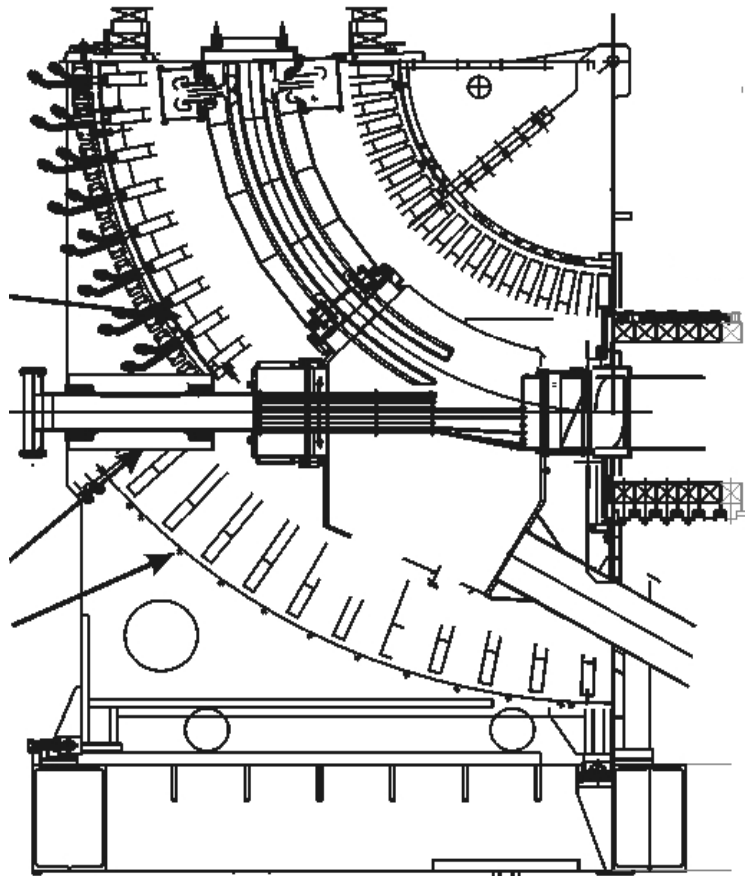


$E_e=25 \text{ keV}$, $EST=2.06 \text{ kV}$
"135617-270422.txt"

Electrostatic bending for compensation drift electrons

$$F = \frac{mV^2}{R} = eE + e \frac{[V \times B]}{c} = \text{const}$$

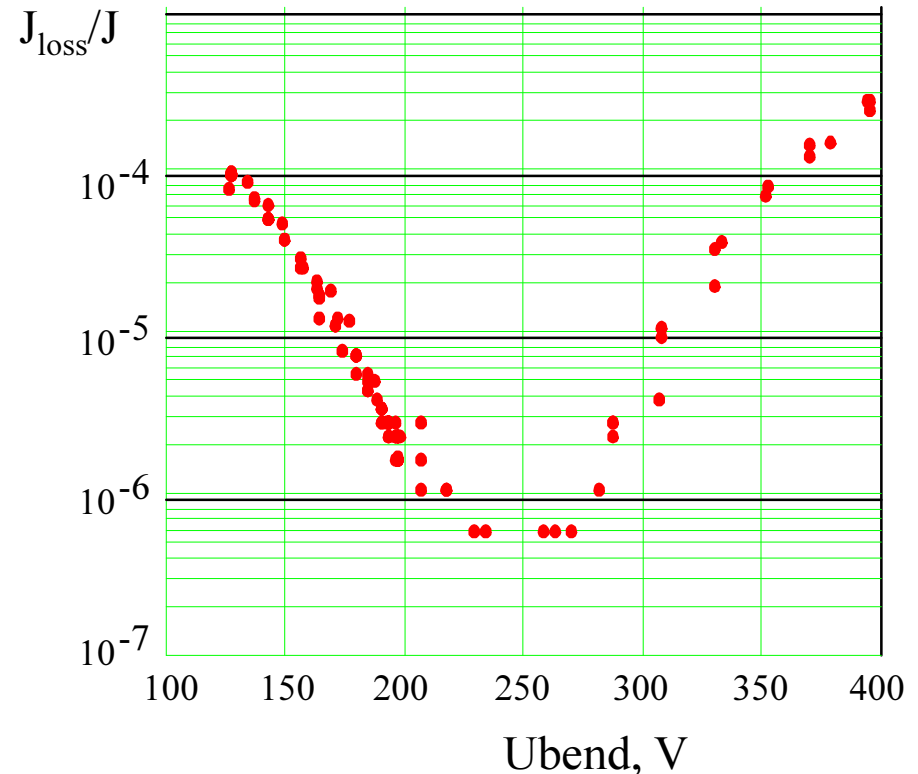
Gun (or collector)



small leakage current means a good vacuum

$E=0$ magnet bending $B=pc/eR$

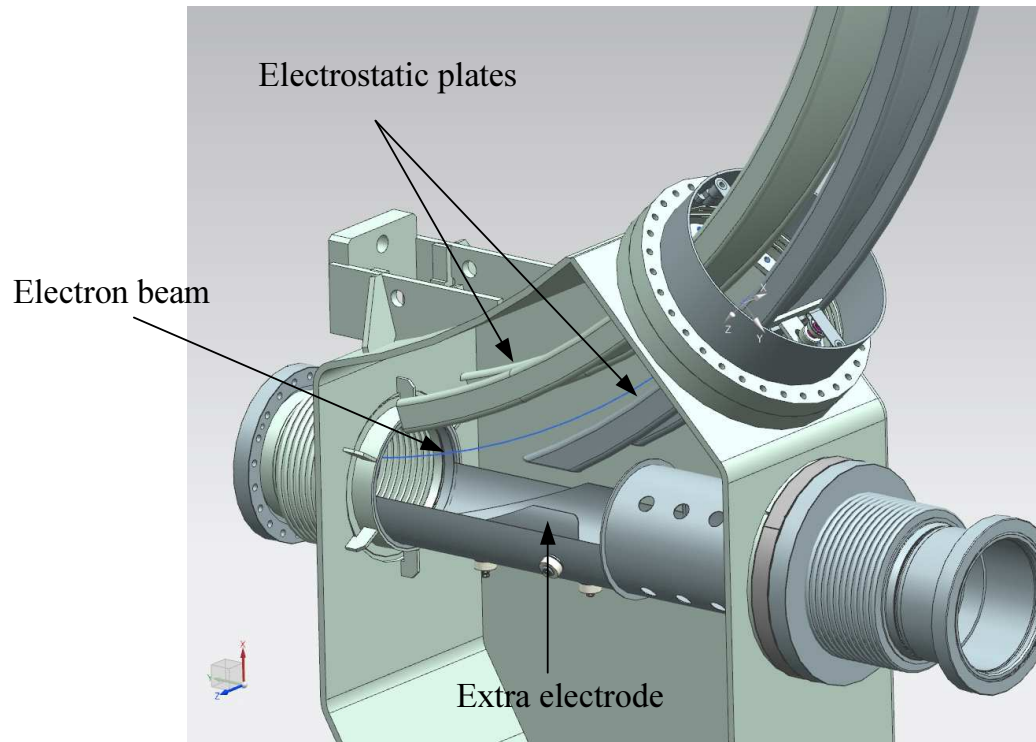
$B=0$ electrostatic bending $E=pV/eR$



0 - voltage is magnet field bending,
250 V- pure electrostatic bending.

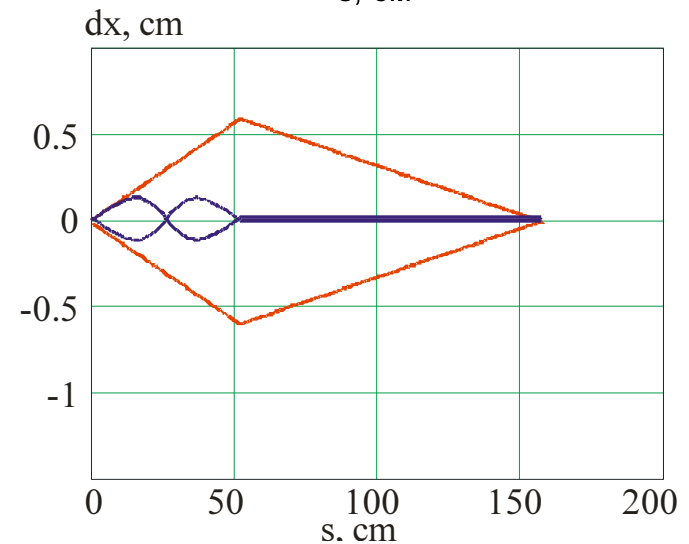
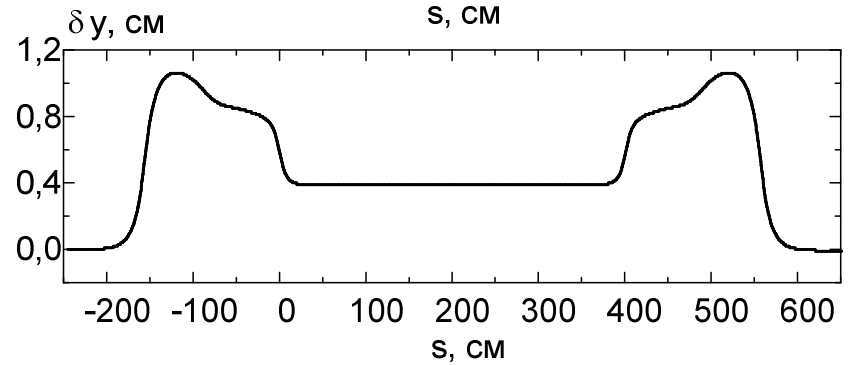
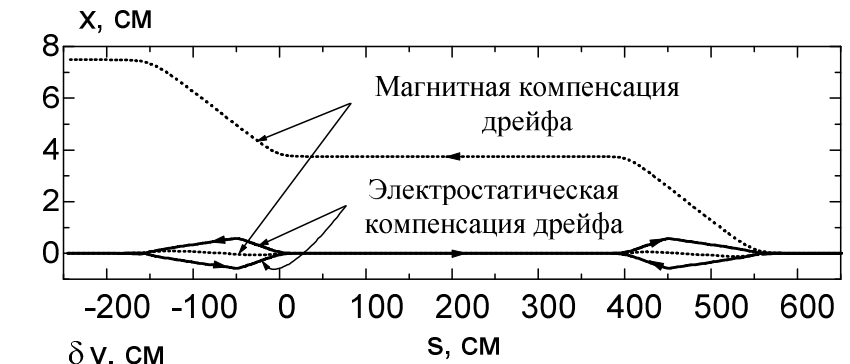
we keep position of electron beam the same increasing voltage and decreasing magnet field

Electrostatic bending with an extra electrode



Up to 12kV voltage applied to electrode

Main goal is reducing transverse shift of the rejected electrons for improving of the recuperation coefficient

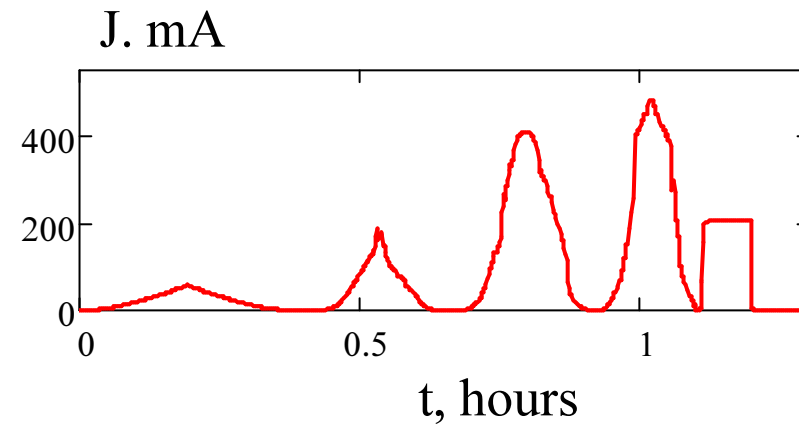
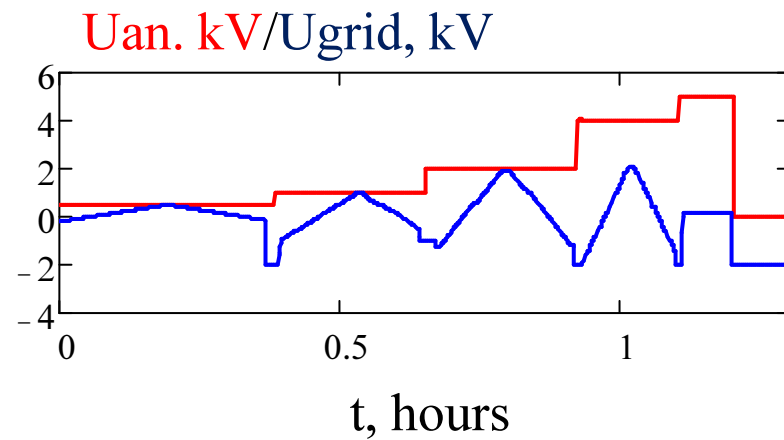


Experience BINP "164707-240516.txt"

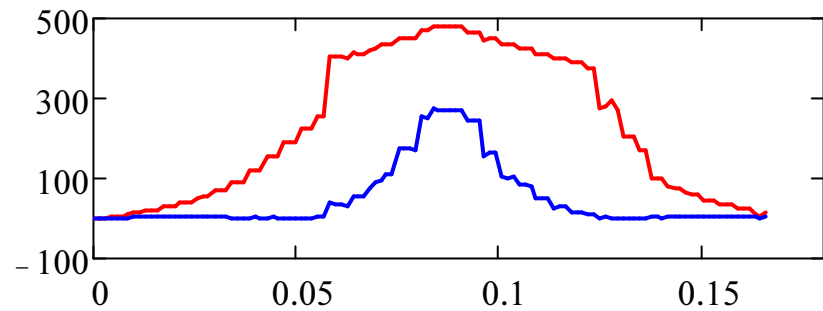
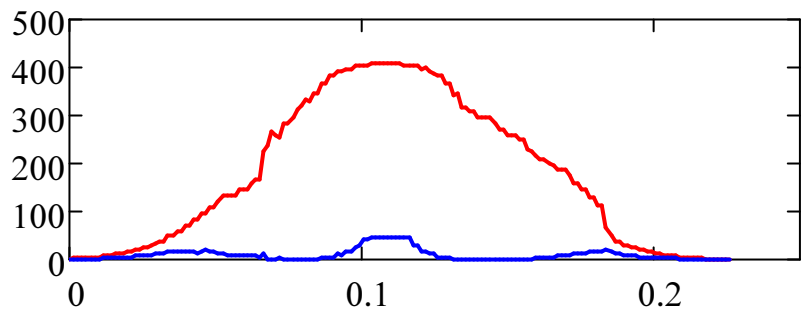
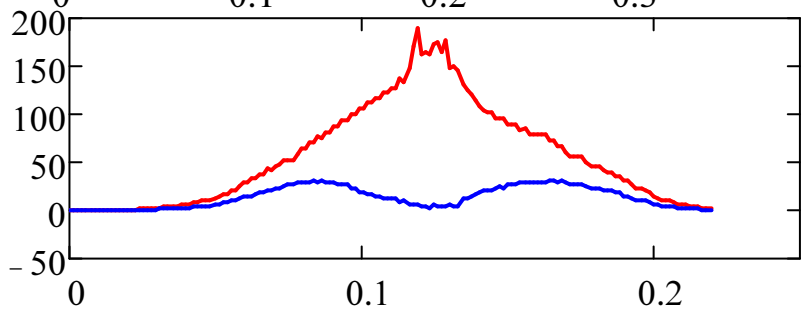
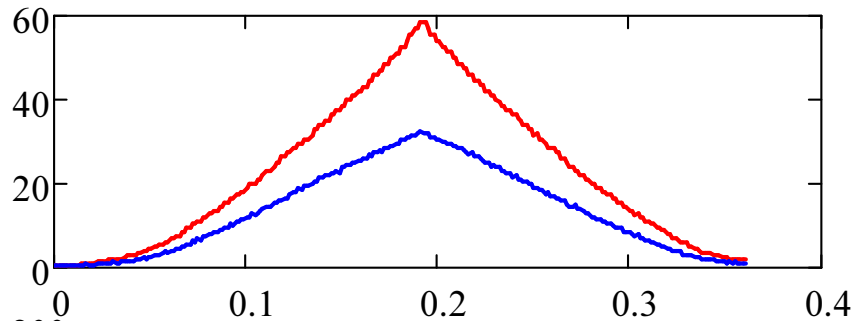
Напряжение катода – нет прямых данных, но судя по напряжению электростатических пластин 5 кВ.

$U_{el\ plate} = \pm 0.4\text{ кВ}$

$U_{sup} = 0.5\text{ кВ}$



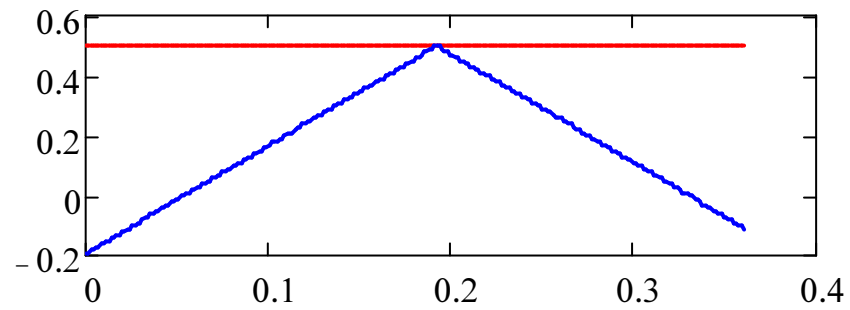
J. mA/Jleak, mA



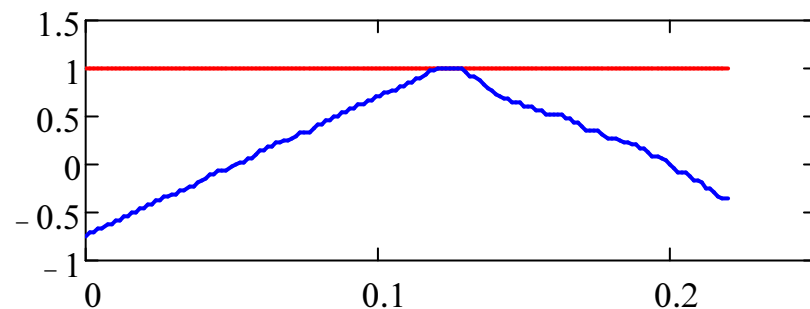
t , hours

Uan. kV/Ugrid, kV

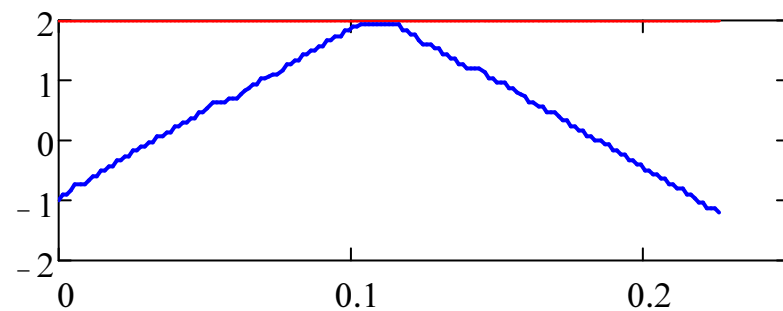
var1



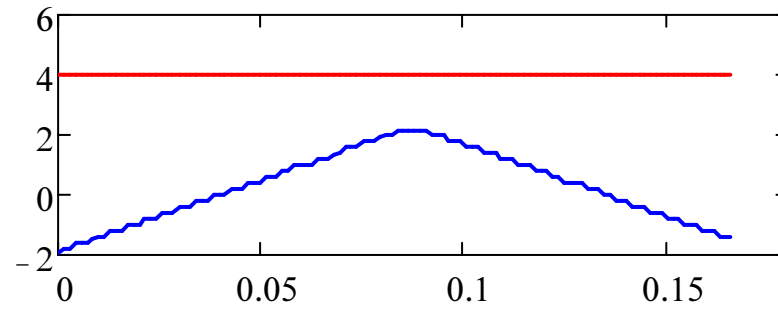
var2



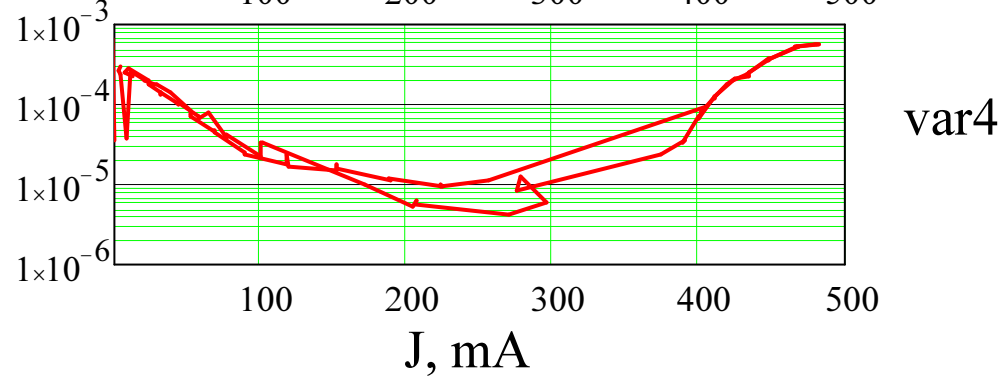
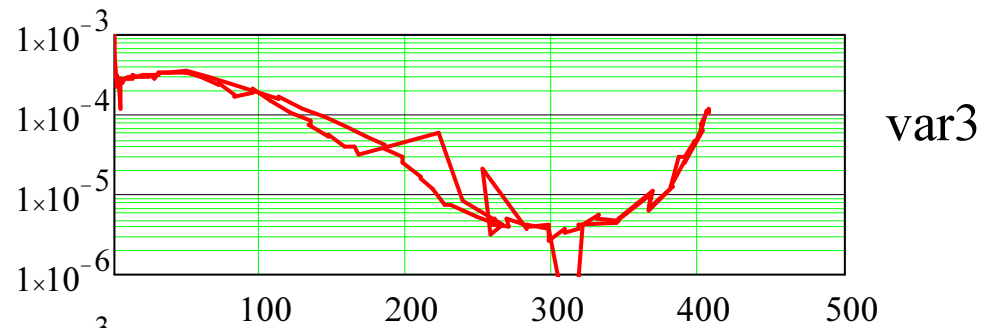
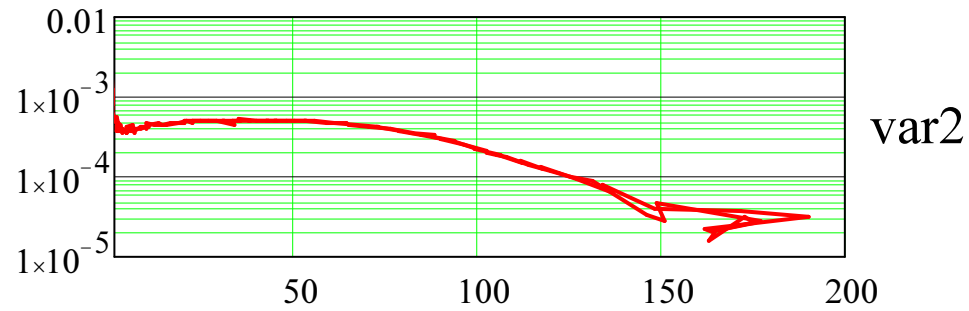
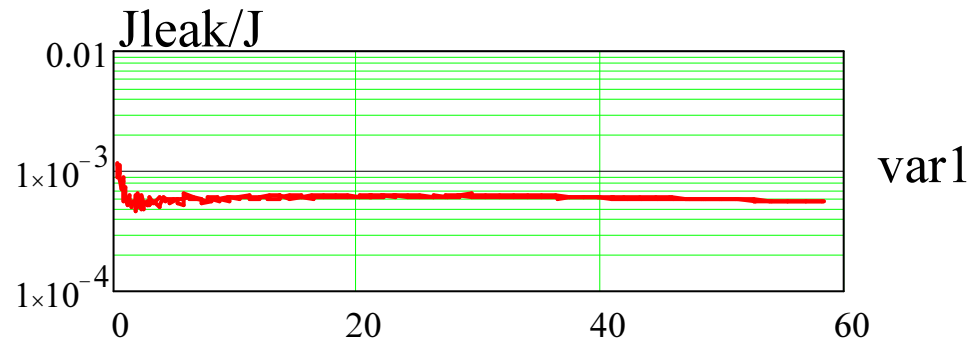
var3

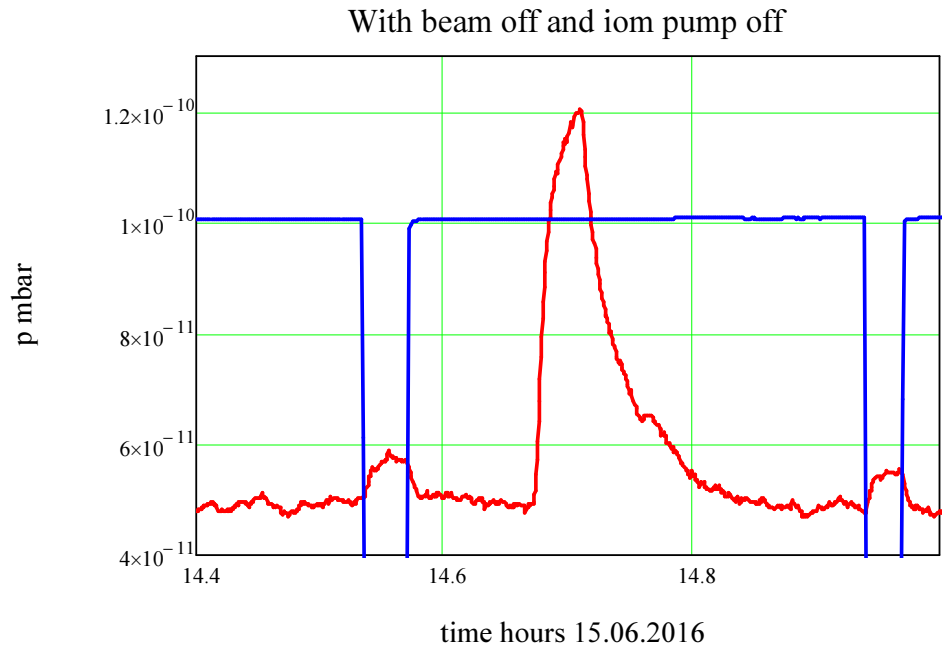


var4



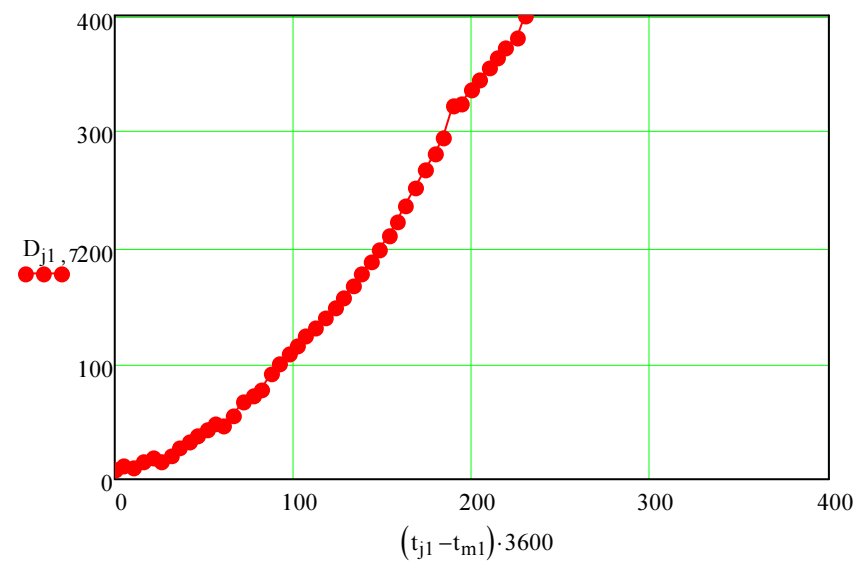
t , hours



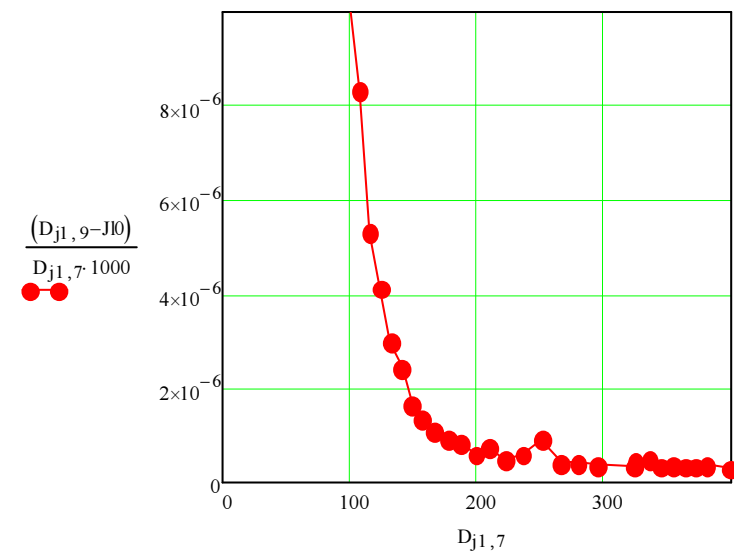


— pressure mbar
— JemA/3E12

Основная откачка NEG и титановые испарители.



Поднятие электронного тока во времени при измерении первеанса



Уменьшение относительных потерь тока пучка. Достигнута рекуперация лучше чем 10^{-6}

Спасибо за внимание