

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСА ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ «ОНИКС»

Д. Юров, НИИЯФ МГУ, ЛЭУ МГУ

1. Введение. Комплекс лучевой терапии «Оникс». Назначение, основные параметры.

2. Измерение характеристик пучка на стенде в НИИЯФ МГУ.

3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

4. Текущее состояние дел по проекту. Дальнейшие планы.

1. Введение. Комплекс лучевой терапии «Оникс».

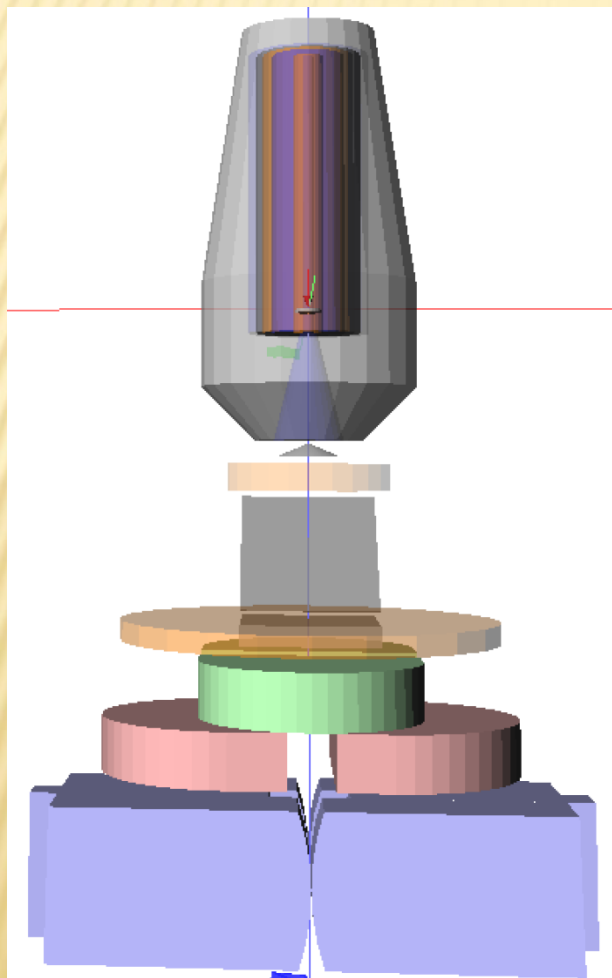
Назначение, основные параметры.

Комплекс предназначен для стереотаксической и дистанционной лучевой терапии злокачественных и доброкачественных новообразований различной этиологии при использовании пучка тормозного излучения с номинальной энергией 6 МэВ, а также для получения диагностических проекционных изображений, с целью точного позиционирования облучаемого объема при использовании тормозного излучения номинальной энергией 2.5 МэВ.

Высокая энергия	6 МэВ
Низкая энергия	2.5 МэВ
Стабильность энергии	$\pm 3\%$
Мощность дозы в режиме высокой энергии	1-10* Гр/мин
Мощность дозы в режиме низкой энергии	0.01-0.5 Гр/мин
Максимальная частота повторений	400 Гц

1. Введение. Комплекс лучевой терапии «Оникс».

Назначение, основные параметры.



Для создания требуемых дозных полей в области расположения опухоли используется устройство формирования пучка, состоящее из шторок коллиматора и многолепесткового коллиматора (МЛК), позволяющее формировать поля различных форм и размеров. При этом максимальный размер поля пучка в области расположения опухоли может достигать (40×40) см², а минимальный $(0,5 \times 0,5)$ см². Для формирования однородных дозных полей используется выравнивающий фильтр.

1. Введение. Комплекс лучевой терапии «Оникс». Назначение, основные параметры.



1. Введение. Комплекс лучевой терапии «Оникс».

Назначение, основные параметры.

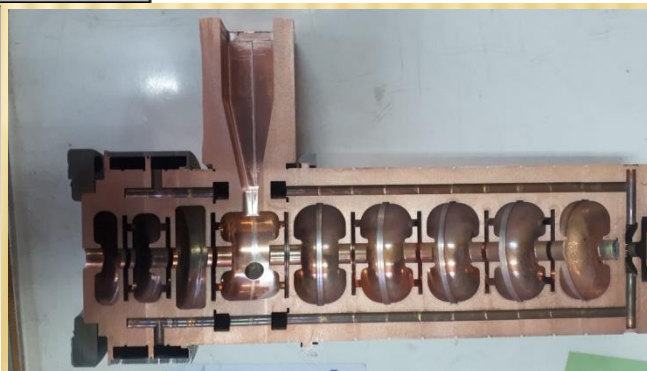
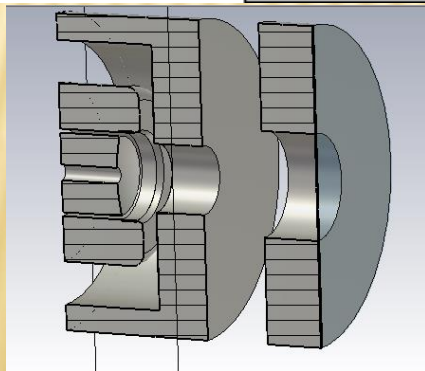
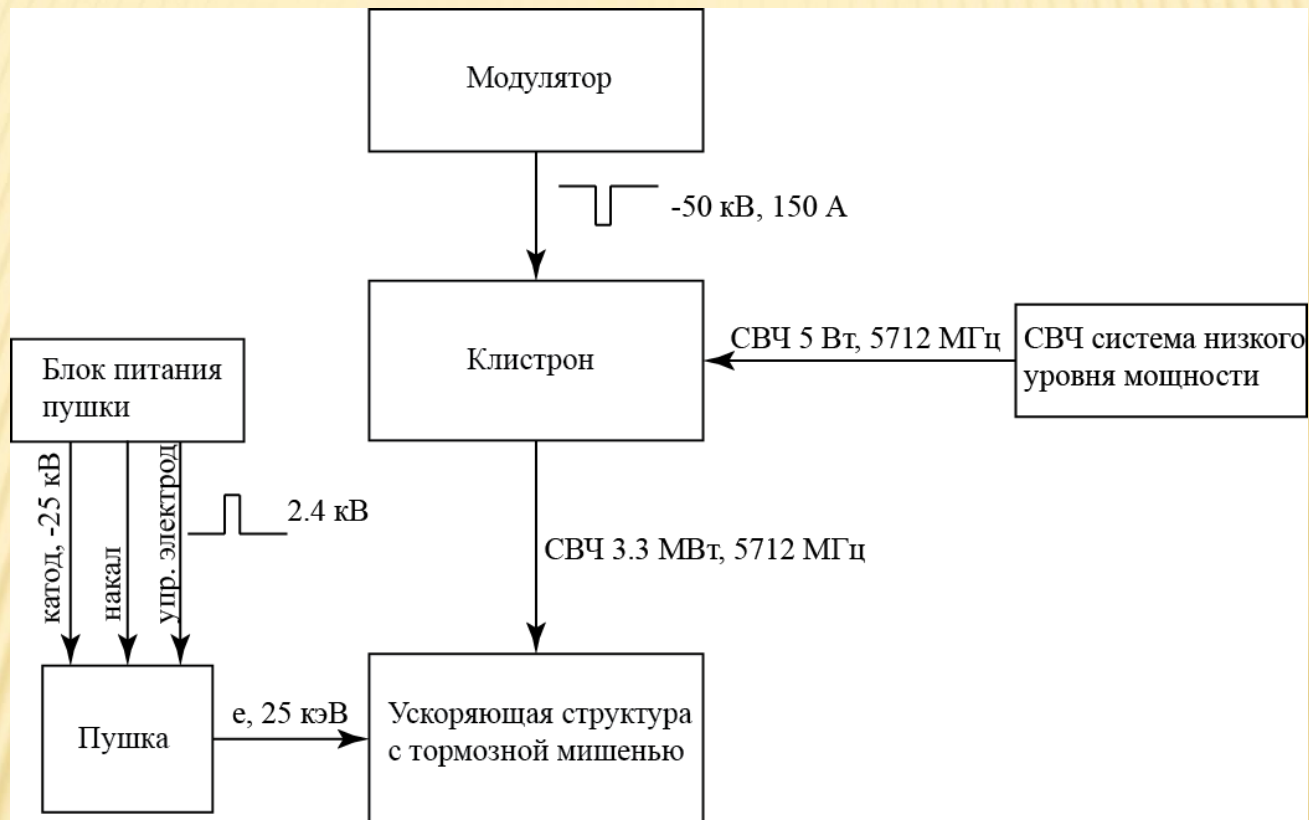
Для проекта комплекса лучевой терапии (КЛТ) была доработана конструкция ускоряющей системы, использовавшаяся для мобильного инспекционно-досмотрового комплекса (МИДК).

Регулярная часть ускоряющей системы работает с темпом набора энергии, близким к 40 МэВ/м – для ускорителей прикладного назначения это рекордная величина. Это необходимо (а) для уменьшения длины ускоряющей структуры и (б) получения возможности работы начиная с энергии 2 – 2.5 МэВ.

	МИДК	КЛТ
Энергия пучка	6/3.5 МэВ	6/2.5 МэВ
Мощность дозы	0.05/0.05 Гр/мин	10/0.05 Гр/мин
Рабочая частота	5712 МГц	5712 МГц
Ток пушки	10/50 мА	220 мА
Импульсная мощность клистрона	2.3 МВт	3.3 МВт

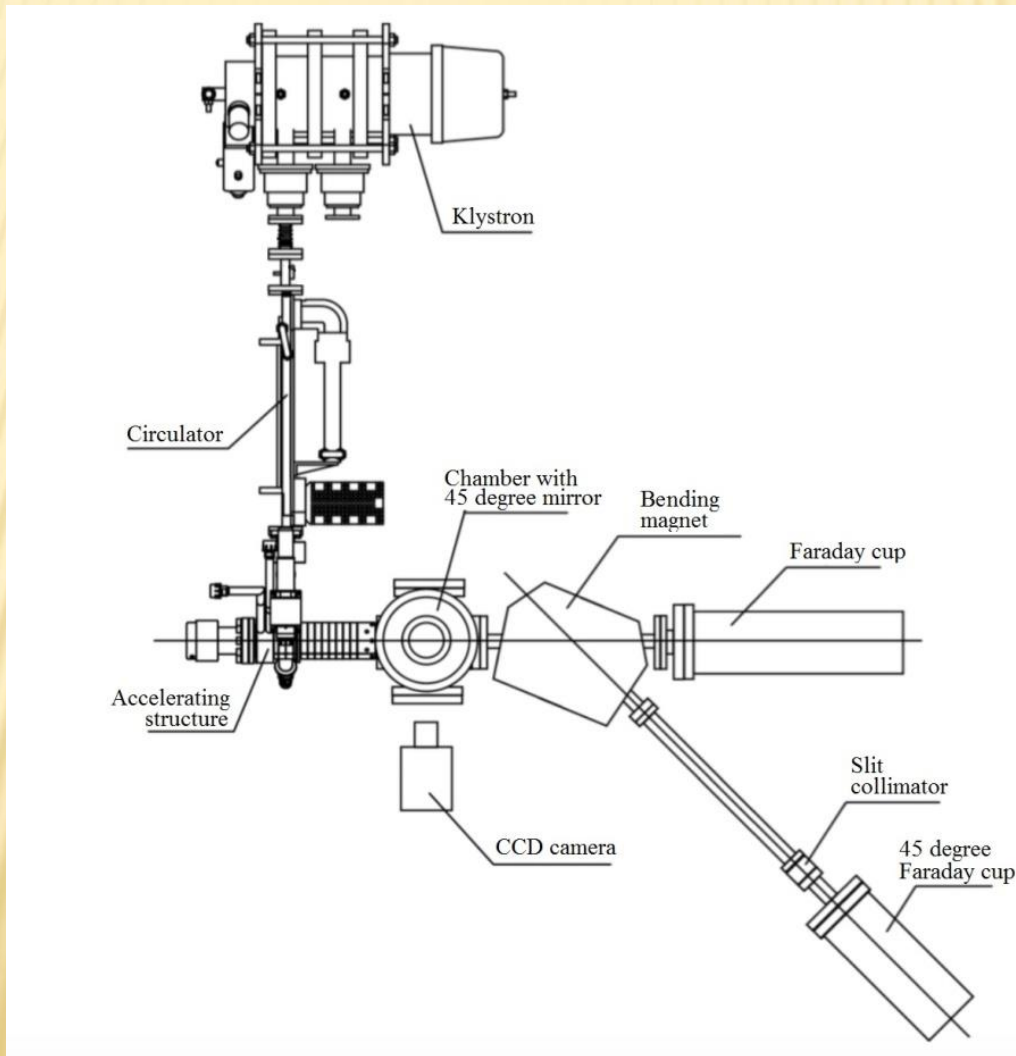
1. Введение. Комплекс лучевой терапии «Оникс».

Назначение, основные параметры.

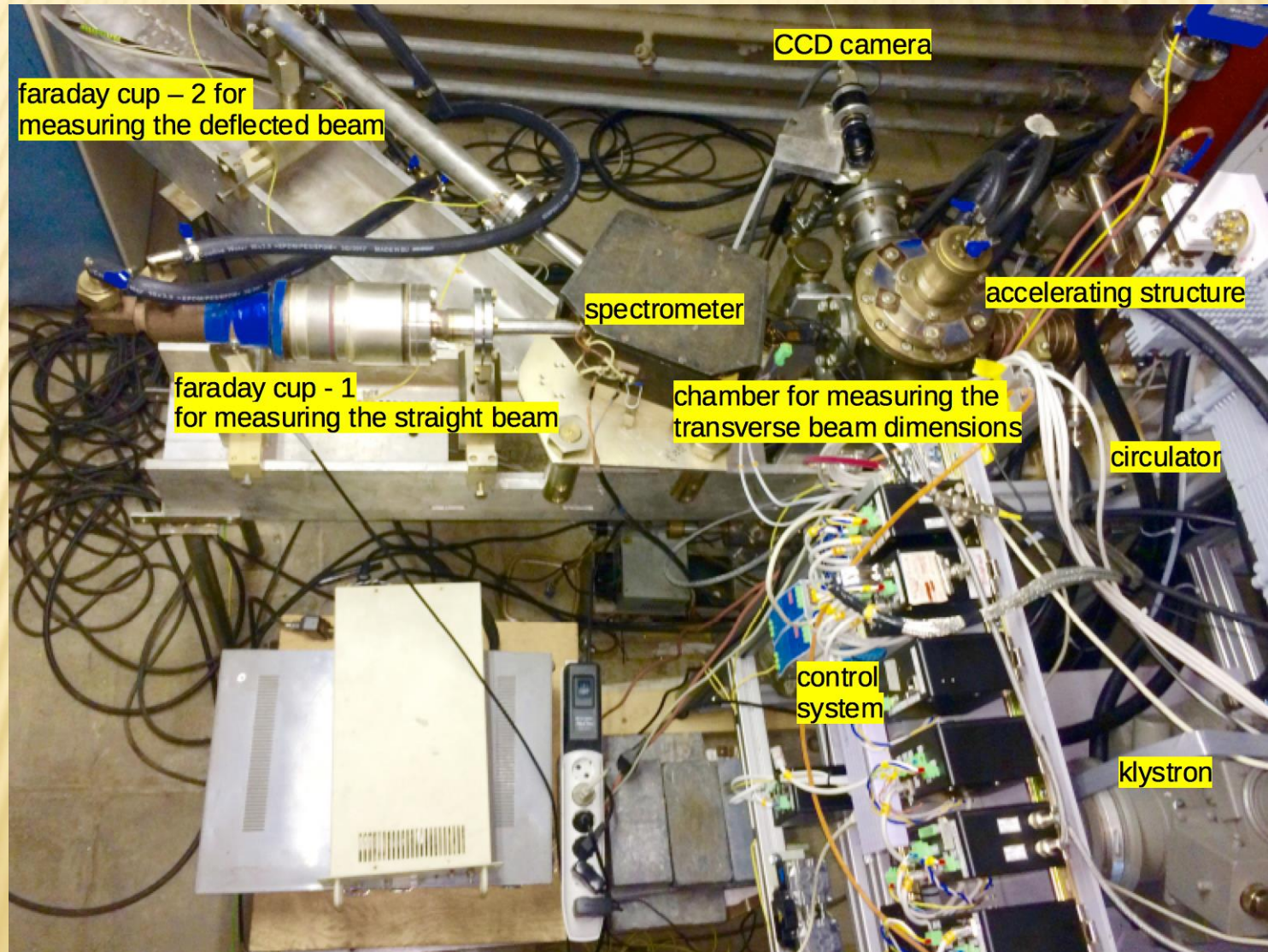


2. Измерение характеристик пучка на стенде в НИИЯФ МГУ

Схема стенда

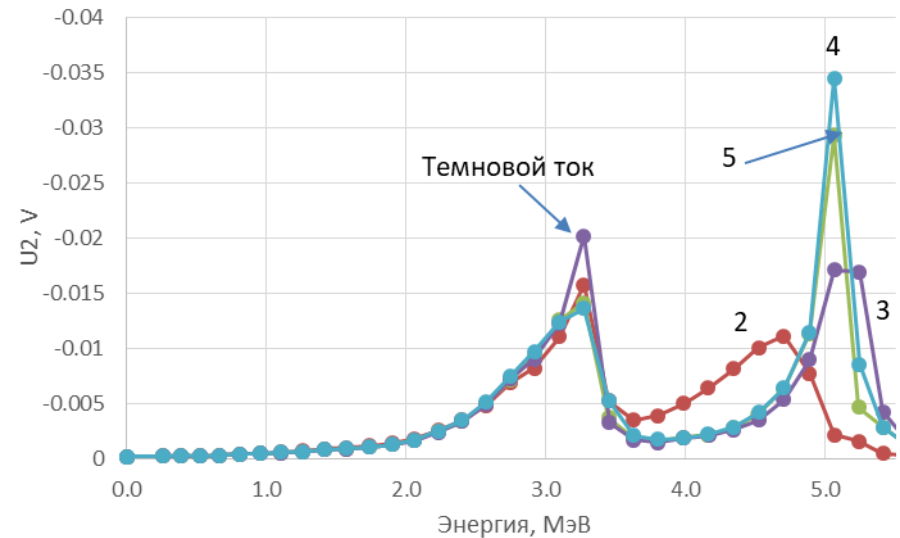
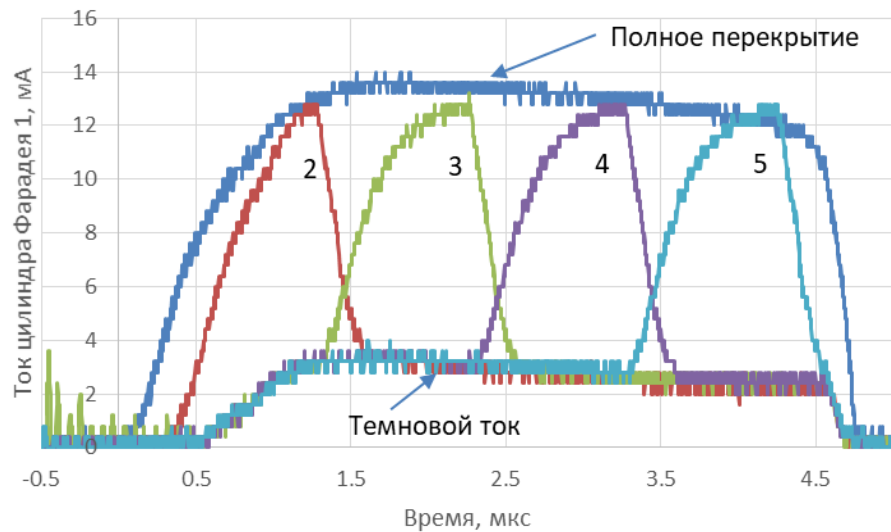


2. Измерение характеристик пучка на стенде в НИИЯФ МГУ



2. Измерение характеристик пучка на стенде в НИИЯФ МГУ

Спектры с различными временными характеристиками импульса тока пушки

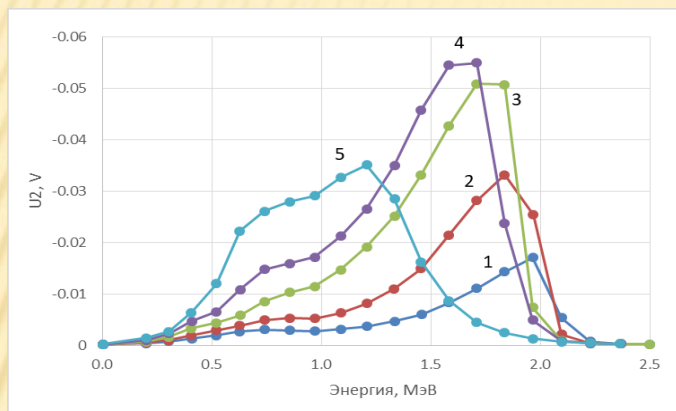


Импульсы тока на прямом цилиндре Фарадея при различных длительностях импульса тока пушки и различных его положениях относительно импульса СВЧ поля в структуре.

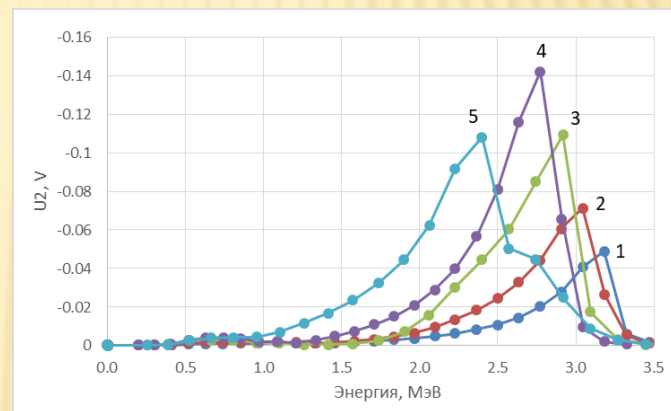
Соответствующие спектры пучка.

2. Измерение характеристик пучка на стенде в НИИЯФ МГУ

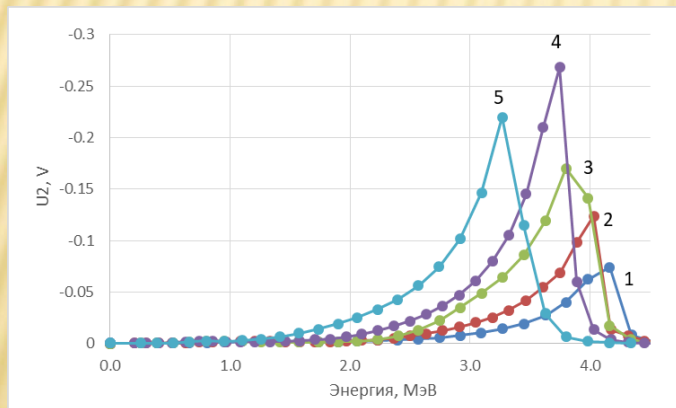
Спектры для различных значений мощности СВЧ потерь в стенках структуры и тока пушки



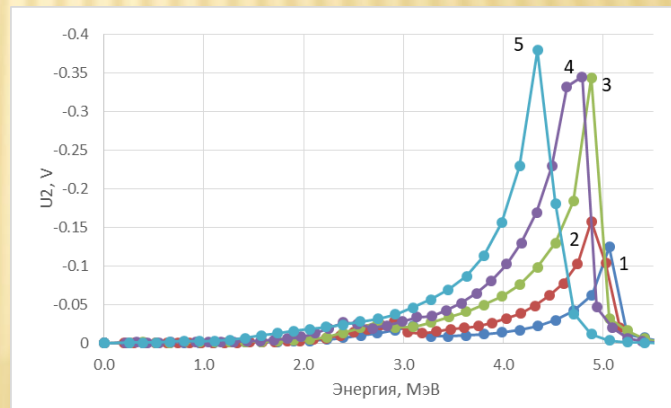
0.8 МВт



1.1 МВт



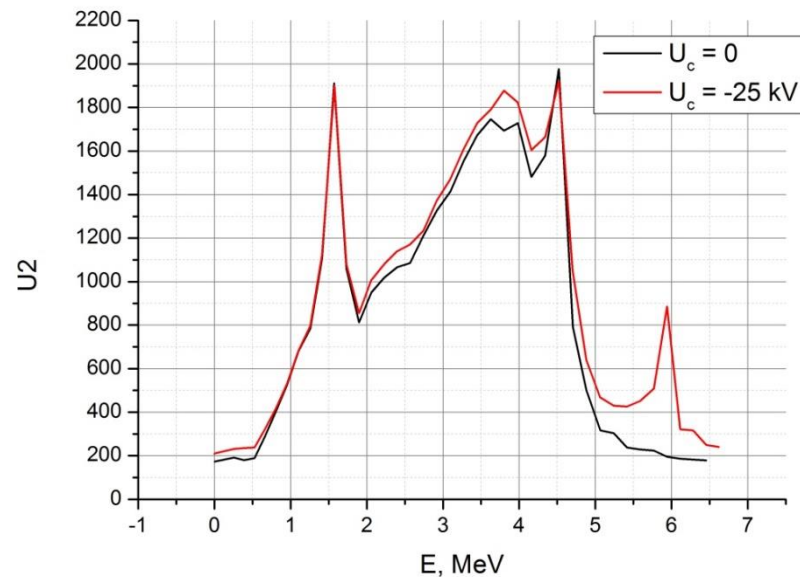
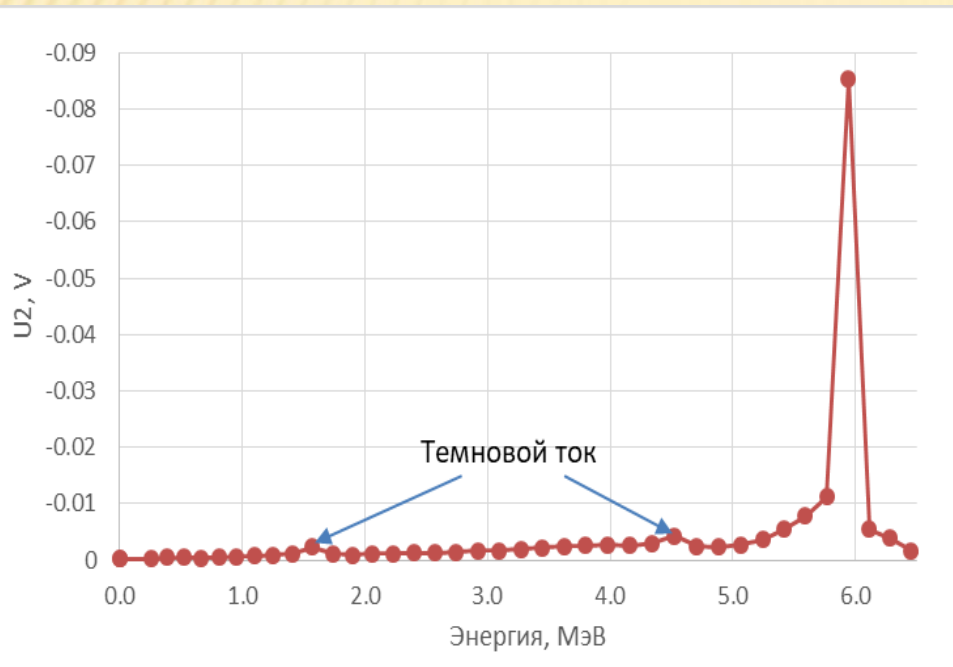
1.4 МВт



1.8 МВт

Ток пушки: «1» - 20 мА, «2» - 35 мА, «3» - 60 мА, «4» - 90 мА, «5» - 180 мА

2. Измерение характеристик пучка на стенде в НИИЯФ МГУ

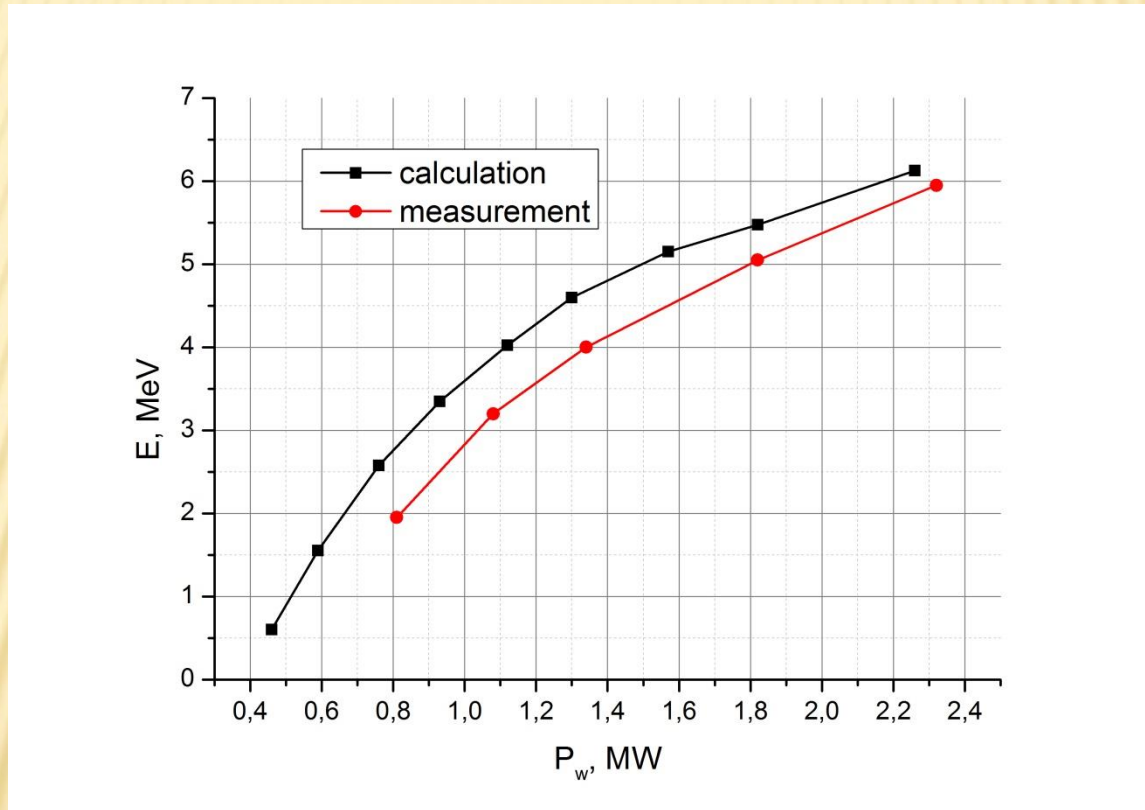


Мощность СВЧ потерь в стенках 2.32
МВт, длительность огибающей импульса
СВЧ 2.9 мкс, ток пушки 30 мА.

Спектр темнового тока

2. Измерение характеристик пучка на стенде в НИИЯФ МГУ

Зависимость энергии пучка от мощности СВЧ потерь в стенках

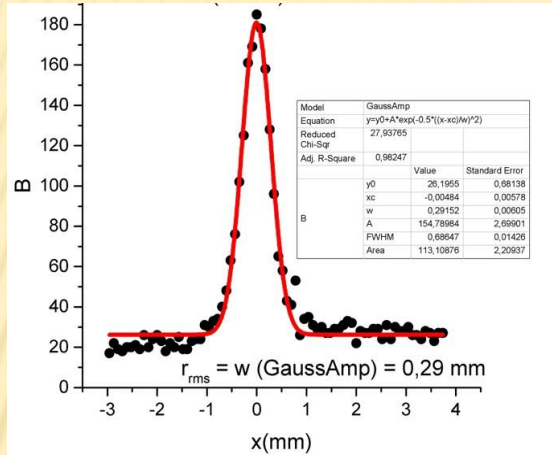


$$Z_e = \frac{U^2}{P_w} = 15.6 \text{ МОм}$$

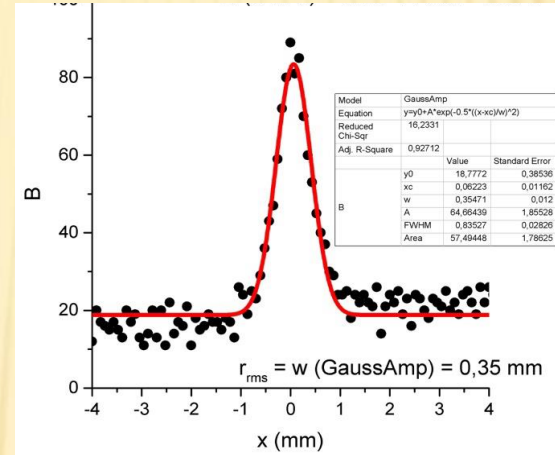
$$E = \frac{1}{1 + \beta} \left\{ \sqrt{4\beta Z_e P_{kl}} - I_{gun} K_{capt} Z_e \right\} *$$

2. Измерение характеристик пучка на стенде в НИИЯФ МГУ

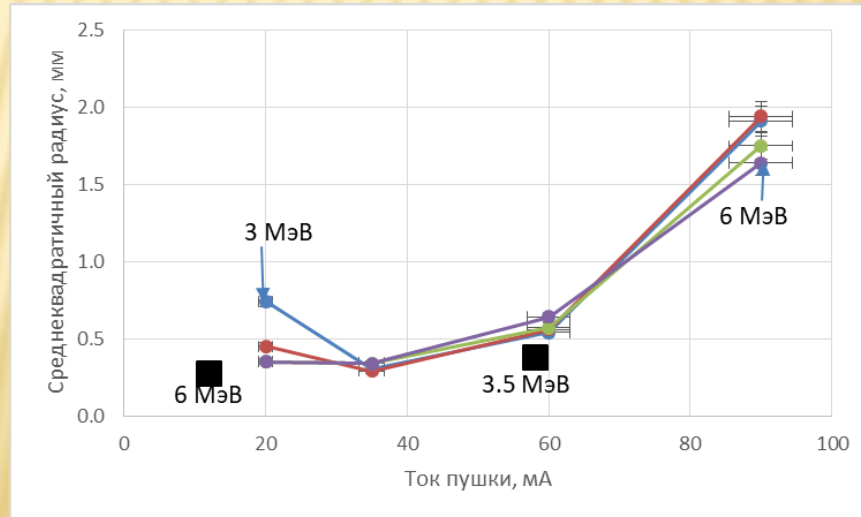
Распределение заряда в поперечном сечении пучка



4 МэВ, 35 мА

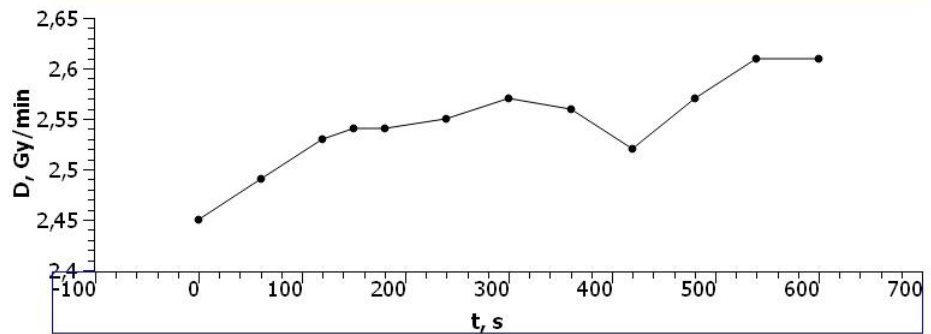
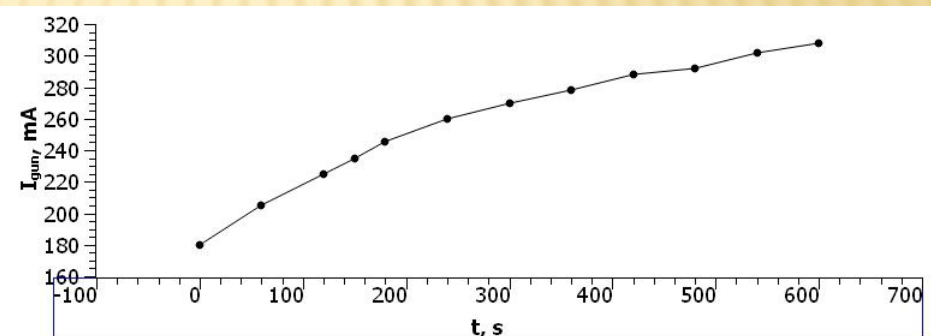


6 МэВ, 20 мА



3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Во время испытаний первой медицинской ускоряющей системы производства АО «НПП «Торий» были обнаружены проблемы со стабильностью мощности дозы при больших частотах следования импульсов. Начиная со 100 Гц через некоторое время после включения излучения ток пушки начинал быстро расти, а мощность дозы - вести себя нестабильно. С ростом частоты следования импульсов скорость развития данного процесса росла.



3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

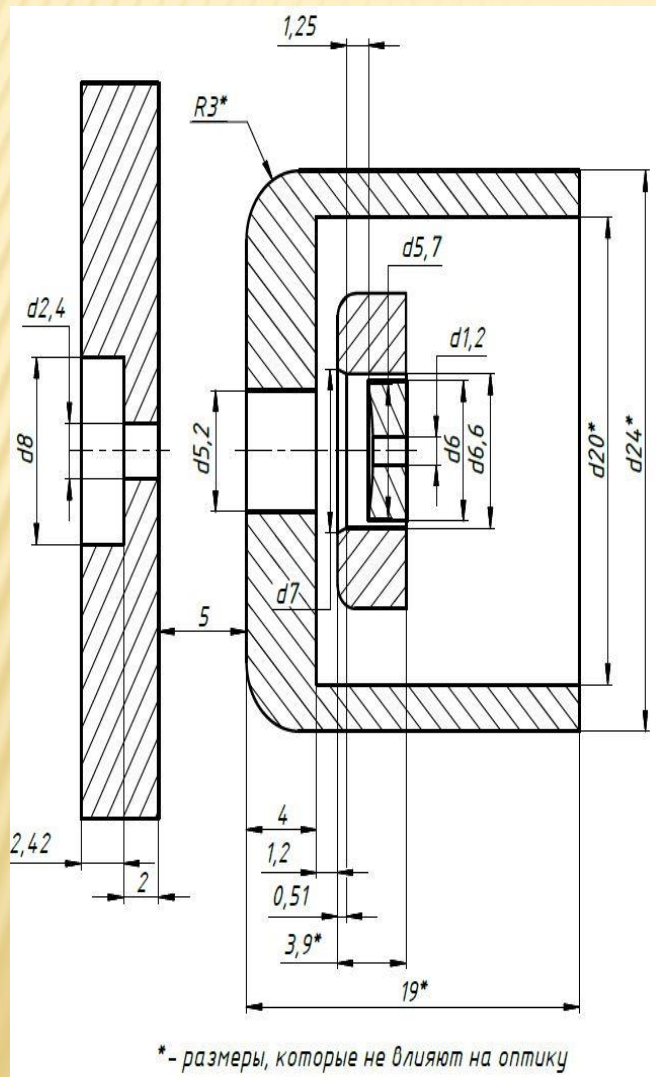
Было предположено, что причина данного процесса – бомбардировка катода пушки обратными электронами, в результате чего происходит испарение рабочего вещества катода (Ва) и его оседание на фокусирующем электроде. Осевшее рабочее вещество, нагреваясь за счет теплового излучения от катода, постепенно начинает эмитировать электроны. Часть этих электронов оседает на управляющем электроде, перегружая его источник питания и уменьшая таким образом ток с катода, а часть попадает в ускоряющую структуру, где захватывается в процесс ускорения, либо, более вероятно, оседает на стенках пролетного канала.

Необходимая мощность дозы 10 Гр/мин была достигнута на коротких (~30 с) промежутках времени, однако возможность реальной работы при такой мощности дозы была полностью исключена даже в режиме с уменьшенным током накала.

Было решено изготавливать новую ускоряющую систему с рядом доработок в конструкции.

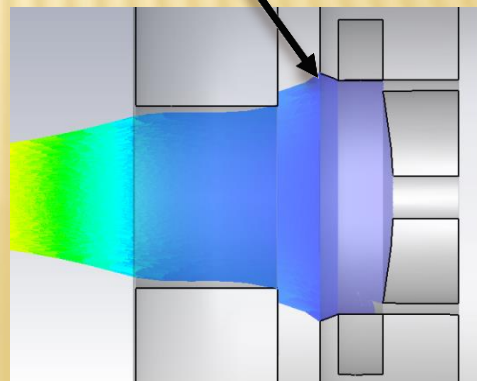
3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Изменение конструкции пушки



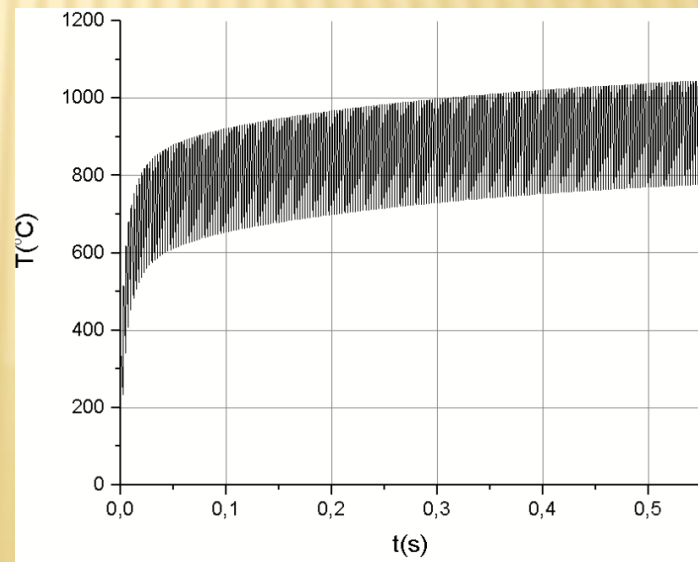
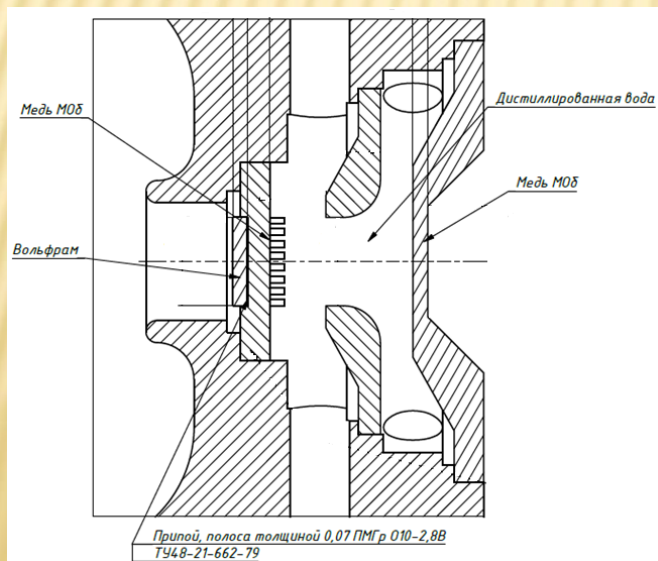
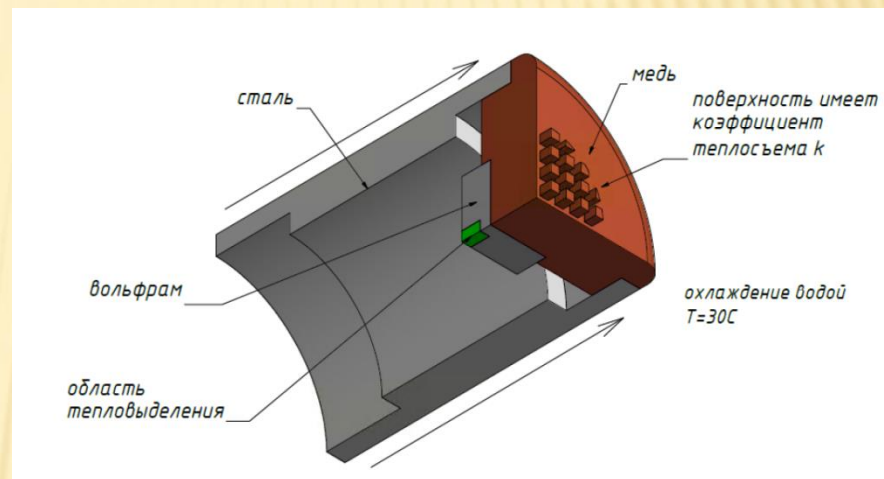
Параметр	Значение		
	Старый катод	Новый катод с диафрагмой	Новый катод без диафрагмы
Ток, оседающий на катоде, мА	27	3.8	8.2
Снижение мощности от обратного тока, раз	--	7	3.3
Средняя энергия, МэВ	0.11	0.11	0.11

Эмиссия с фокусирующего электрода



3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Изменение конструкции тормозной мишени



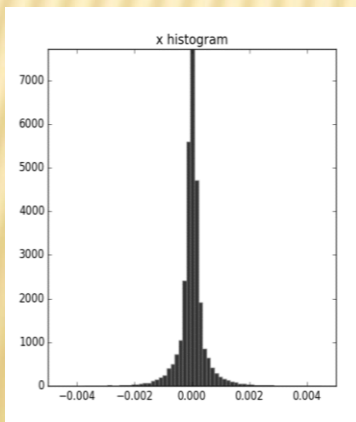
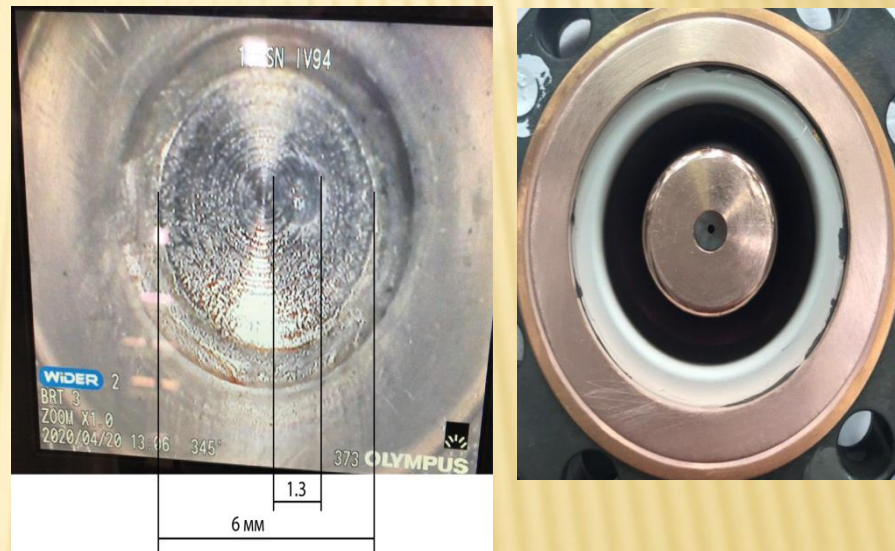
3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Изменение конструкции тормозной мишени

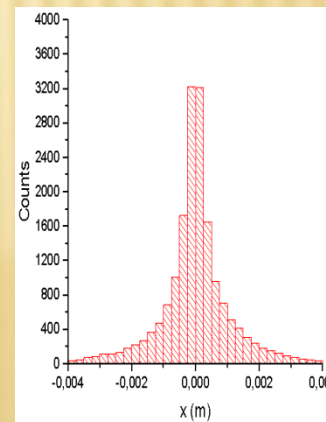
Пушка с малым катодом, мишень 1.5 мм



Пушка с большим катодом, мишень 1 мм



$$x_{rms} = 0.7 \text{ мм}$$



$$x_{rms} = 1.5 \text{ мм}$$

3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Изменение конструкции СВЧ окна

В процессе доработки технологии изготовления ускоряющих систем на АО «НПП «Торий» была решена проблема высокочастотных пробоев в ускоряющей структуре и мультипакторных разрядов на керамическом СВЧ окне. Было улучшено качество механической обработки, применена технология электрохимической полировки внутренней поверхности структуры, улучшено качество антидинаatronного покрытия керамики, доработана технология пайки керамического окна.

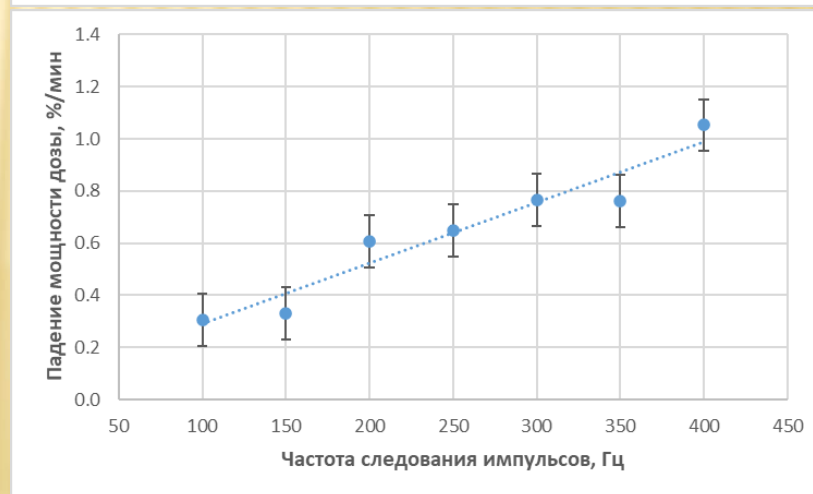
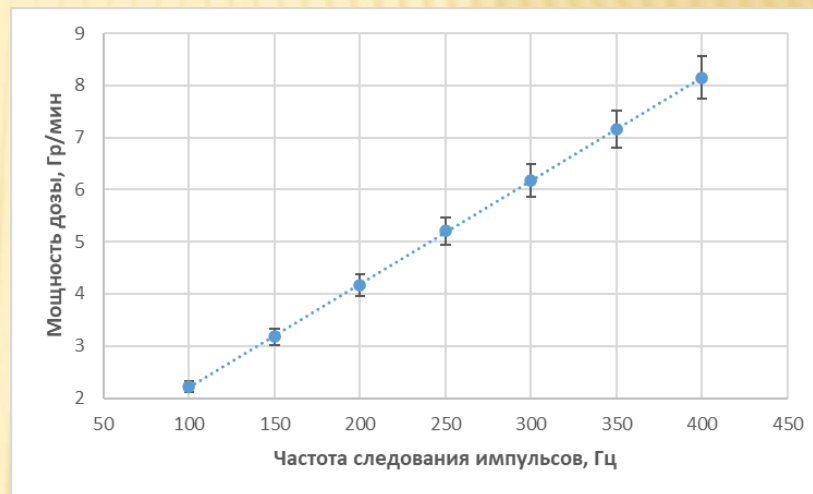
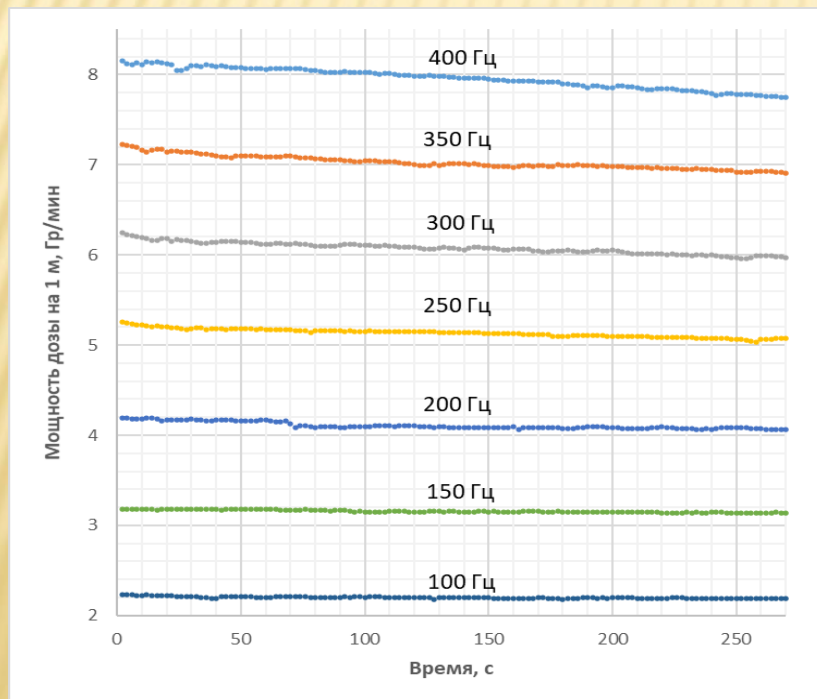


3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Измерения с доработанной ускоряющей системой

Во второй половине 2019 года была изготовлена доработанная ускоряющая система и проведены измерения стабильности мощности дозы при облучениях длительностью ~ 5 мин.

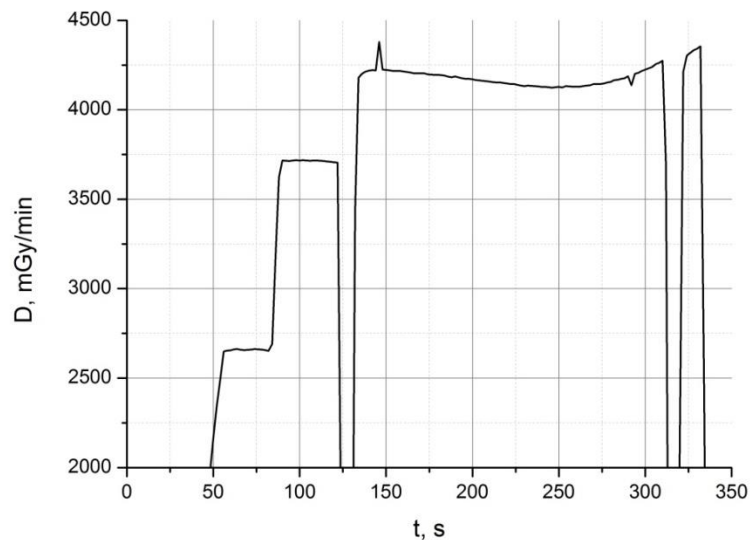
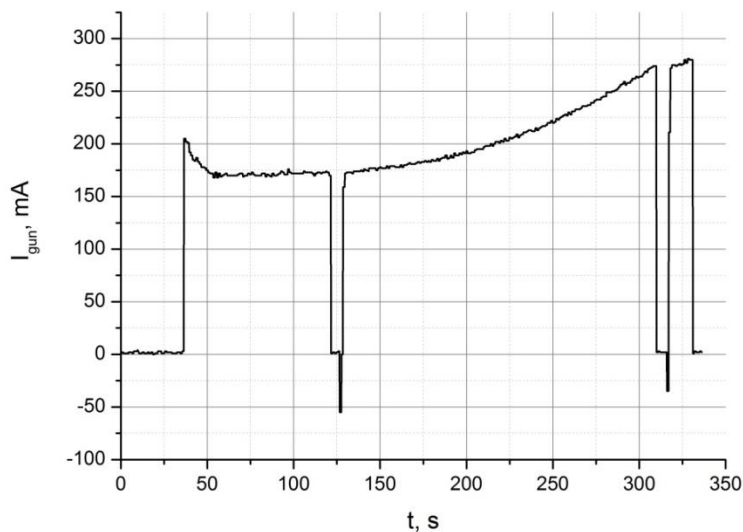
Требуемые параметры были достигнуты, однако было обнаружено постепенное падение мощности дозы во время облучений.



3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Измерения с доработанной ускоряющей системой

В начале работ со второй ускоряющей системой производства АО «НПП «Торий» не было заметно признаков эмиссии рабочего вещества с фокусирующего электрода. Однако затем, по видимому, было два случая оседания рабочего вещества на фокусирующем электроде во время долгих облучений с относительно высоким током накала. На высоких частотах следования импульсов стали проявляться эффекты, связанные с эмиссией с фокусирующего электрода. Второй случай произошел в октябре 2020 года, после чего в НИИЯФ МГУ были проведены дополнительные исследования.

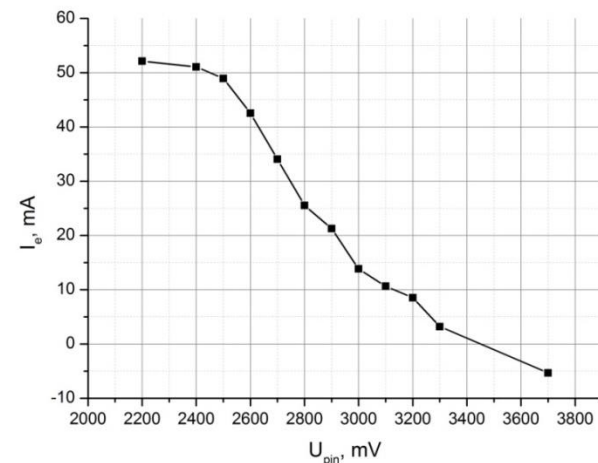
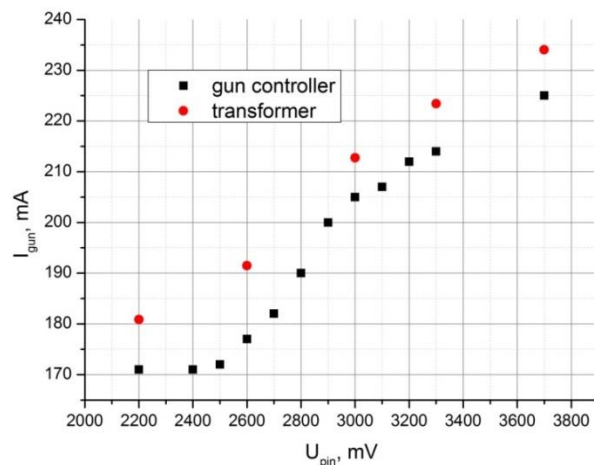


3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Измерения обратного тока электронов

С помощью магнито-индукционных датчиков были измерены токи через управляющий электрод и через катод в зависимости от напряжения pin-аттенюатора (чем меньше напряжение, тем больше поле в ускоряющей структуре). Дополнительно измерялось напряжение на управляющем электроде относительно катода с помощью высоковольтного делителя.

Измерения показали, что при номинальном уровне поля на управляющий электрод идет 55 мА обратного тока электронов. При этом напряжение на управляющем электроде падает на 80 В. Обратный ток на катод составляет ~40 мА (на графике видно падение тока катода на ~55 мА, но примерно 15 из них объясняются падением напряжения на управляющем электроде).

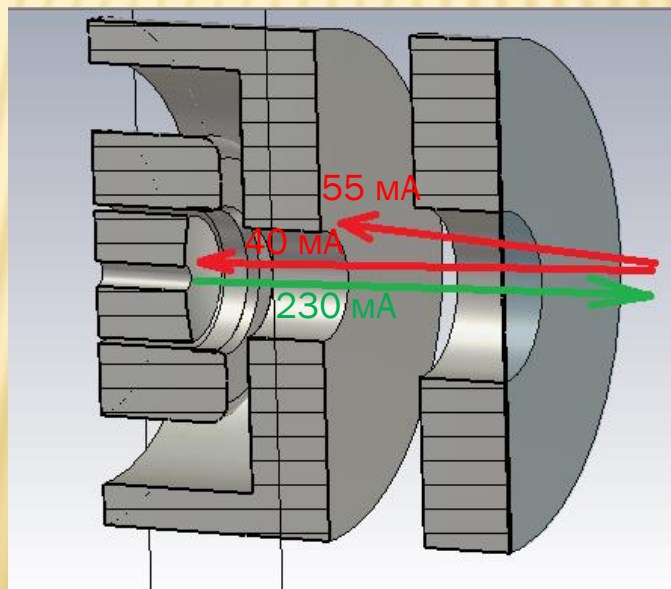


3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Измерения обратного тока электронов

Таким образом, причина падения мощности дозы: бомбардировка обратными электронами управляющего электрода. Это приводит к перегрузке источника питания управляющего электрода, падению напряжения на нем и, как следствие, падению тока катода.

С ростом частоты следования импульсов увеличивается средний ток обратных электронов на управляющий электрод, растет скорость падения тока катода.



3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

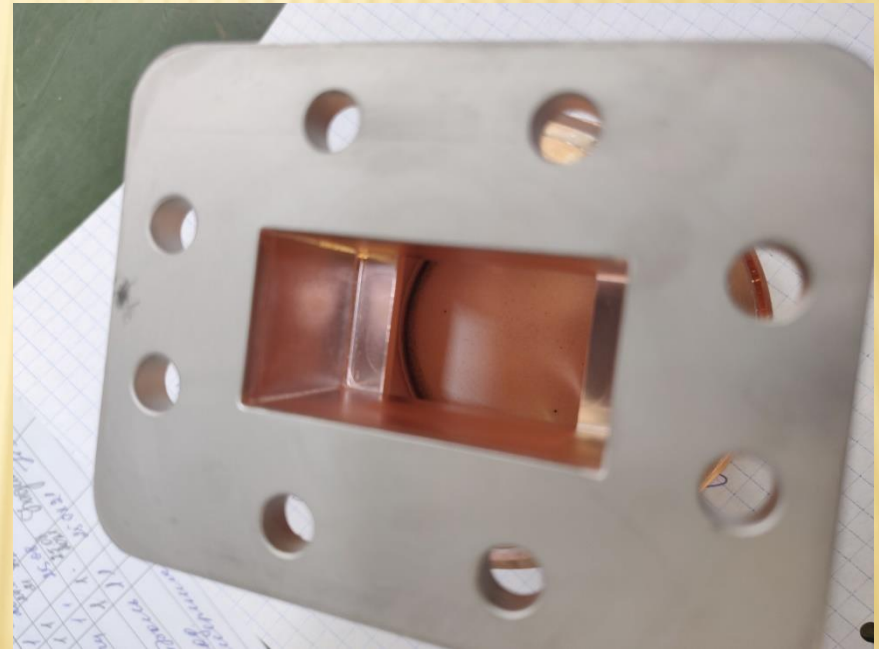
Вторая серия доработок ускоряющей системы

1. На входе в ускоряющую структуру установлена диафрагма, препятствующая попаданию обратных электронов на управляющий электрод и уменьшающая поток на катод пушки.
2. Оптимизирована динамика пучка в ускоряющей структуре. Внесены изменения в геометрию ячеек, обеспечивающие увеличение коэффициента захвата и уменьшение обратного потока электронов.
3. Оптимизирована геометрия электронной пушки. Увеличено центральное отверстие в катоде, уменьшена напряженность поля на поверхности фокусирующего электрода. На поверхность фокусирующего электрода нанесено антидинаatronное покрытие.
4. Уменьшены толщины медной подложки тормозной мишени и выходного окна для уменьшения поглощения тормозного излучения элементами конструкции.

3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Вторая серия доработок ускоряющей системы

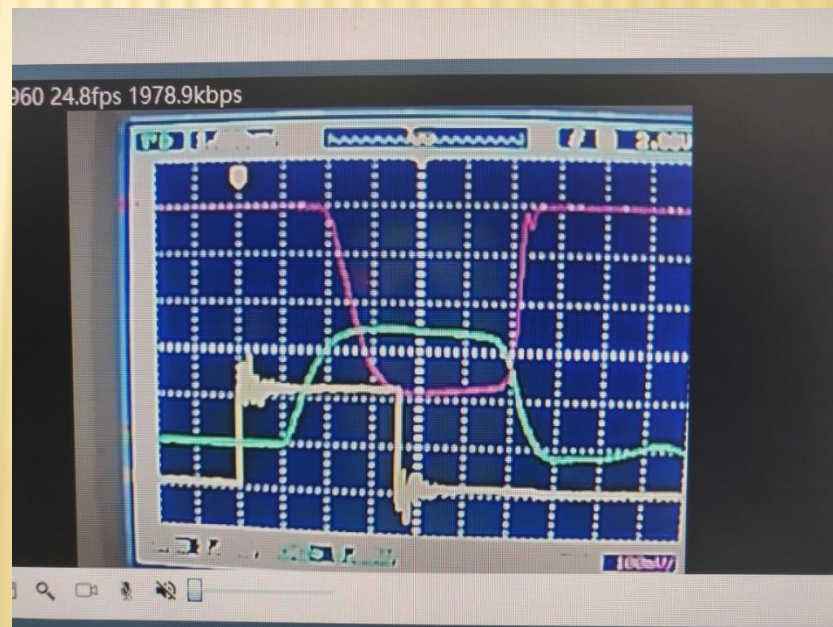
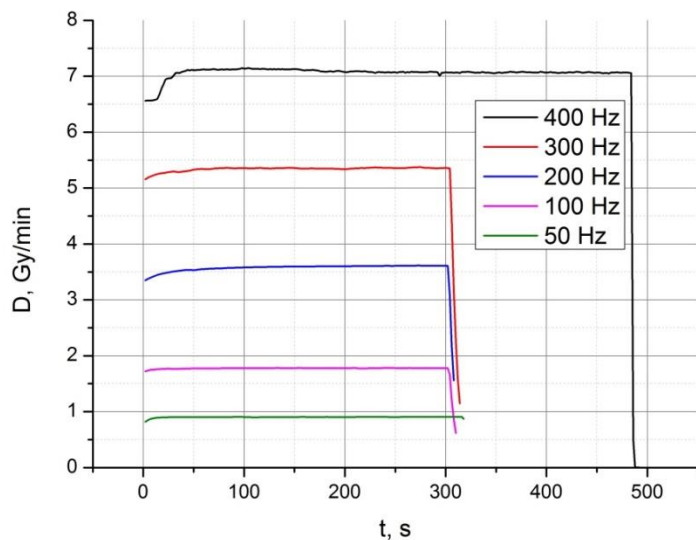
Изменена конструкция СВЧ окна, в том числе в качестве материала керамики используется нитрид бора вместо оксида алюминия.



3. Измерения характеристик тормозного излучения, доработка ускоряющей системы.

Измерения с третьей ускоряющей системой производства АО «НПП «Торий»

В августе 2021 года была изготовлена третья ускоряющая система производства АО «НПП «Торий». С ней была получена с запасом требуемая мощность дозы 10 Гр/мин. Постепенного падения мощности дозы во время облучения не было обнаружено, как и эффектов эмиссии с фокусирующего электрода. При этом небольшое влияние обратной бомбардировки на тепловой режим катода заметно. Для минимизации риска испарения рабочего вещества во время излучений снижается ток накала в зависимости от частоты следования импульсов.



Измерение химического состава элементов электронной пушки

Управляющий электрод

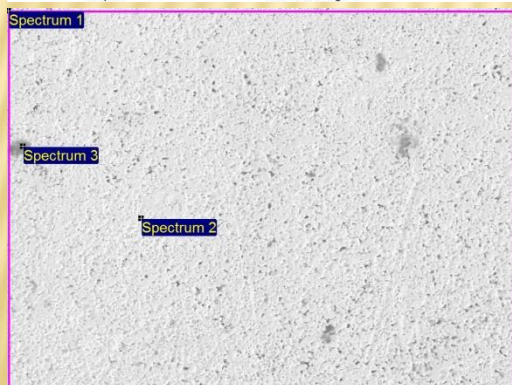
Spectrum	In stats.	Mg	Cu	Ba	Total
Spectrum 1	Yes	0.29	95.08	4.63	100.00
Mean		0.29	95.08	4.63	100.00
Std. deviation		0.00	0.00	0.00	
Max.		0.29	95.08	4.63	
Min.		0.29	95.08	4.63	

Фокусирующий электрод

Spectrum	In stats.	F	Ca	Fe	Mo	Ba	W	Total
Spectrum 1	Yes	2.82	0.68	0.68	83.89	9.78	2.16	100.00
Mean		2.82	0.68	0.68	83.89	9.78	2.16	100.00
Std. deviation		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Max.		2.82	0.68	0.68	83.89	9.78	2.16	
Min.		2.82	0.68	0.68	83.89	9.78	2.16	

Катод

Spectrum	In stats.	Na	Al	S	Cl	K	As	W	Os	Total
Spectrum 1	Yes		0.50					26.18	73.32	100.00
Spectrum 2	Yes		0.51				0.08	25.57	73.84	100.00
Spectrum 3	Yes	4.86		2.77	9.75	6.93		20.19	55.51	100.00
Max.		4.86	0.51	2.77	9.75	6.93	0.08	26.18	73.84	
Min.		4.86	0.50	2.77	9.75	6.93	0.08	20.19	55.51	



4. Текущее состояние дел по проекту



4. Дальнейшие планы

В случае успешного продолжения проекта и получения новых заказов на комплекс мы планируем внести в конструкцию ускоряющей системы ряд дополнительных изменений, направленных на увеличение ее надежности и запаса по достигнутым параметрам тормозного излучения. В том числе добавить один или два резонатора в ускоряющей структуре за счет изменения конструкции пушки и возможной корректировки расположения элементов в гантри. Это позволит уменьшить величину ускоряющего поля в структуре, что снизит СВЧ потери в стенках, темновые токи и упростит процесс тренировки. Также в планах скорректировать геометрию носиков резонаторов, что должно снизить максимальное электрическое поле на стенках ячеек.

Спасибо за внимание!