

# Линейный ускоритель электронов С-диапазона для комплекса лучевой терапии

(по материалам кандидатской диссертации)

Овчинникова Л.Ю.  
(ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ)

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н., профессор  
Шведунов В.И.

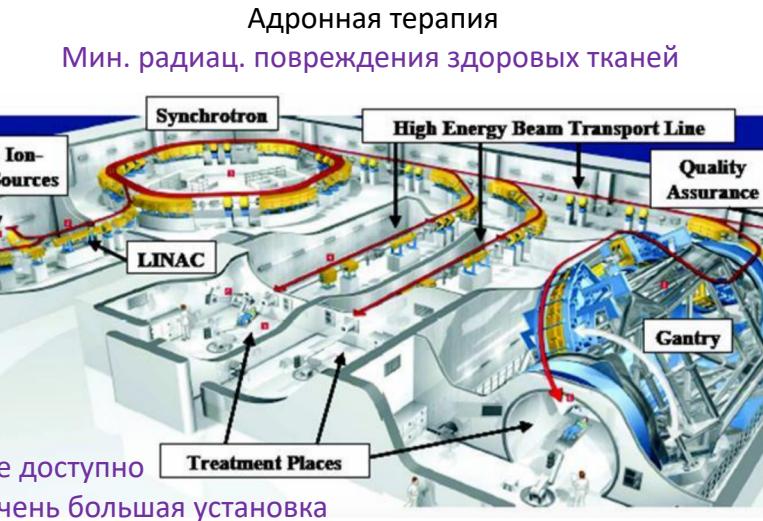
# Актуальность темы

Онкология - вторая по распространенности причина смерти в мире.

Основные факторы благоприятного исхода – ранняя диагностика и доступность лечения.

Радиационная терапия – основной нехирургический метод лечения.

Радиационная терапия на основе  
радиоактивных гамма  
источников (Co-60, Cs-137)

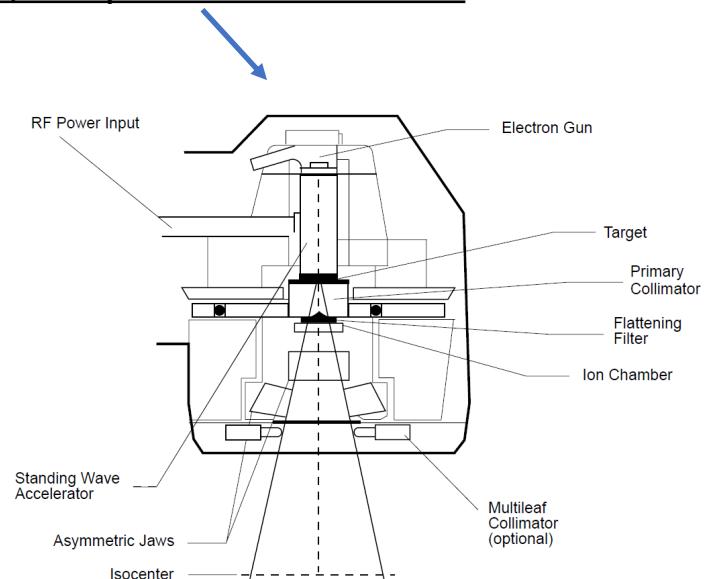
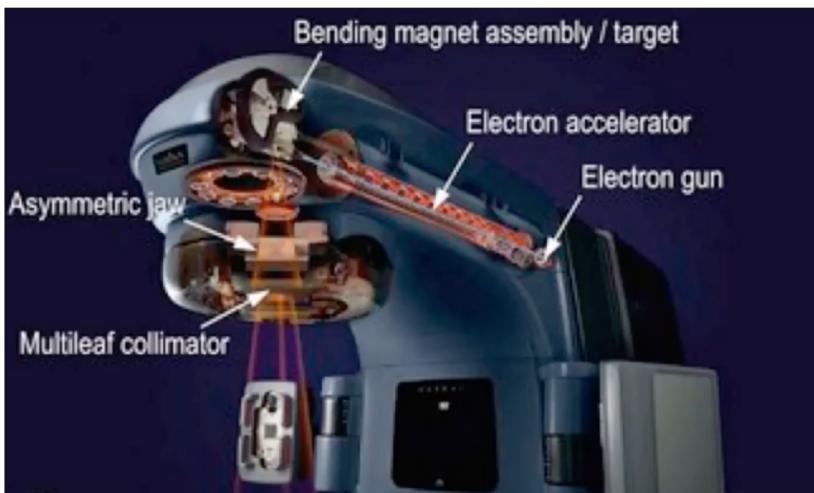


На основе линейных  
ускорителей электронов



# Радиационная терапия на основе ускорителей электронов

- 1) Дорогие и многофункциональные – две моды облучения (электронная и фотонная), энергии от 6 до 25 МэВ
- 2) Бюджетные – только тормозное излучения, энергии около 6 МэВ (фиксировано)



# Комплексы внешней лучевой терапии пучком тормозного излучения с верхней границей спектра 6 МэВ



SL75-5-М (НИИТФА)



«ЭЛЛУС-6М» (НИИТФА)

Ускоряющая структура большой длины => требуется магнитооптическая система => Большие размеры комплекса, сложность в изготовлении, настройке и обслуживании комплекса.

# Комплексы внешней лучевой терапии пучком тормозного излучения с верхней границей спектра 6 МэВ



UNIQUE (Varian)



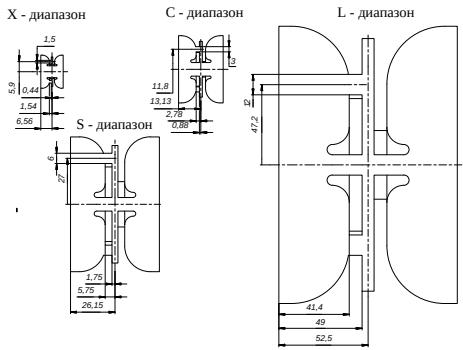
COMPACT (Elekta)

Вертикальное размещение ускоряющей системы=> отсутствие магнитной системы, симметричность поля излучения, низкоэнергетичные электроны в спектре не влияют на форму тормозного спектра и мощность дозы.

# Требования к ускорителю электронов на энергию 6 МэВ для КЛТ 6

Параметр	Величина
Высокая энергия	6 МэВ ( $\pm 5\%$ )
Низкая энергия, не более	2.5 МэВ
Диапазон регулирования мощности дозы в режиме высокой энергии	1 - 10 Гр/мин на 1 м
Диапазон регулирования мощности дозы в режиме низкой энергии	0,005 - 0,05 Гр/мин на 1 м
Макс. частота повторения в режиме высокой энергии	400 Гц
Макс. частота повторения в режиме низкой энергии	400 Гц
Размер фокусного пятна	< 2 мм
Размеры ускоряющей системы, не более ( с учетом защ. и кожуха гантри)	300 мм

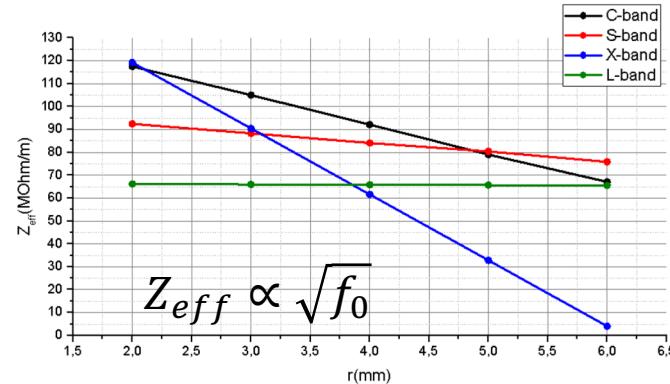
# Выбор диапазона рабочей частоты



Геометрии ячеек регулярной части

Переход к короткой длине волны за счет масштабирования ускоряющей структуры:

- 1)Увеличение темпа набора энергии
- 2)Рост эффективного шунтового сопротивления
- 3)Снижение требуемых затрат мощности
- 4)Возрастает предельно допустимая напряженность поля
- 5)Возрастает предельный темп набора энергии

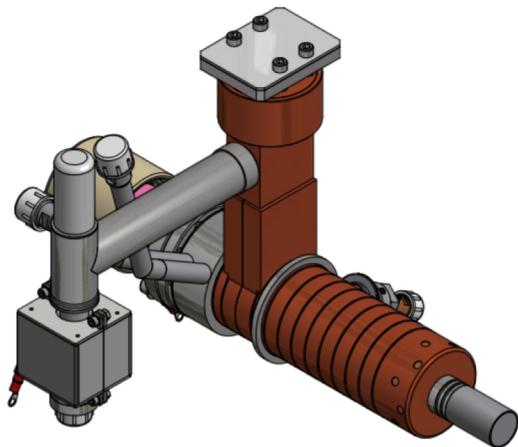


Зависимость эффективного шунтового сопротивления от радиуса пролетного канала

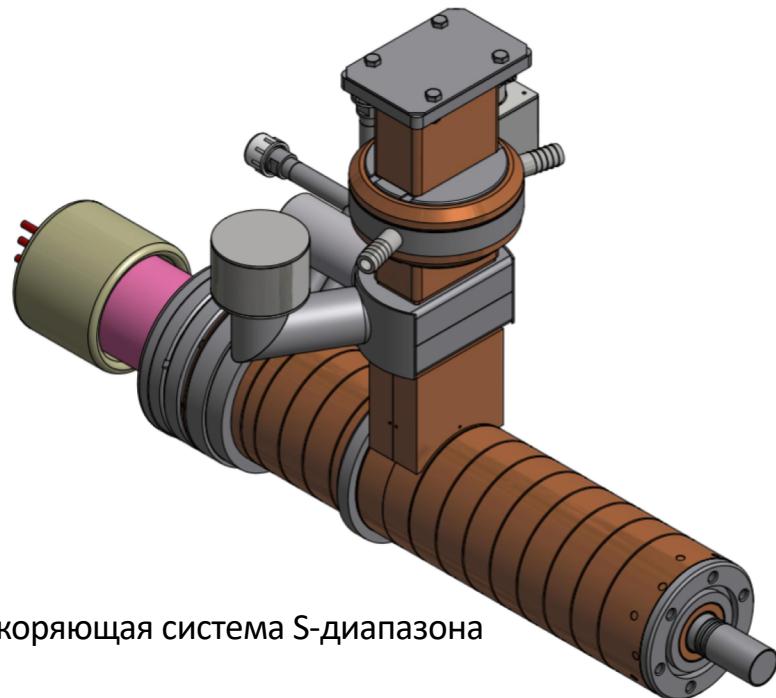
=> Уменьшения диаметра =>  
пролетного канала:

- 1)Увеличения потерь тока пучка в процессе ускорения
- 2)Увеличение мощности дозы паразитного излучения
- 3)Из-за aberrаций возникает рост эмиттанса пучка => большой размер фокусного пятна на мишени
- 4)Низкий темп набора энергии => исчезает возможность переключения энергии

# Сравнение со структурой S-диапазона

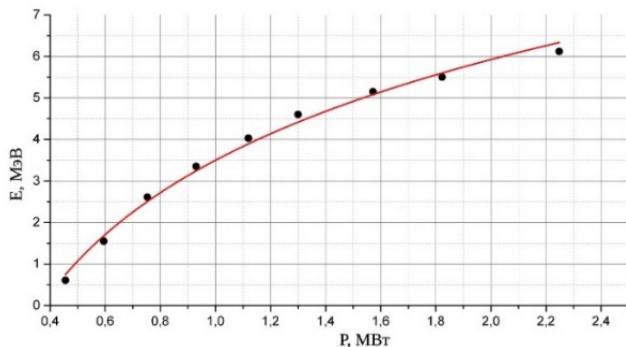
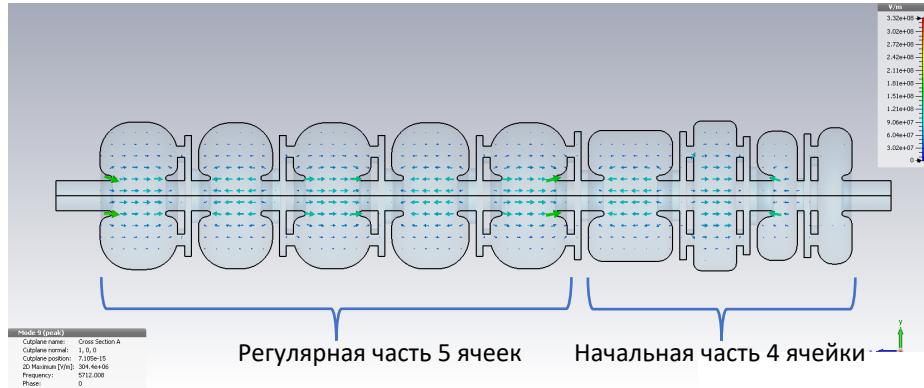


Ускоряющая система С-диапазона

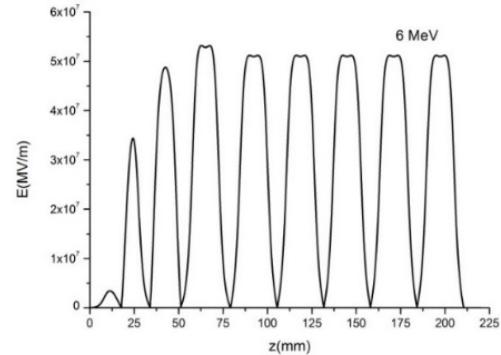


Ускоряющая система S-диапазона

# Расчеты ускоряющей системы

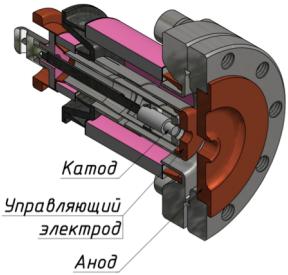


Зависимость мощности потерь в стенках от энергии ускоренного пучка

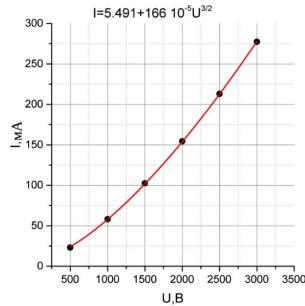


Распределение электрического поля на оси

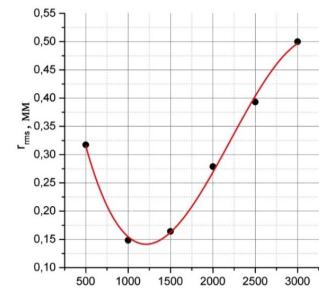
# Расчеты электронной пушки



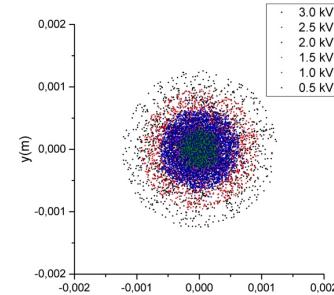
Геометрия  
электронной  
пушки



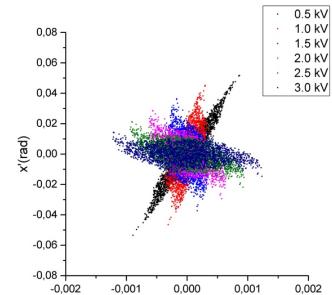
Вольтамперная  
характеристика



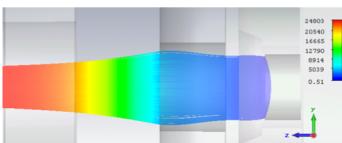
Среднеквадрати-  
чный радиус



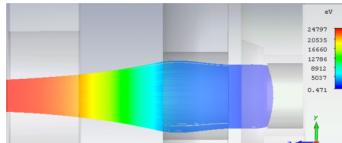
Портрет пучка



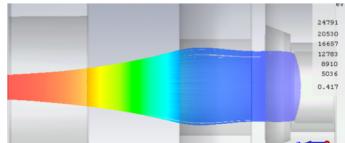
Фазовый  
портрет пучка



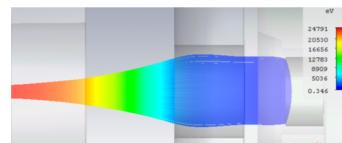
3 кВ  
280 мА



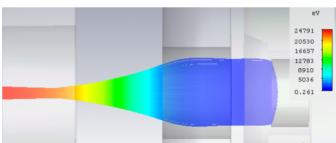
2.5 кВ  
210 мА



2 кВ  
150 мА



1.5 кВ  
100 мА

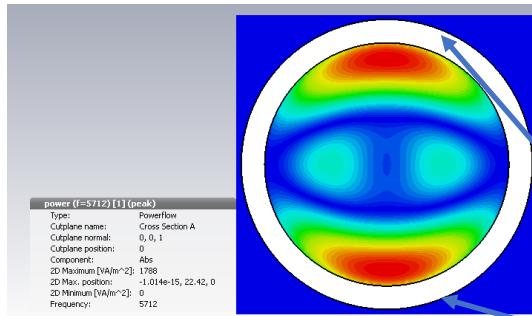


1 кВ  
50 мА

Траектории частиц

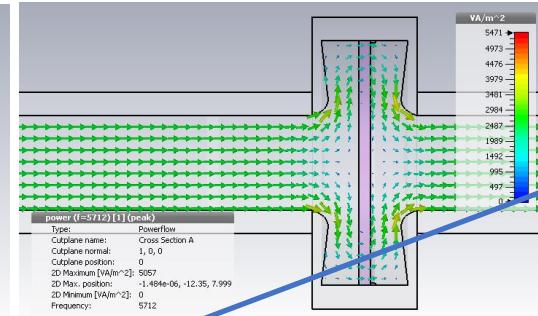
# Расчеты керамического СВЧ окна

Напряженность поля в волноводе 20•40 мм для 3 МВт 2.74 МВ/м в случае полного отражения СВЧ мощности от структуры 11 МВ/м. В случае S-диапазона 1.6 МВ/м и 6.6 МВ/м. => требуется оптимизировать геометрию банки, рассчитанную на большую напряжённость поля.



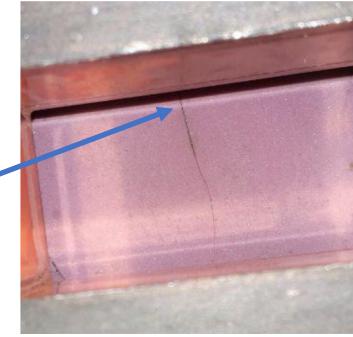
power (I=5712) [1] (peak)

Type:	Powerflow
Cutplane name:	Cross Section A
Cutplane normal:	0, 0, 1
Cutplane position:	0
Component:	Abs
2D Maximum [VA/m <sup>2</sup> ]:	1788
2D Max. position:	-1.014e-15, 22.42, 0
2D Minimum [VA/m <sup>2</sup> ]:	0
Frequency:	5712

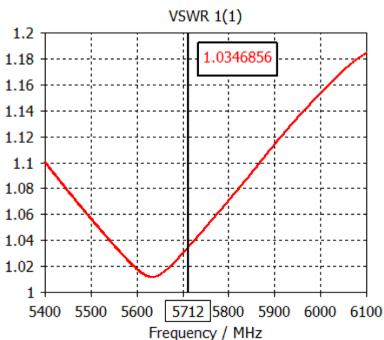


power (I=5712) [1] (peak)

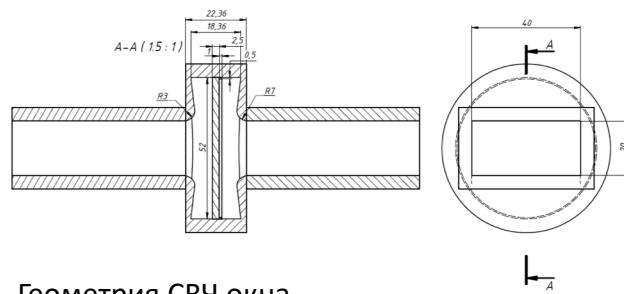
Type:	Powerflow
Cutplane name:	Cross Section A
Cutplane normal:	1, 0, 0
Cutplane position:	0
Component:	Abs
2D Maximum [VA/m <sup>2</sup> ]:	5057
2D Max. position:	-1.494e-06, -12.35, 7.999
2D Minimum [VA/m <sup>2</sup> ]:	0
Frequency:	5712



Распределение потока СВЧ энергии по поверхности керамики



Область локального нагрева керамики находится во внешней части пластины. Размещение каналов охлаждения позволит снизить тепловые нагрузки керамического диска, что позволит значительно повысить уровень СВЧ мощности, проходящий через окно.

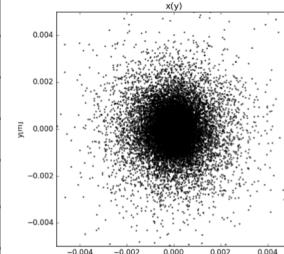


Геометрия СВЧ окна

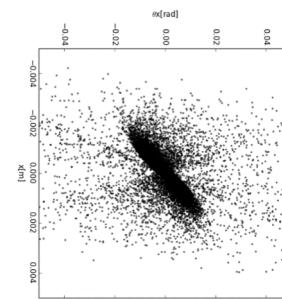
# Расчеты динамики пучка в ускоряющей структуре

## Режим «получение портального изображения»

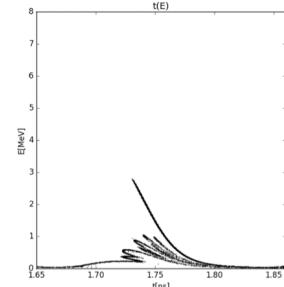
Характеристика	Значение
Доза для скважности 840, Гр/мин	0,37
Инжектируемые ток в структуру, мА	245
Ускоренный ток, мА	124
Коэффициент захвата, %	50
Среднеквадратичный радиус пучка, мм	0,84
Среднеквадратичная расходимость, мрад	29
Ширина энергетического спектра, кэВ	500



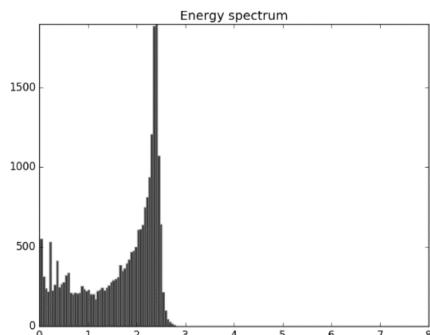
Портрет пучка



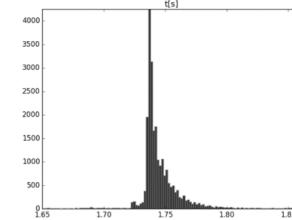
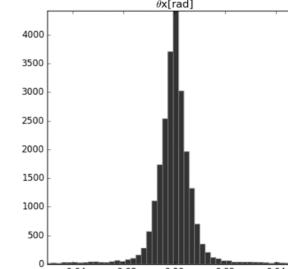
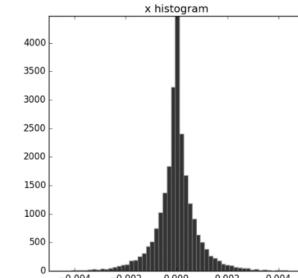
Фазовый портрет  
пучка в  
поперечной  
плоскости



Фазовый портрет  
пучка в  
продольной  
плоскости



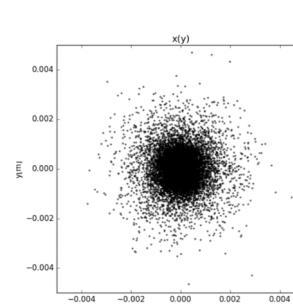
Энергетический спектр



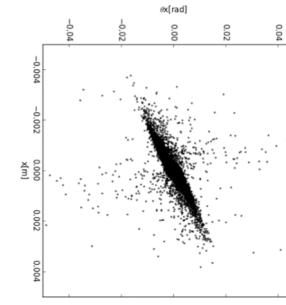
# Расчеты динамики пучка в ускоряющей структуре

Режим «облучение» - энергия 6 МэВ

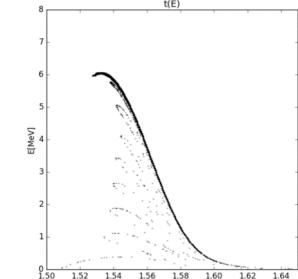
Характеристика	Значение
Доза для скважности 840, Гр/мин	10,5
Инжектируемые ток в структуру, мА	245
Ускоренный ток, мА	150
Коэффициент захвата, %	60
Среднеквадратичный радиус пучка, мм	0,7
Среднеквадратичная расходимость, мрад	8,2
Ширина энергетического спектра, кэВ	100
Затраты СВЧ мощности на создание поля, МВт	2,3
Импульсная мощность ускоренного пучка, МВт	0,9



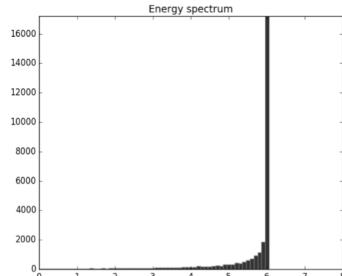
Портрет пучка



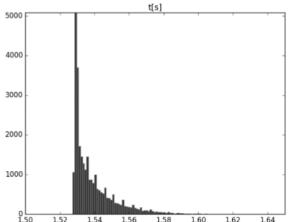
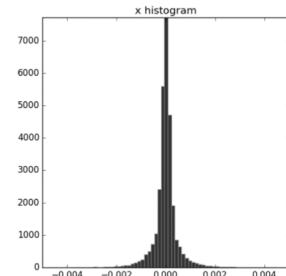
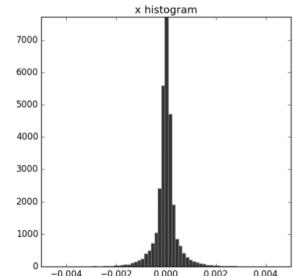
Фазовый портрет  
пучка в  
поперечной  
плоскости



Фазовый портрет  
пучка в  
продольной  
плоскости

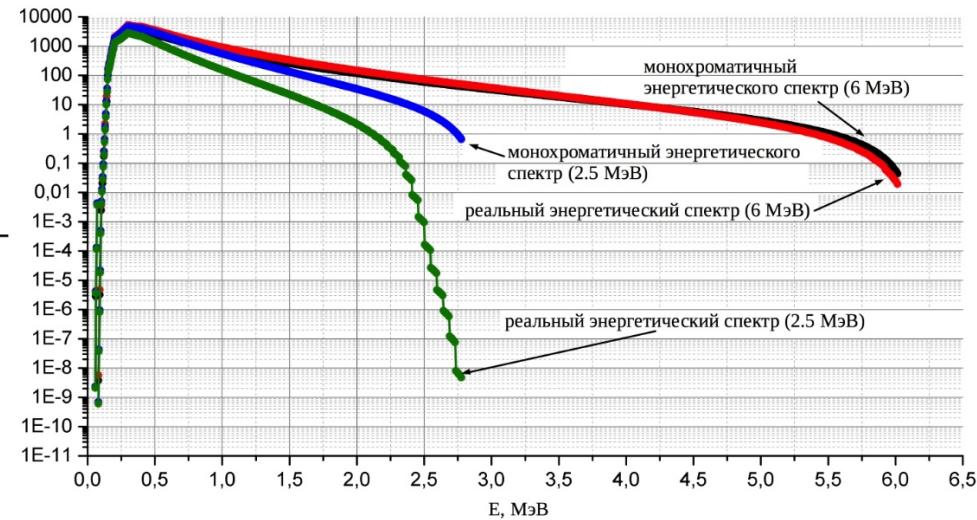


Энергетический спектр

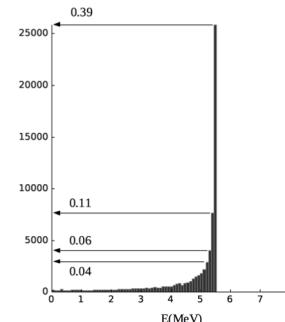


# Расчет характеристик спектра тормозного излучения

При вертикальном размещении ускоряющей системы на тормозную мишень попадают все частицы, вышедшие из ускорителя, включая частицы с энергией существенно отличающейся от энергии пика спектрального распределения электронов.

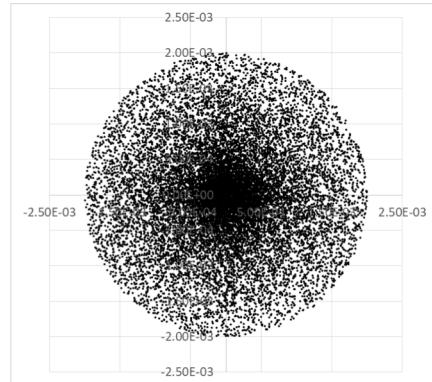


$S_{eff}(k) = \sum_{i=1}^{N_H} \alpha_i S(E_i, k)$   
 $S(E_i, k)$  – спектр тормозного излучения для монохроматического пучка электронов с энергией  $E_i$ , соответствующей  $i$ -му шагу гистограммы спектрального распределения электронов,  $k$  – энергия фотона,  $N_H$  – число разбиений гистограммы,  $\alpha_i$  – доля электронов с энергией  $E_i$  в спектральном распределении,  $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$

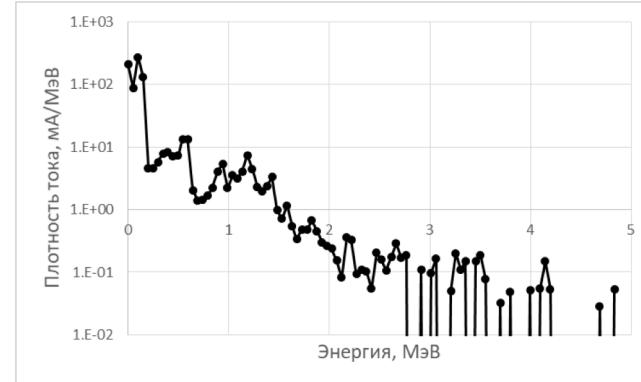


# Расчет обратной бомбардировки катода

При энергии 6 МэВ, токе инжекции около 240 мА, ток на выходе ускоряющей структуры составляет около 150 мА, потери тока – около 90 мА, из которых около 40 мА возвращается на катод. Импульсная тепловая мощность, выделяющаяся на катоде за счет эффекта обратной бомбардировки составляет около 8,8 кВт, импульсная мощность дозы тормозного излучения, генерируемого на катоде – около 4 Гр/мин. При скважности 840 средние значения тепловой мощности и мощности дозы составляют, соответственно 10 Вт и 4,8 мГр/мин.



Распределение частиц на катоде

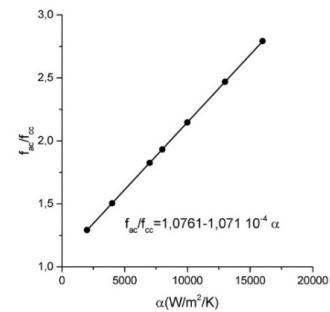
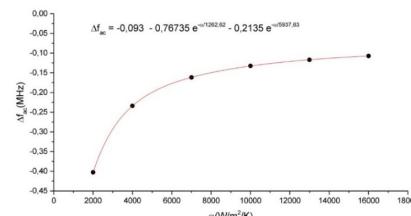


Спектр частиц, возвращающихся на катод

# Расчеты теплового режима работы ускорителя

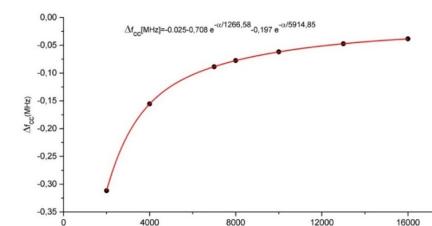
$\alpha$	Величина	Регулярная ячейка	Регулярная ячейка связи
2000 Вт/м <sup>2</sup> /°К	$\Delta T_{max}$ , К	4.82	
	VMS, МПа	0.00841	
	$\Delta z_{max}$ , мм	0.00076	
	$\Delta r_{max}$ , мм	0.00197	
	$\Delta f$ , МГц	-0.4027611	-0.3117545
4000 Вт/м <sup>2</sup> /°К	$\Delta T_{max}$ , К	3.16	
	VMS, МПа	0.00839	
	$\Delta z_{max}$ , мм	0.000243	
	$\Delta r_{max}$ , мм	0.000393	
	$\Delta f$ , МГц	-0.2340302	-0.1555515
8000 Вт/м <sup>2</sup> /°К	$\Delta T_{max}$ , К	2.33	
	VMS, МПа	0.0084	
	$\Delta z_{max}$ , мм	0.000285	
	$\Delta r_{max}$ , мм	0.000531	
	$\Delta f$ , МГц	-0.1495508	-0.07742
16000 Вт/м <sup>2</sup> /°К	$\Delta T_{max}$ , К	1.92	
	VMS, МПа	0.00839	
	$\Delta z_{max}$ , мм	0.000247	
	$\Delta r_{max}$ , мм	0.000393	
	$\Delta f$ , МГц	-0.10724	-0.03843

Зависимость сдвига частоты вследствие тепловых деформаций от коэффициента теплопередачи



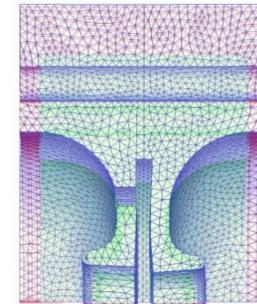
Отношения сдвигов частот

$$\Delta f_{ac2} = -0.093 - 0.767 \cdot e^{-\frac{\alpha}{1262.62}} - 0.214 \cdot e^{-\frac{\alpha}{5937.63}}$$



Ячейка связи

$$\Delta f_{cc2} = -0.025 - 0.708 \cdot e^{-\frac{\alpha}{1266.58}} - 0.197 \cdot e^{-\frac{\alpha}{5914.85}}$$



Тепловые деформации на сетке

# Алгоритм подстройки частоты

Расширение структуры за счёт нагрева охлаждающей её жидкости  
 $\Delta f_{ac} = \Delta f_{ac1} + \Delta f_{ac2}$

Деформации за счет мощности потерь в стенках  
 $\Delta f_{cc} = \Delta f_{cc1} + \Delta f_{cc2}$

Полный сдвиг частоты ускоряющей ячейки  
 $\bar{T} = \frac{T_{out} + T_{in}}{2}$

Полный сдвиг частоты ячейки связи  
 $T_{out} = T_{in} + \frac{\bar{P} + \bar{P}_b}{q\rho C}$

$\alpha \approx 3,72 \times 10^7 q^{0.8}$  для воды и 6-ти параллельных каналов охлаждения

где  $q$  - расход жидкости, определяемый по показаниям расходомера,  $\rho$  - плотность жидкости,  $C$  - ее теплоемкость,  $\bar{P}$  - полная средняя мощность СВЧ потерь в стенках ускоряющей структуры,  $\bar{P}_b$  - средняя мощность пучка. Здесь учитывается, что системы охлаждения ускоряющей структуры и тормозной мишени объединены.

$$\Delta f_{ac1} = -f_{0ac}\alpha_T \left( \frac{\bar{P} + \bar{P}_b}{2q\rho C} + T_{in} - T_0 \right) \quad f_{cc1} = -f_{0cc}\alpha_T \left( \frac{\bar{P} + \bar{P}_b}{2q\rho C} + T_{in} - T_0 \right)$$

Расчет полной средней мощности потерь в стенках на основании данных о энергии пучка + средней мощности пучка

Оценка сдвига за счет СВЧ потерь

Оценка сдвига частоты за счет свободного расширения структуры

Расчет общего сдвига

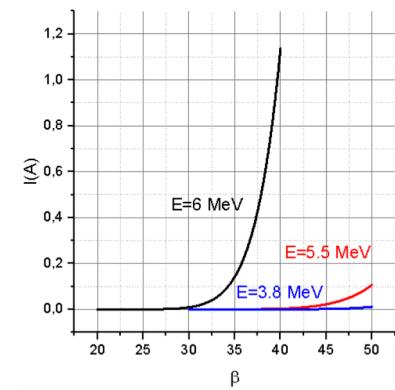
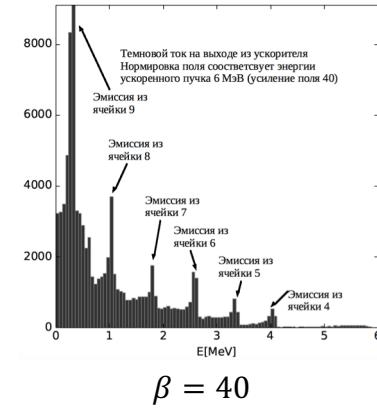
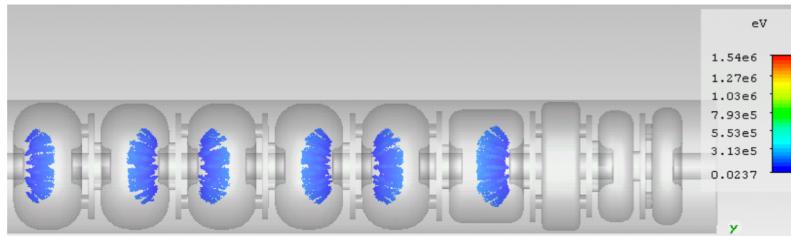
Сдвиг резонансной частоты

$$\bar{P} = \frac{10^3}{\nu} [0.05814E^2 - 0.08716E + 0.5395]$$

# Расчет характеристик темнового тока

Плотность тока эмиссии  $i(E_{surf})$ ,  $\phi$  – работа выхода в эВ,  $A_{FN} = 1.54 \cdot 10^{-6}$  в эВ  $A/(B)^2$ ,  $B_{FN} = 6830 \cdot 10^6$  в В/м(эВ) $^{3/2}$ ,  $\beta$  – фактор усиления (2),  $\phi = 4.6$  эВ (для меди),  $E_{calc}$  – напряжённость электрического поля для идеальной поверхности ячейки,  $E_{real}$  – напряжённость электрического поля с учётом шероховатости поверхности

$$(E_{surf}) = \frac{A_{FN}(\beta E_{surf})^{2.5}}{\phi} \exp\left\{-\frac{B_{FN}\phi^{3/2}}{\beta E_{surf}}\right\} \quad \beta = \frac{E_{real}}{E_{surf}}$$

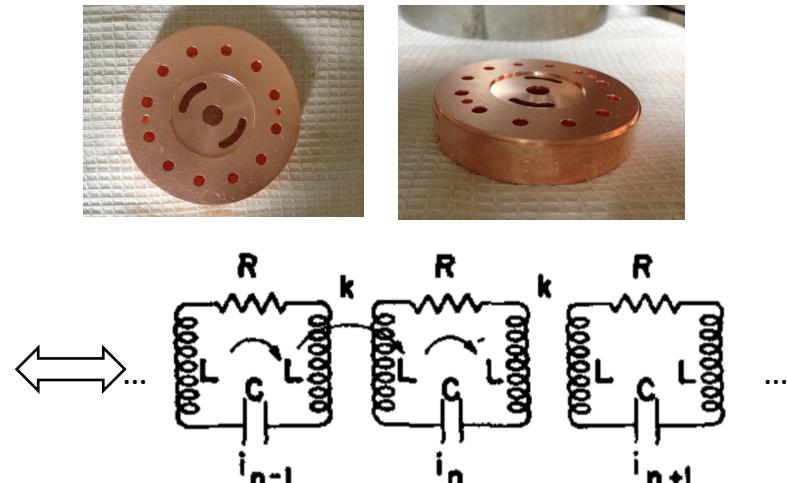
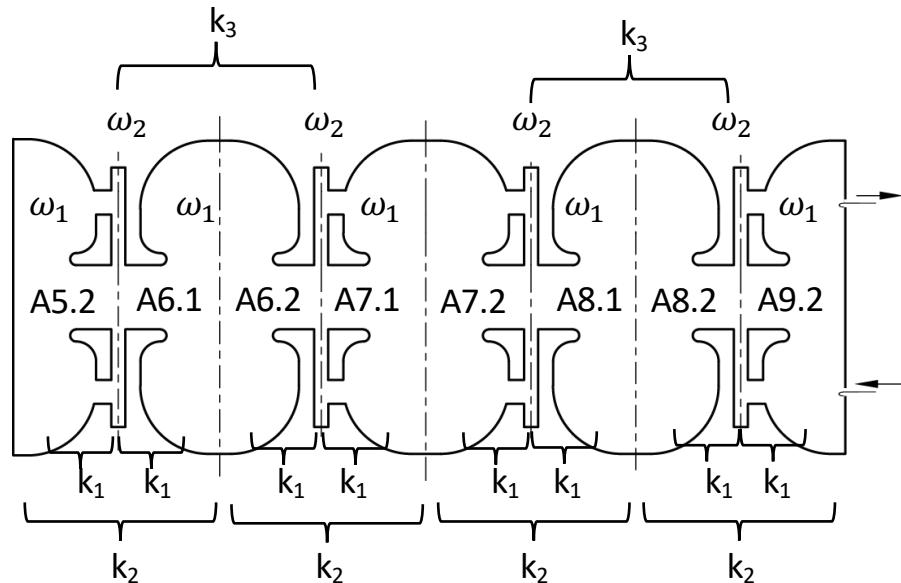


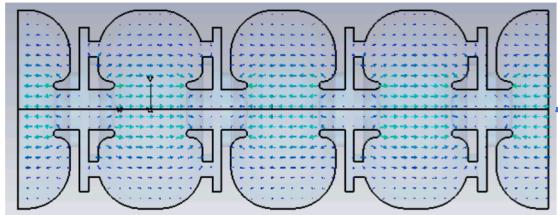
Из расчётов следует:

- 1) По спектру для энергии 6 МэВ можно определить из каких ячеек происходит эмиссия частиц.
- 2) По значению темнового тока можно определить фактор усиления поля
- 3) Эмиссия темнового тока происходит из области носиков, следовательно, улучшение качества обработки поверхности позволит значительно снизить эмиссионный ток
- 3) В случае низких энергий (менее 3.8 МэВ) эмиссией темнового тока можно пренебречь.

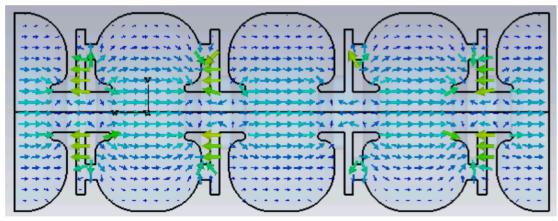
# Настройка регулярных ячеек

Метод 1. Измерения дисперсионной кривой.

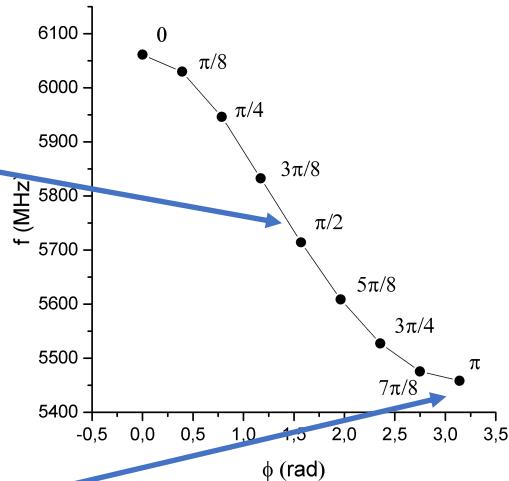




Мода  $\varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos(2n\varphi) = \cos(n\pi)$   
 $n=0,2,4,6,8 \Rightarrow X_{0,2,4,6,8} = A$   
 $\cos((2n+1)\varphi) \Rightarrow n=1,3,5,7 \Rightarrow X_{1,3,5,7} = 0$



$\pi$ -мода  
Ускоряющие ячейки  $X_n = A \cos(2n\varphi) = A \cos(2n\pi)$ ,  $n = 0, 2, 4, 6, 8 \Rightarrow X_{0,2,4,6,8} = A$   
Ячейки связи  
 $X_n = B \cos((2n+1)\varphi) = B \cos((2n+1)\pi)$ ,  $n = 1, 3, 5, 7 \Rightarrow X_{1,3,5,7} = -B$



$$f_{acc,\pi/2} = \frac{\omega_1}{\sqrt{1-k_2}}$$

$$f_{cc,\pi/2} = \frac{\omega_2}{\sqrt{1-k_3}}$$

$$k_1^2 \cos^2 \varphi = \left(1 + k_2 \cos 2\varphi - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right) \left(1 + k_3 \cos 2\varphi - \frac{\omega_2^2}{\omega^2}\right)$$

DISPER  $\Rightarrow k_1 = -0.102$ ,

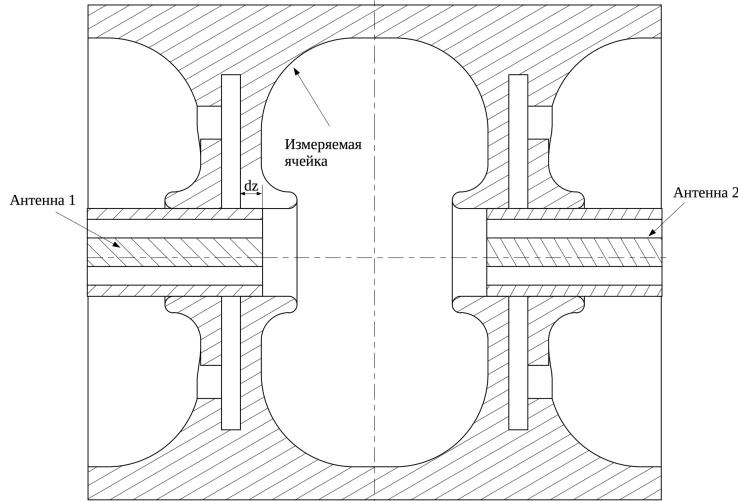
$$k_2 = 0.00507, k_3 = -0.0133 \Rightarrow f_{acc,\pi/2} = f_a \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-k_a}}\right) \approx \textcolor{red}{-14 \text{ МГц}}$$

$$\delta f_{c,\pi/2} = f_c \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-k_c}}\right) \approx \textcolor{red}{+38 \text{ МГц}}$$

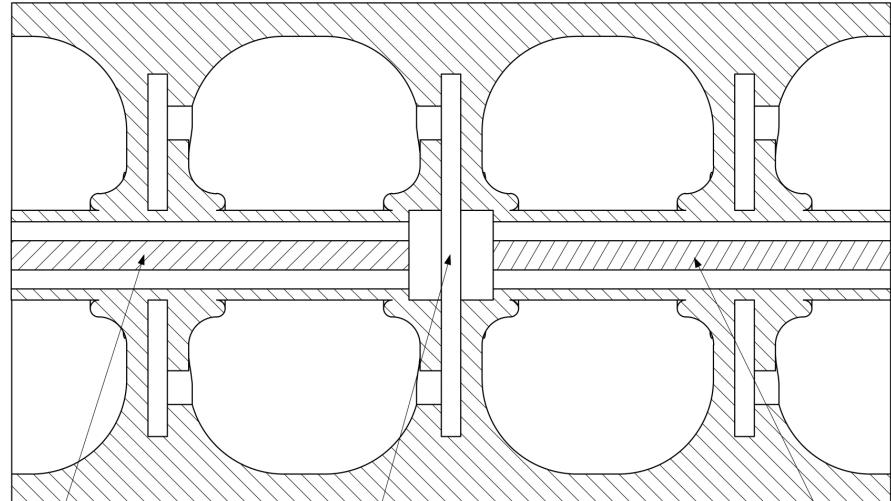
# Настройка регулярных ячеек

## Метод 2. Измерения частот $\pi/2$ колебаний

Измерения ускоряющих ячеек



Измерения ячеек связи

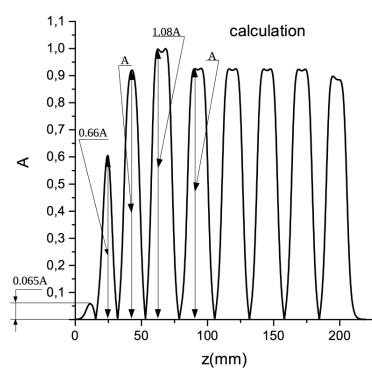


систематический сдвиг частоты рабочего колебания  
составляет **-4 МГц**, а частоты колебания связи **+26 МГц**

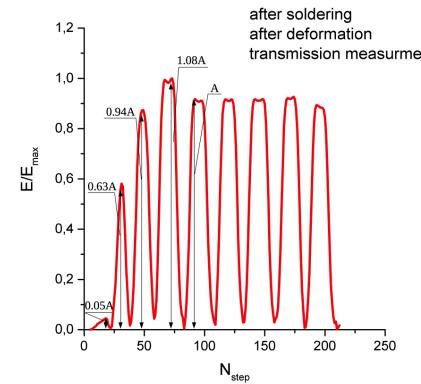
# Измерения распределения поля



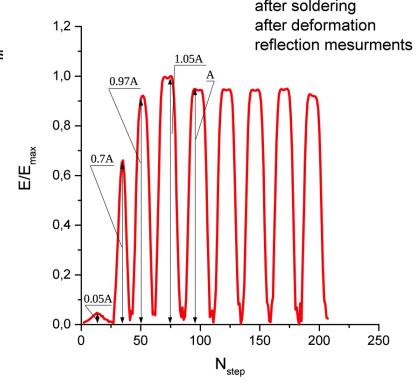
Структура после пайки



Расчетное распределение поля



Измерение по  $S_{11}$

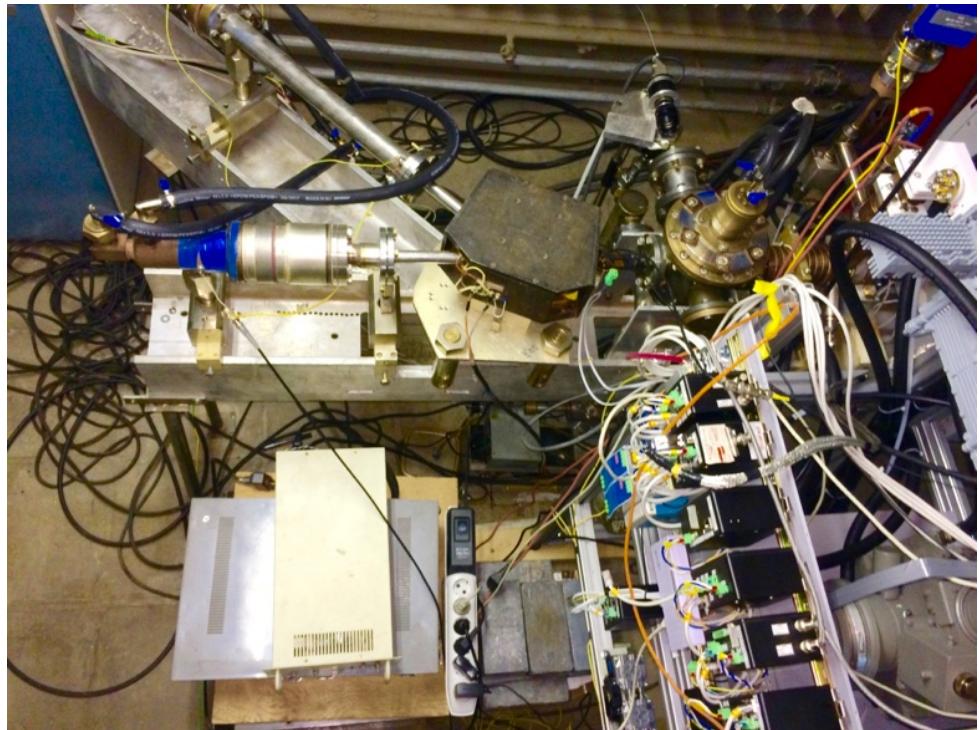
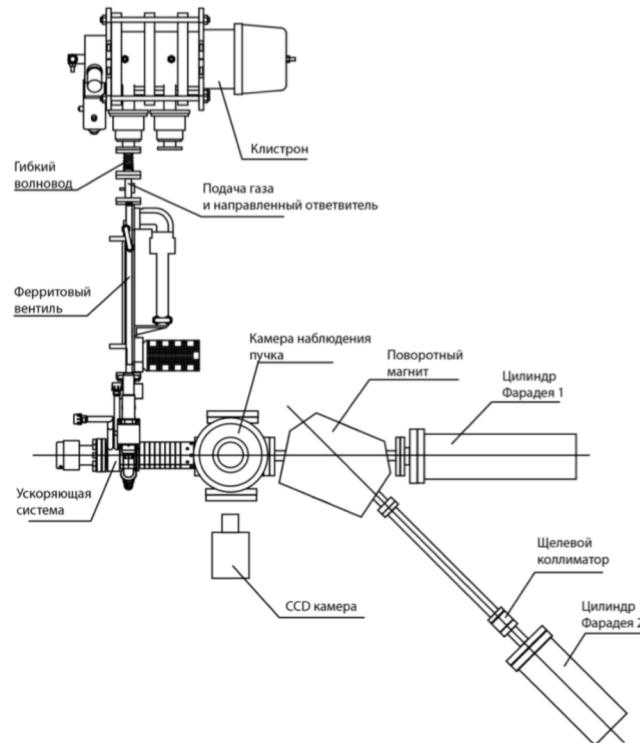


Измерение по  $S_{21}$

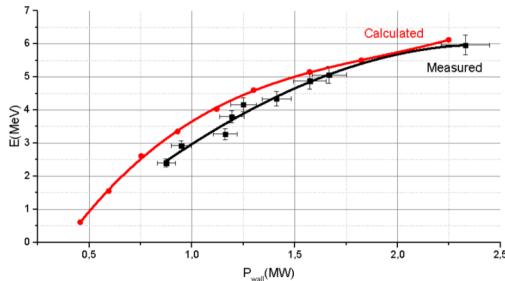
$$kE_z^2 = \frac{1}{Q_L} \sqrt{\frac{|S_{11}|^2 - \left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right)^2}{1 - |S_{11}|^2}}$$

$$kE_z^2 = \frac{f_\pi t g(\delta\varphi)}{2Q_L}$$

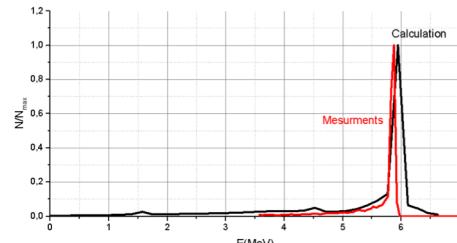
# Экспериментальное исследование характеристик пучка от ускорителя



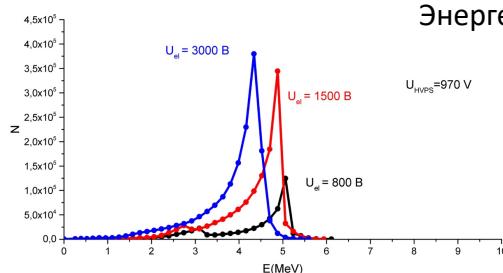
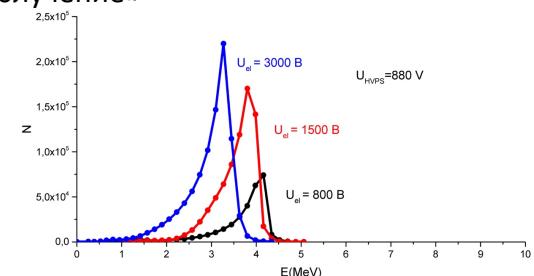
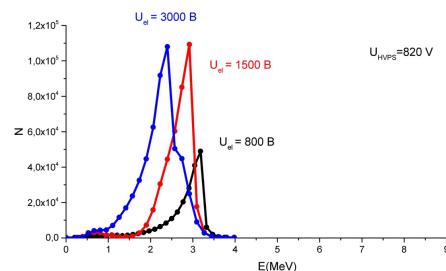
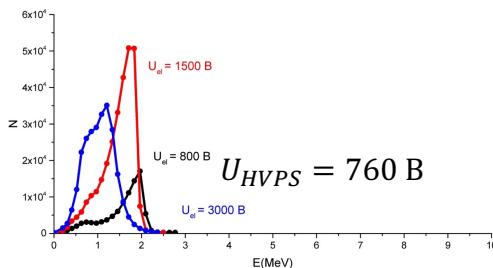
# Измерения энергетического спектра



Зависимость энергии пучка от мощности потерь в стенках



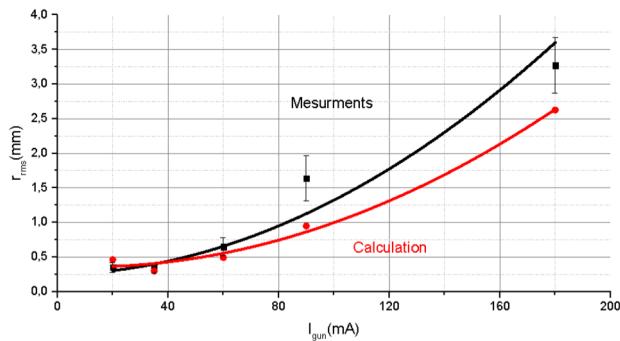
Энергетический спектр режим «облучение»



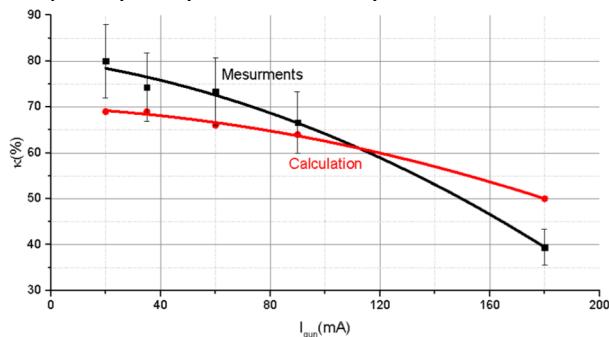
Энергетические спектры для низкой мощности

$$E = \sqrt{(RBc^2)^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2$$

# Измерения портрета пучка

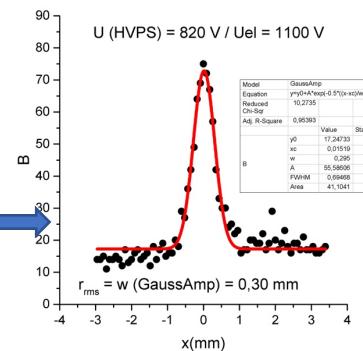
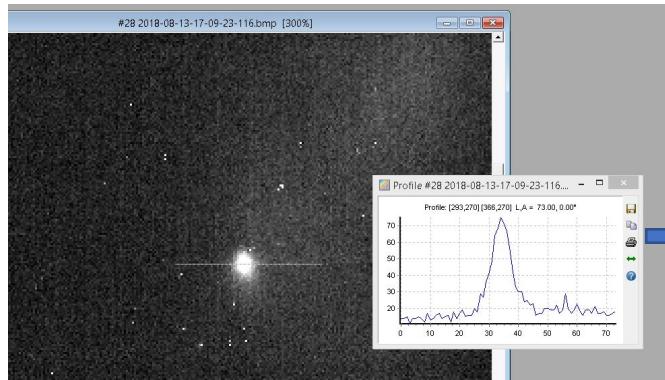
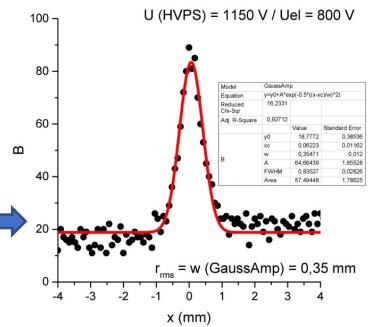
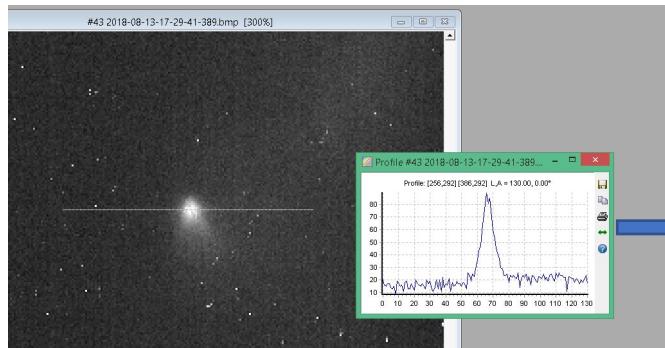


Зависимость среднеквадратичного радиуса пучка от тока пушки

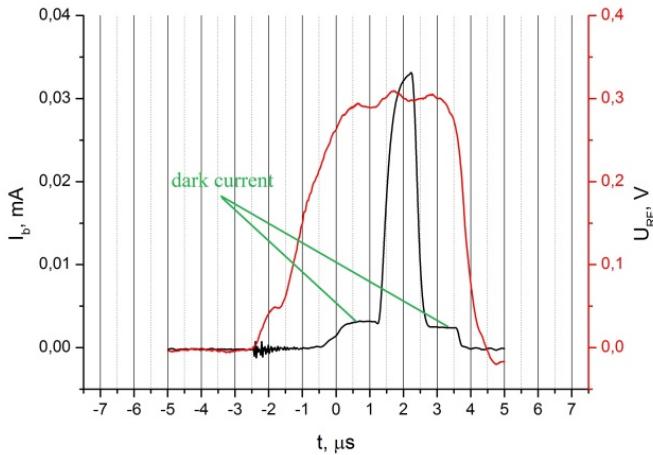


Зависимость коэффициента захвата от тока пушки

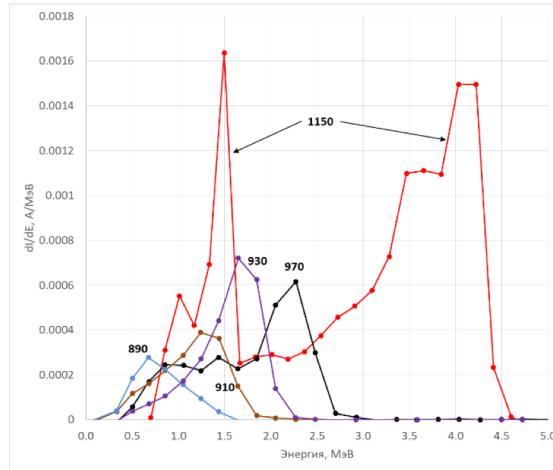
Фотография пучка



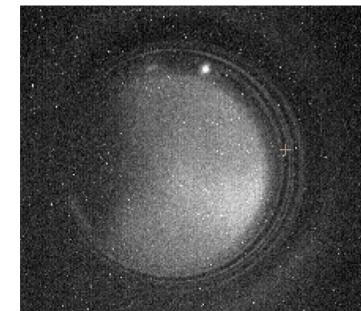
# Измерения характеристик темнового тока



Импульсы огибающей ускоряющего поля (красный) и тока пучка на прямом цилиндре Фарадея (черный) при длительности импульса тока пушки 1 мкс и его сдвиге относительно начала СВЧ импульса 3 мкс.

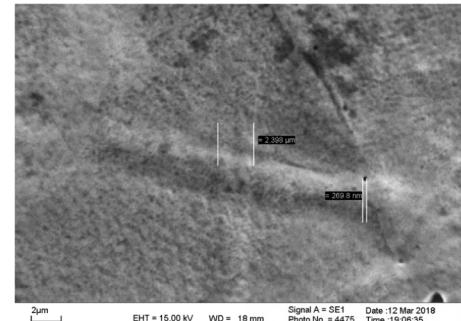


Спектры темнового тока

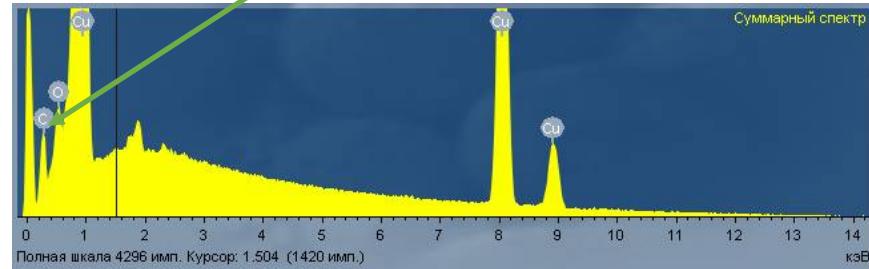
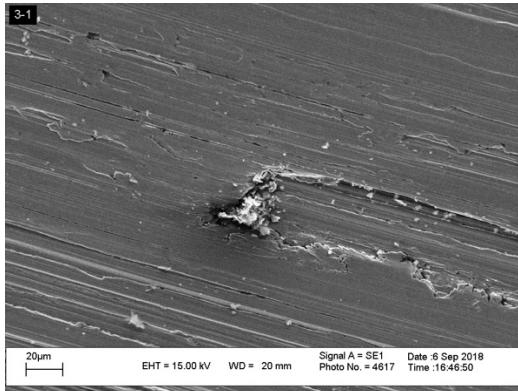


Фотография  
пролетного канала

# Исследование качества обработки поверхности и способы ее улучшения

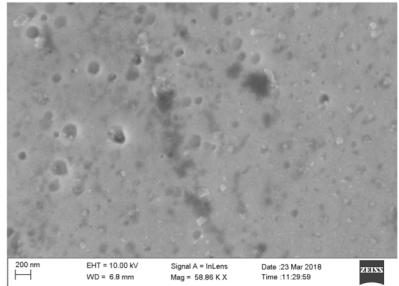


Фотографии под микроскопом LEO-1455

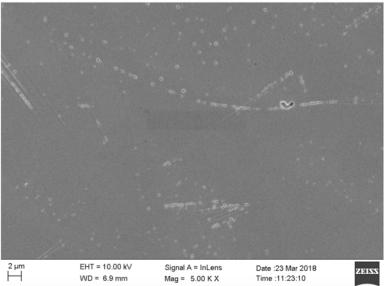


Алмазная шкурка оставляет царапины на поверхности носика => требуется изменение технологии настройки ячеек ускоряющей структуры

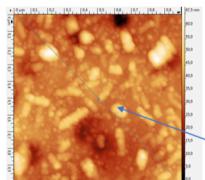
# Полировка поверхности пучком газовых кластерных ионов



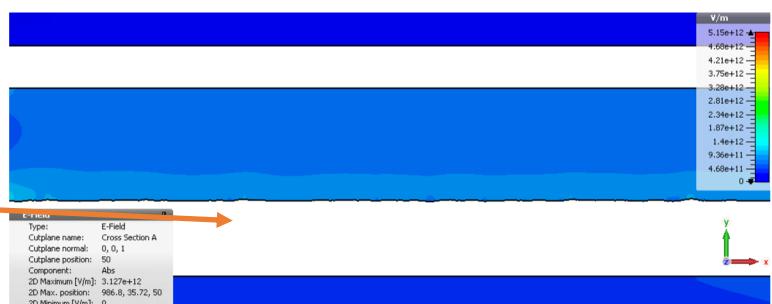
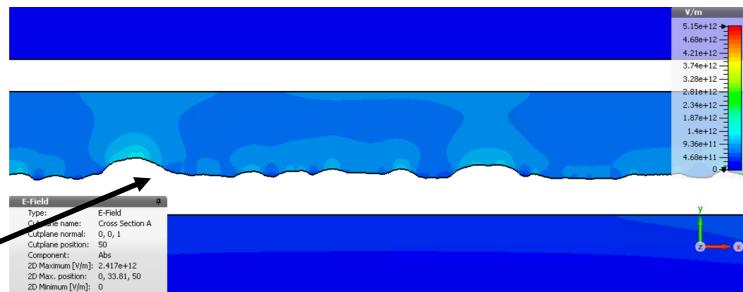
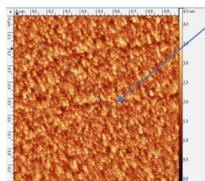
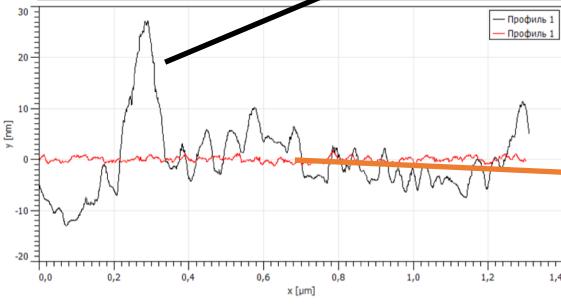
Необлученная поверхность



Облученная поверхность



Линия профиля



Уменьшение фактора усиления поля в два раза =>  
эмиссия темнового тока упадет на порядки

# Научные результаты

- Рассчитана динамика пучка электронов в компактном линейном ускорителе электронов С-диапазона с высоким темпом набора энергии, предназначенном для генерации тормозного излучения с граничной энергией, переключаемой между значениями 2.5 МэВ и 6 МэВ для стереотаксической и трёхмерной конформной лучевой терапии в статическом и ротационном режиме. Оптимизирована ускоряющая структура и электронная пушка, обеспечивающие формирование пучка электронов с проектными характеристиками. Рассчитан эффект обратной бомбардировки катода. Рассчитаны характеристики тормозного излучения с учётом энергетического спектра электронов.
- Выполнены расчеты теплового режима ускоряющей структуры, работающей в условиях высокого уровня СВЧ потерь на единицу длины.
- Разработана методика холодных измерений и настройки ускоряющей структуры С-диапазона, проведена настройка нескольких образцов структуры.
- Разработаны стенды и методики измерения характеристик ускоренного электронного пучка и пучка тормозного излучения. Проведены измерения энергетических спектров электронного пучка, значения верхней границы и мощности дозы тормозного излучения для различных режимов работы ускорителя.
- Проведены исследования темновых токов, включающие численное моделирование, измерения спектров и мощности дозы тормозного излучения, генерируемого темновыми токами. Разработаны рекомендации по выбору режима работы ускорителя в процессе облучения с целью снижения мощности дозы темнового тока.

# Научная новизна

Впервые разработана компактная ускоряющая система С-диапазона для медицинского ускорителя с высоким темпом набора энергии, обеспечивающая генерацию тормозного излучения как в режиме сообщения терапевтической дозы со значением верхней границы тормозного спектра 6 МэВ, так и в режиме получения портального изображения с энергией 2.5 МэВ.

# Практическая значимость

На основе выполненных в настоящей диссертационной работе расчётов и экспериментальных исследований был разработан компактный линейный ускоритель электронов С-диапазона, предназначенный для генерации тормозного излучения с граничной энергией, переключаемой между значениями 2.5 МэВ и 6 МэВ для стереотаксической и трёхмерной конформной лучевой терапии в статическом и ротационном режимах. Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при разработке и создании новых компактных ускорителей электронов.

# Публикации.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, 4 из которых в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, и в изданиях из перечня, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

# Статьи в журналах.

- Ovchinnikova L.Y., Shvedunov V.I. Calculation of electron-beam dynamics in a c-band accelerator for a radiotherapy complex // Moscow University Physics Bulletin. — 2018. — Vol. 73, no. 6. — P. 599–604. [25]
- Овчинникова Л.Ю., Шведунов В.И. Влияние энергетического спектра пучка электронов на оценку его энергии методом ослабления тормозного излучения поглощающим барьером // Учёные записки физического факультета Московского Университета. — 2018. — № 1. — С. 1810202–1–1810202–4. [26]
- Бондаренко Т.В., Полихов С.А., Смирнов В.П., Курилик А.С., Овчинникова Л.Ю. Расчёт дозового распределения в области гантри комплекса лучевой терапии // Атомная энергия. — 2018. — Т. 125, № 5. — С. 296–301. [27]
- Родько И.И., Сарычев Г.А., Балакирев П.В., Бондаренко Т.В., Дергачева И.Л., Евтеев А.С., Ковалев С.Н., Колосков С.А., Крылова Т.А., Лобжанидзе Т.К., Полихов С.А., Смирнов В.П., Шарков Г.Б., Горлачев Г.Е., Гулидов И.В., Иванов С.А., Каприн А.Д., Романко Ю.С., Хмелевский Е.В., Овчинникова Л.Ю., Шведунов В.И., Шведунов Н.В., Чередниченко Д.В. Разработка комплекса лучевой терапии на основе линейного ускорителя электронов энергией 6 МэВ и конусно-лучевого компьютерного томографа // Атомная энергия. — 2018. — Т. 125, № 5. — С. 292–295. [28]

# Статьи в сборниках.

- Ovchinnikova L., Shvedunov V.I. Design of C-band Electron Linear Accelerator for a Complex of Radiation Therapy // Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), Beijing, China, 16-21 September 2018. — Vol. 29 of Linear Accelerator Conference. — JACoW Publishing Geneva, Switzerland, 2018. — P. 549–551. [29]
- Yurov D.S., Alimov A.S., Ermakov A.N., Khankin V.V., Ovchinnikova L.Yu., Shvedunov N.V., Shvedunov V.I., Simonov A.S. Beam Parameters Measurement of C-band 6 MeV Linear Electron Accelerator // Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), Beijing, China, 16-21 September 2018. — Vol. 29 of Linear Accelerator Conference. — JACoW Publishing Geneva, Switzerland, 2018. — P. 133–135. [30]
- Ermakov A.N., Alimov A.S., Ovchinnikova L.Yu., Kamanin A.N., Khankin V.V., Pakhomov N.I., Shvedunov N.V., Shvedunov V.I., Yurov D.S., Shvedunov I.V., Simonov A.S. Linacs for Industry, Cargo Inspection and Medicine Designed by Moscow University // Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), Beijing, China, 16-21 September 2018. — Vol. 29 of Linear Accelerator Conference. — JACoW Publishing Geneva, Switzerland, 2018. — P. 130–132. [31]

# Доклады на научных конференциях

- Овчинникова Л.Ю. Расчёты линейного электронного ускорителя С-диапазона // Ломоносовские чтения - 2016, МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 18-27 апреля 2016.
- Алимов А.С., Овчинникова Л.Ю., Шведунов В.И., Юров Д.С. Результаты измерения и настройки ускоряющей структуры С-диапазона // Ломоносовские чтения - 2017, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 17-26 апреля 2017.
- Ермаков А.Н., Овчинникова Л.Ю., Шведунов В.И. Результаты проведения пусковых работ ускорителя С-диапазона для мобильного инспекционно-досмотрового комплекса // Ломоносовские чтения-2018, секция "Ядерная физика", МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 16-24 апреля 2018.
- Овчинникова Л.Ю., Шведунов В.И. Разработка линейного ускорителя для комплекса лучевой терапии // Ломоносовские чтения-2018, секция "Ядерная физика", МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 16-24 апреля 2018.
- Ovchinnikova L., Shvedunov V.I. Design of C-band Electron Linear Accelerator for a Complex of Radiation Therapy // 29th Linear Accelerator Conference LINAC18, Beijing, Китай, 16-21 сентября 2018.
- Yurov D.S., Alimov A.S., Ermakov A.N., Khankin V.V., Ovchinnikova L.Yu., Shvedunov N.V., Shvedunov V.I., Simonov A.S. Beam Parameters Measurement of C-band 6 MeV Linear Electron Accelerator // 29th Linear Accelerator Conference LINAC18, Beijing, Китай, 16-21 сентября 2018.
- Ermakov A.N., Alimov A.S., Ovchinnikova L.Yu., Kamanin A.N., Khankin V.V., Pakhomov N.I., Shvedunov N.V., Shvedunov V.I., Yurov D.S., Shvedunov I.V., Simonov A.S. Linacs for Industry, Cargo Inspection and Medicine Designed by Moscow University // 29th Linear Accelerator Conference LINAC18, Beijing, Китай, 16-21 сентября 2018.

Спасибо за внимание!