



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**



**Разработка ускоряющего резонатора для участка средней
энергии в интенсивном линейном ускорителе ионов
водорода.**

По материалам диссертационного исследования

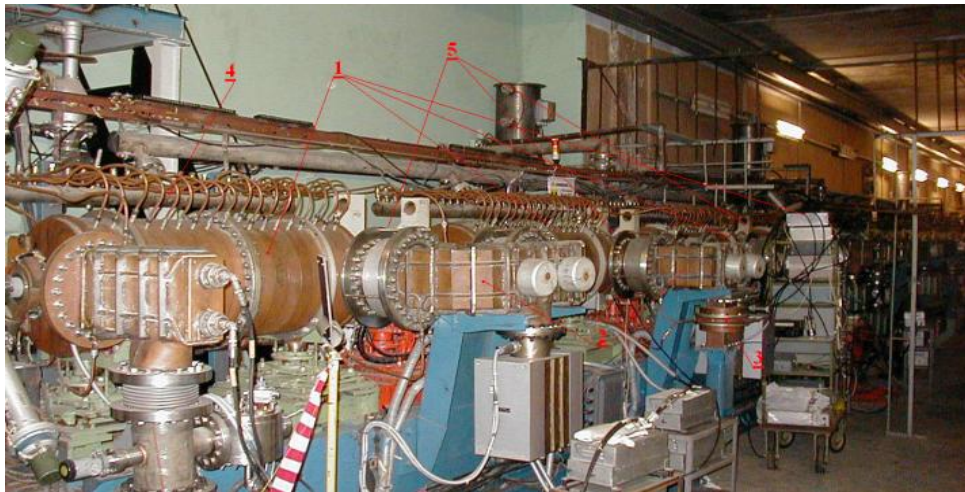
Рыбаков И.В., аспирант 4 года обучения

Научный руководитель д.ф.-м.н.

Парамонов В.В.

Москва 2019

Первый резонатор основной части ЛУ ИЯИ РАН

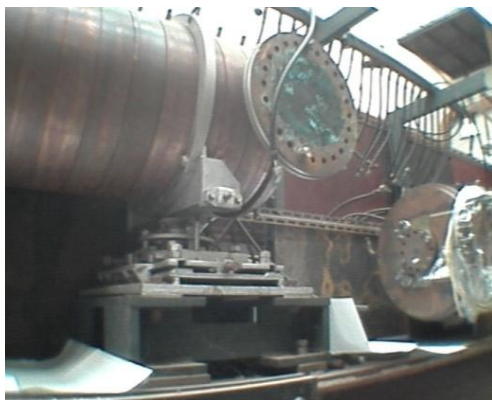


1 – ускоряющая секция, 2 – мостовые устройства, 3 – ВЧ-ввод, 4 – фокусирующие системы

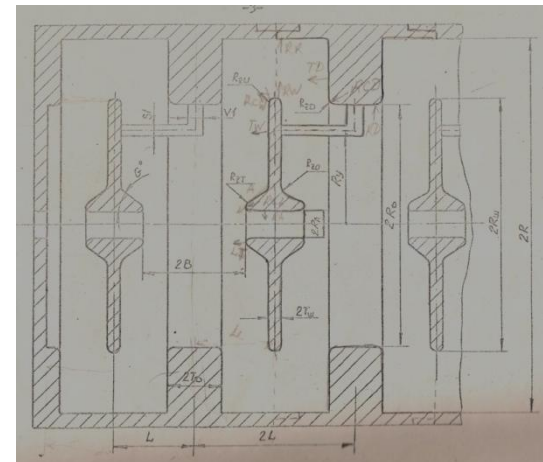
Первый резонатор ЛУ ИЯИ РАН состоит из четырех секций УСШД, рассчитанных на $\beta = 0,4313 - 0,4489$. В свою очередь каждая секция состоит из 18 – 21 периодов структуры. Темп ускорения 2,5 МВ/м.

Проектный импульсный ток пучка 50 мА, частота 100 Гц, длительность импульса 200 мкс.

Текущее состояние структуры



Чертеж РТИ РАН





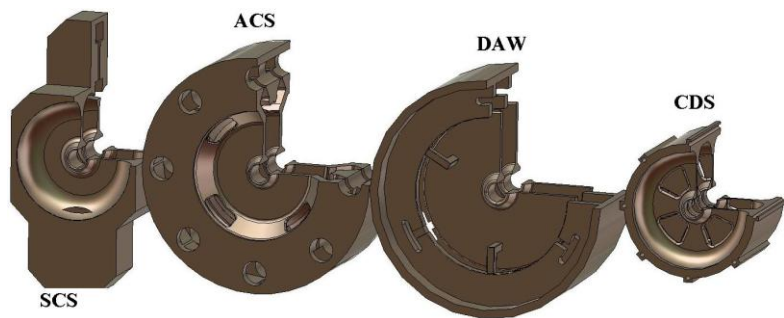
Задачи, поставленные на исследование



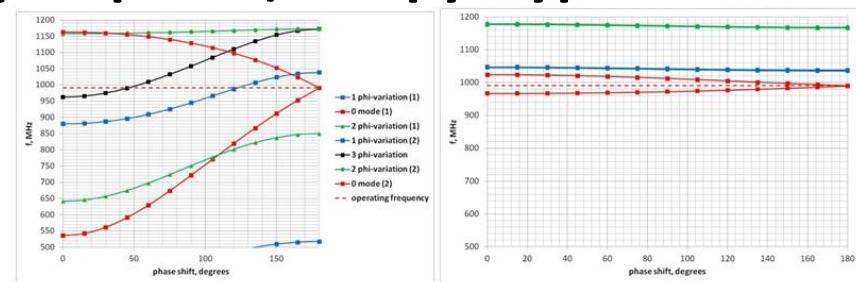
1. Сравнить электродинамические характеристики ускоряющих структур, применимых для первого резонатора основной части. Исследовать комплекс аспектов ВЧ эффективности, электрической прочности, термомеханических эффектов для выбранных структур. Обосновать выбор структуры, наиболее подходящей для применения в первом резонаторе основной части.
2. Рассмотреть возможность унификации размеров ячеек секций.
3. Оценить возможность возникновения мультипакторного разряда в ячейках. В случае его наличия предложить способ подавления.
4. Оценить необходимые допуски изготовления резонатора.
5. Разработать методику настройки рабочей частоты секций до и после пайки.
6. Разработать оптимальный узел соединения секций с мостовыми устройствами.



Сравнение возможных ускоряющих структур

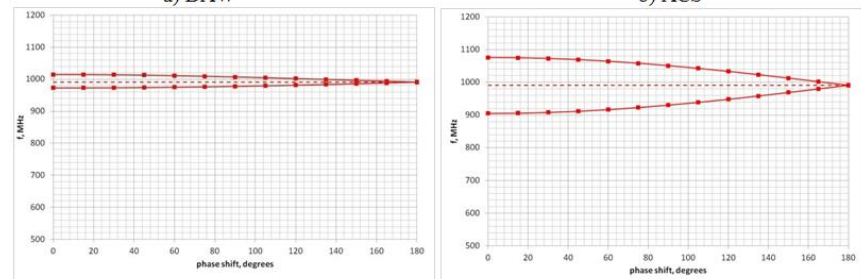


Общий вид структур



a) DAW

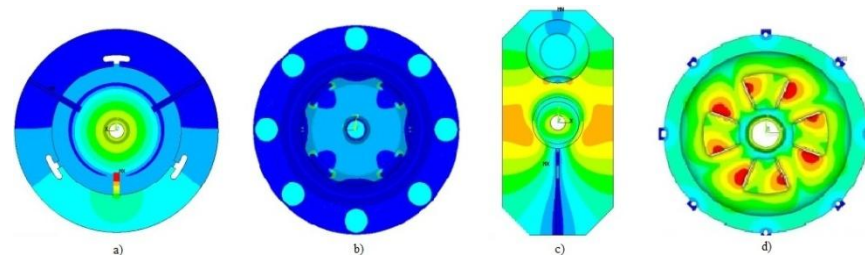
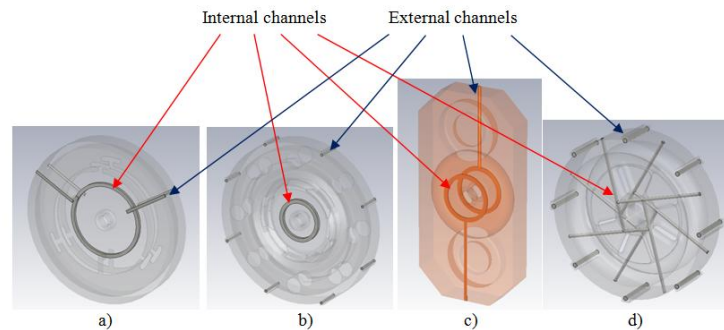
b) ACS



c) SCS

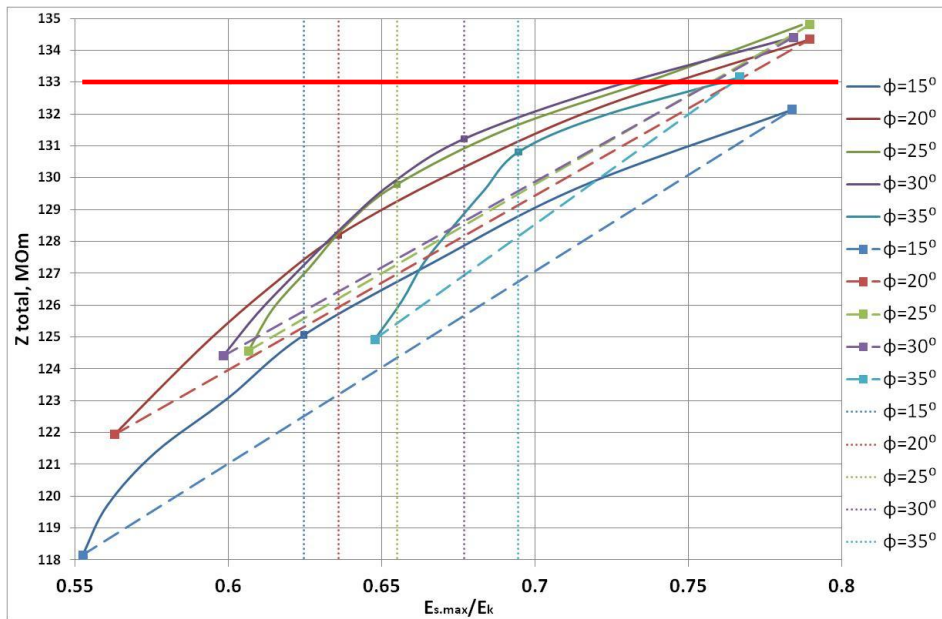
d) CDS

Дисперсионные характеристики



Параметр	УСЦД	ACS	SCS	CDS
Раб. частота, МГц	991,000			
Поперечный размер, мм	430,14	405,35	465,74	211,54
$K_{св}$	0,52	0,05	0,04	0,16
$R_{ш.эфф.} / \text{МОМ/м}$	23,65	28,67	30,04	25,64

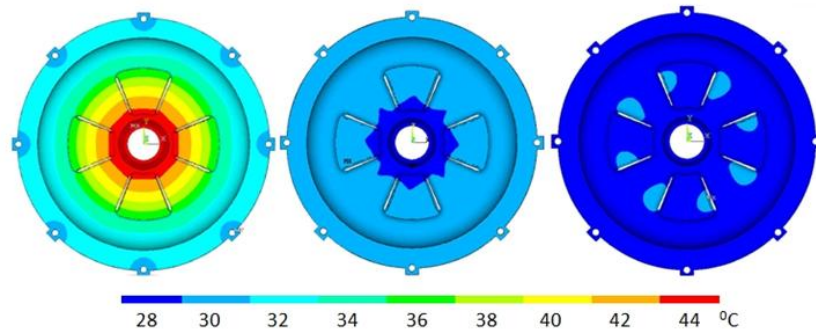
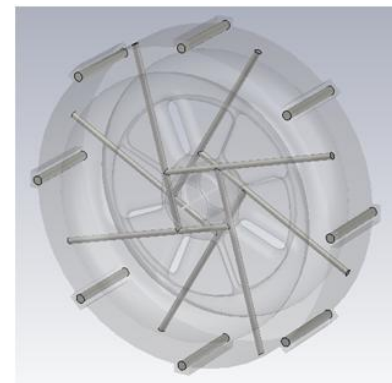
Тепломеханические процессы



Зависимости полного шунтового сопротивления резонатора от отношения максимального значения напряженности электрического поля к пределу Килпатрика, который для частоты 991 МГц составляет 28,508 МВ/м. Эти зависимости построены для наборов параметров трубки дрейфа, позволяющих получить наибольшие значения полного шунтового сопротивления резонатора из четырех секций. ϕ – угол раскрытия трубки дрейфа.

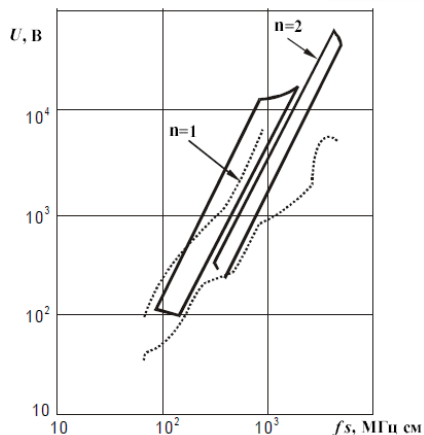
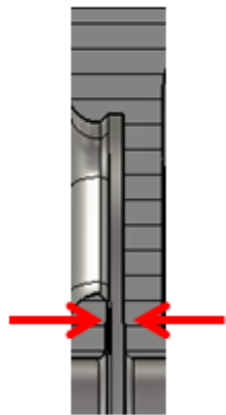
Расчетное значение полного шунтового сопротивления для УСШД – 133,02 МОм

Выбор каналов охлаждения



а) внешние каналы б) внутренние каналы в) внутренние и внешние каналы

Аналитическая оценка



Плоский зазор ячейки связи

Диаграмма напряжений для возникновения МП

$$U = 4\pi^2 (fs)^2 \frac{m}{e} \left(\frac{1 + K_v}{1 - K_v} \pi n \cos \psi + 2 \sin \psi \right)^{-1}$$

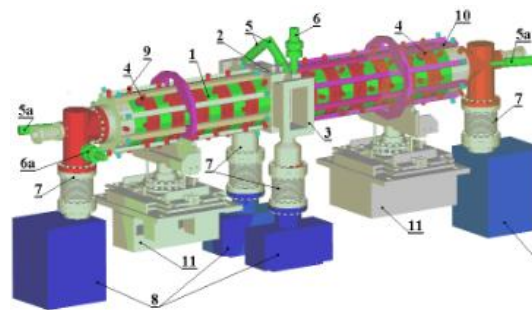
где K_v – отношение скорости первичного электрона к скорости вторичного, ψ – фаза ЭМ поля вылета вторичных электронов.



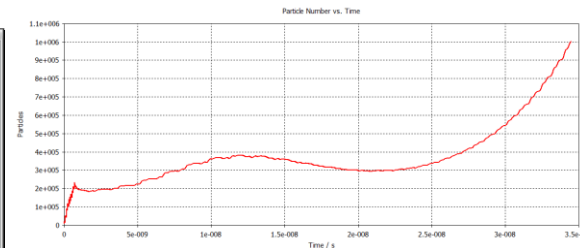
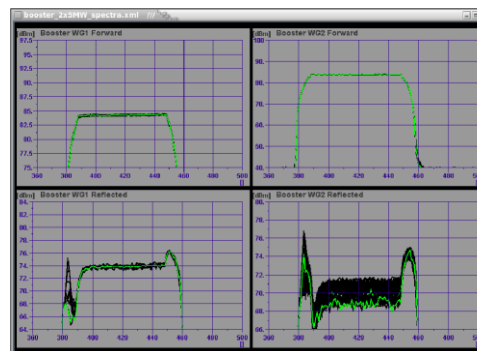
Электронная лавина в плоском зазоре CDS, численное моделирование

Калибровка аналитической оценки и численного метода

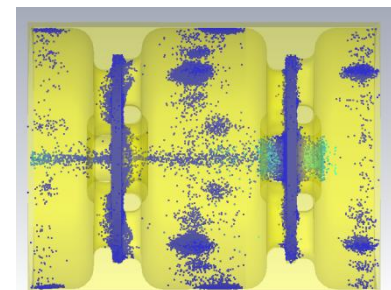
На установке PITS в Цойтене, Германия



CDS booster
14 периодов
 $E_0 T = 12 \text{ MB/m}$



Результаты численного моделирования и аналитической оценки, показывающие наличие МП на уровне $E_0 T$ до 6 MB/m, подтверждены экспериментально



Аналитическая оценка и численное моделирование показывают наличие МП в структуре CDS для ЛУ ИЯИ РАН на рабочем уровне ускоряющего градиента 2,5 MB/m.



Мультипактор в структуре CDS для ЛУ ИЯИ РАН – способы подавления

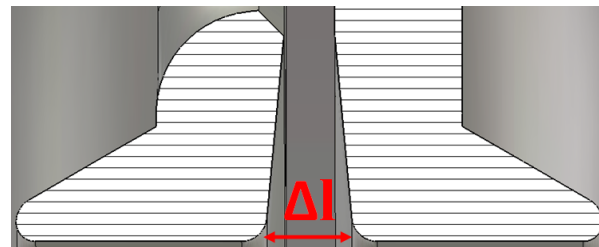


Увеличение напряжения в зазоре выше уровня МП: введение знакопеременной расстройки соседних ускоряющих ячеек.

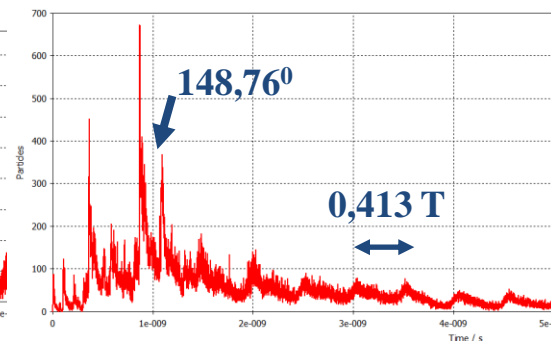
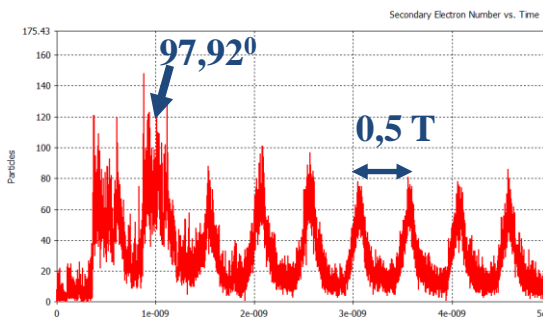
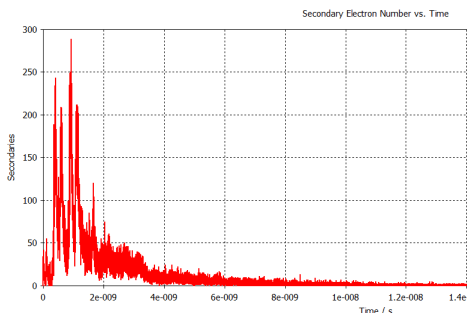
$$\Delta\omega = \frac{k * K_c * \omega_0}{4} = \pm 1,2 \text{ МГц}$$

Это приводит к усложнению настройки структуры до пайки.

Нарушение резонанса в движении электронов внутри зазора: изменение геометрии зазора ячеек связи



Увеличение Δl



Предложена методика подавления МП путем нарушения резонансного условия движения электронов внутри зазоров ячеек связи. Ее преимуществом является отсутствие необходимости индивидуальной настройки полу ячеек секций с учетом знакопеременной расстройки.

Две рассмотренные методики теряют эффективность при увеличении коэффициента вторичной эмиссии. Для существенного снижения КВЭ может быть использовано нанесение покрытий из золота.

$$\sigma_E^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}{N}$$

$$\sigma_E^2 = \sigma_{E_f}^2 + \sigma_{E_k}^2$$

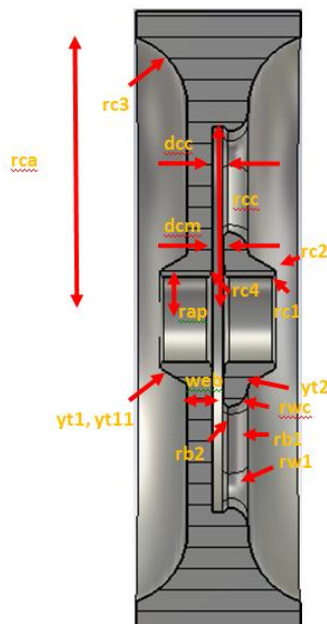
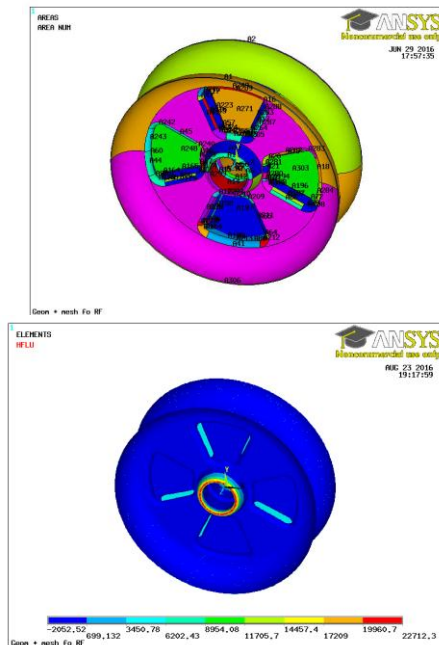
$$\sigma_{E_f}^2 \approx \frac{16\sigma_{f_a}^2}{k_c^4} \left(\sigma_{f_c}^2 \frac{N_p^3 + 4N_p^2 + 6N_p}{12} + \left(\frac{\delta f}{f_a}\right)^2 \frac{N_p^3 + 4N_p^2 + 6N_p}{3} \right)$$

$$\sigma_{E_k}^2 = \sigma_{k_c}^2 \frac{N_p + 2}{3}$$

Возмущение в ЭМ поле, вносимое отклонением частоты и коэффициента связи, определяется для всех геометрических параметров. Отклонение в частотах ускоряющей моды и моды связи определяется через интеграл поля по поверхности структуры и энергию, запасенную в колебаниях.

$$\frac{\delta f_a}{\delta x_i} = \frac{\int S_i (\epsilon_0 \vec{E}_{a,c}^2 - \mu_0 \vec{H}_{a,c}^2) d\vec{S} \Delta x_i}{4W_{a,c}}$$

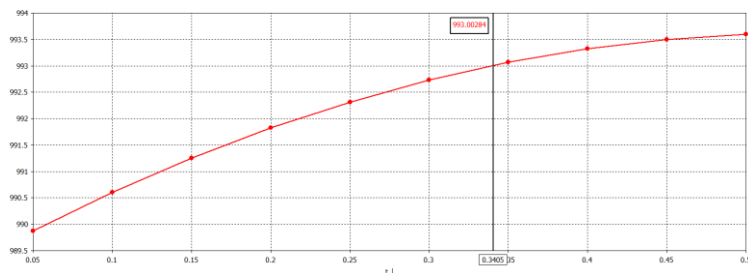
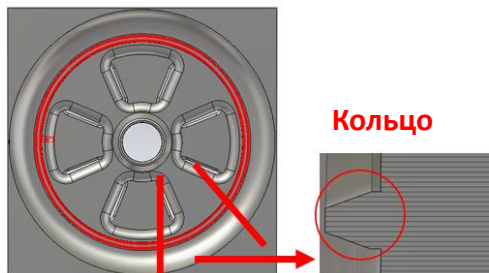
Численное моделирование



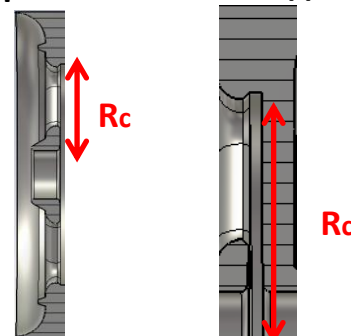
Допуск, мкм	σ_E
30	1,4750E-3
50	2,5261E-3
80	4,2951E-3

В структуре CDS ИЯИ РАН использование допусков в 30 мкм позволяет обеспечить величину дисперсия ускоряющего электрического поля не более 1% при допустимой полосе запираания порядка 200 КГц.

Кольцо для настройки частоты ускоряющей моды

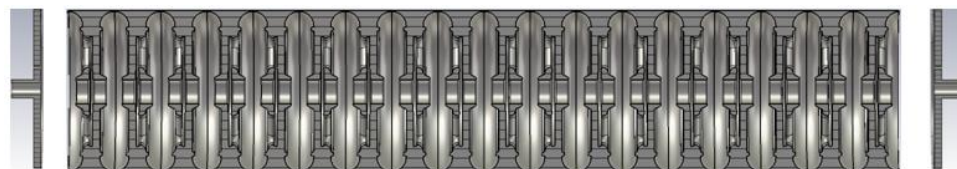


Настройка частоты моды связи



Средний коэффициент влияния настроечного кольца: $k_{fa} = 1,160$ МГц/мм, Коэффициент влияния радиуса ячейки связи: $k_{fc} = 14,270$ МГц/мм

1-й Этап – измерения в полной сборке секции



$$\begin{aligned} \delta f &= \Delta F_n = f_n^t + f_n^b - 2f_a \\ \delta f &= \frac{m^2 \Delta F_n - n^2 \Delta F_m}{m^2 - n^2} \\ \overline{f_c} &= \overline{f_a} + \delta f \end{aligned}$$

Определение полосы запыриания с относительной точностью 3% (члены до 3 порядка в разложении линейной зоны ДХ)

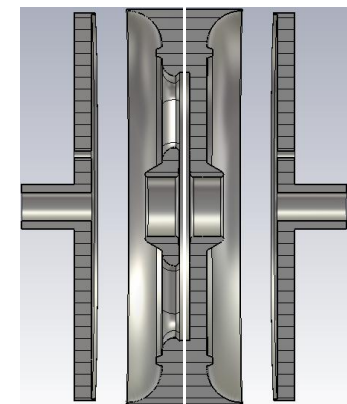
2-й Этап – измерения в минимальной сборке секции

В МС напрямую измеряются частоты рабочей моды f_a и двух 0-мод $f_0^{(1,2)}$

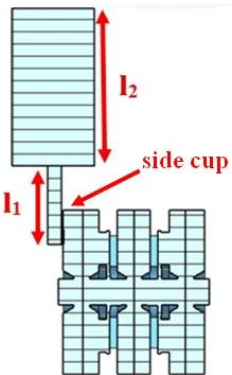
Определение частоты моды связи f_c в МС:

$$\delta f_c^\pi + \delta f_a^\pi = \delta f_0^{(1)} + \delta f_0^{(2)} \rightarrow \delta f_c^\pi = \delta f_0^{(1)} + \delta f_0^{(2)} - \delta f_a^\pi \rightarrow f_c^\pi = \overline{f_c^\pi} + \delta f_c^\pi$$

Особенностью описанной методики является то, что она позволяет настраивать как частоты полу ячеек и секции в целом, так и знакопеременное смещение частот соседних ускоряющих ячеек для подавления МП.



Модель на основе многомодового приближения для системы из секции CDS и отрезка прямоугольного волновода (мостового устройства)



Собственные поля в секции, отрезке волновода и щели

$$\bar{H}^c = \sum_n h_n^c \bar{H}_n^c, \mu_0 \int_{V_c} \bar{H}_n^c \bar{H}_n^{c*} dV = 2W_0$$

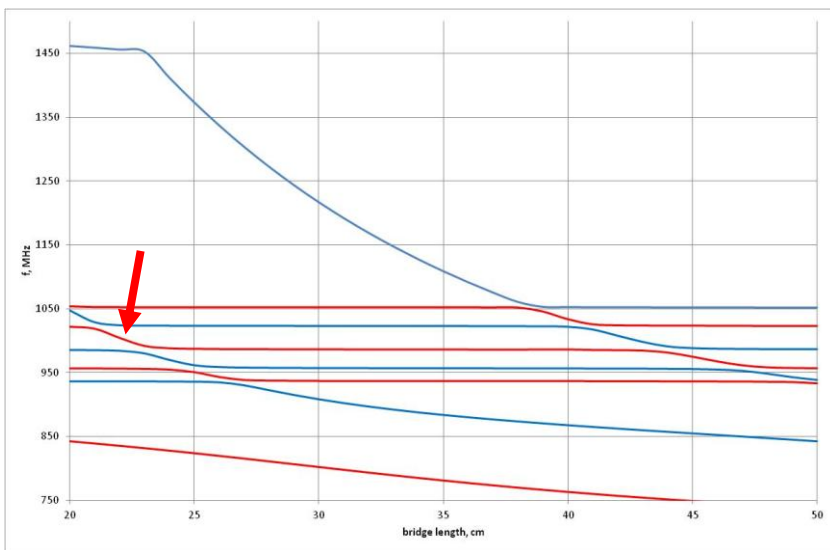
$$\bar{H}^b = \sum_k h_k^b \bar{H}_k^b, \mu_0 \int_{V_b} \bar{H}_k^b \bar{H}_k^{b*} dV = 2W_0$$

$$\bar{E}^s = \sum_m e_m^s \bar{E}_m^s, \epsilon_0 \int_{V_s} \bar{E}_m^s \bar{E}_m^{s*} dV = 2W_0$$

Система уравнений для собственных частот системы

$$\begin{cases} h_n^c \left(\frac{\omega^2 - \omega_n^c}{A_s \omega^2} - H_n^{c2} \right) \Big|_{S^s} - (H_n^c(r_s) \sum_{i \neq n} h_i^b H_i^b(r_s) \Big|_{S^s} + H_n^c(r_s) \sum_{i \neq n} h_i^c H_i^c(r_s) \Big|_{S^s}) = 0 \\ h_m^b \left(\frac{\omega^2 - \omega_m^b}{A_s \omega^2} - H_m^{b2} \right) \Big|_{S^s} - (H_m^b(r_s) \sum_{i \neq m} h_i^b H_i^b(r_s) \Big|_{S^s} + H_m^b(r_s) \sum_{i \neq m} h_i^c H_i^c(r_s) \Big|_{S^s}) = 0 \end{cases}$$

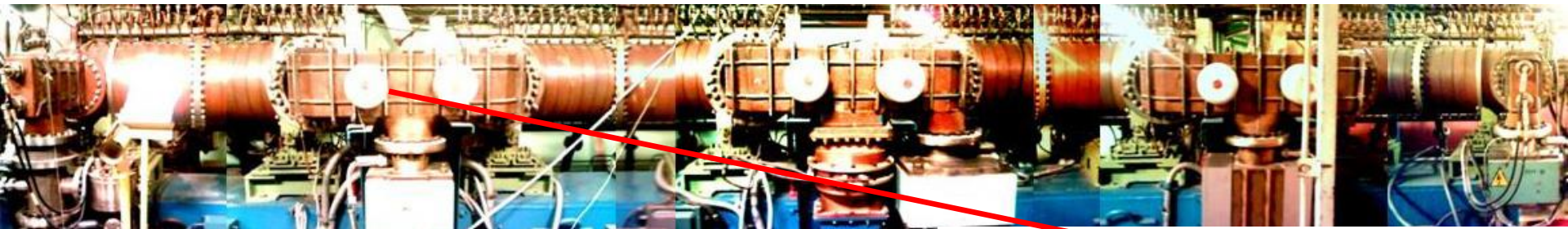
$$A_s = -\frac{4l_s h_s}{\pi^2 \epsilon_0 t_s W_0 (\omega^2 - \omega_s^2)}$$



Зависимости частот от длины закоротки l_2

Имея рассчитанные параметры для секции и моста, с помощью многомодового приближения можно получить характеристики полного резонатора из четырех секций с тремя мостовыми устройствами.

Параметры узла соединения секций с мостами выбираются исходя из требования ввода мощности через мост и минимальной потери в шунтовом сопротивлении.



Мостовые устройства первого резонатора

Для снижения вероятности пробоев и уменьшения R-излучения в 3 секции 1 резонатора основной части предполагается воспользоваться плунжерами в мостовых устройствах. По результатам численного эксперимента показано, что в соседних секциях возможно взаимно обратное изменение амплитуды поля.

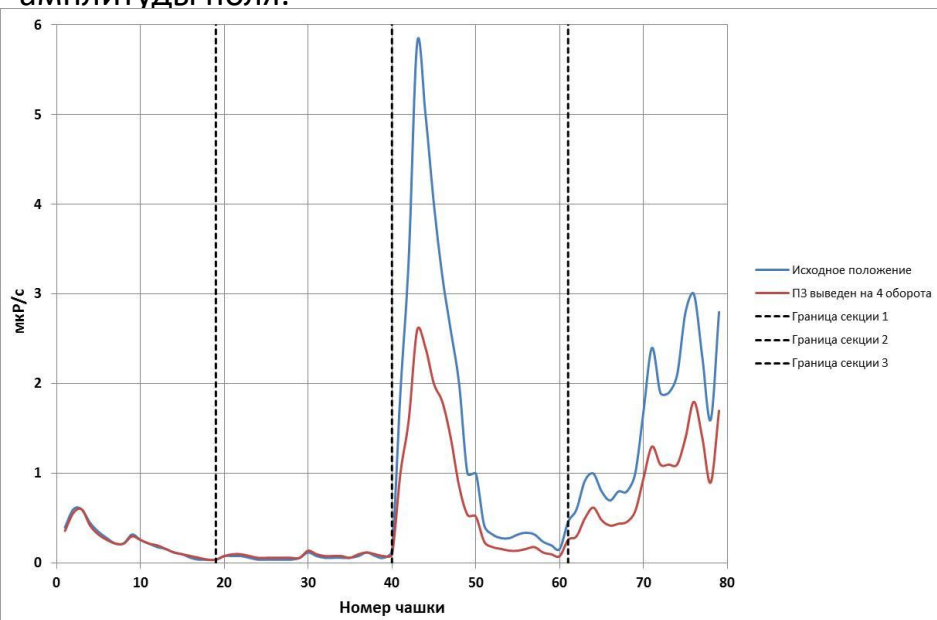
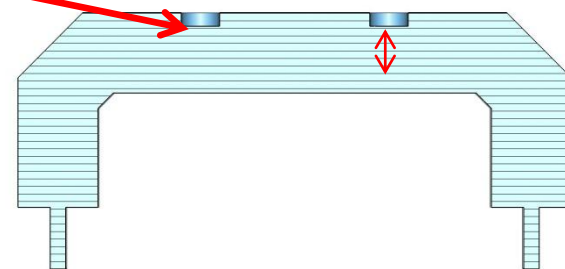


Диаграмма распределения R-излучения

Подтверждена возможность регулирования амплитуды поля в секциях резонатора, на существующей структуре уменьшено рентген излучение на 3 секции. Это позволило сократить число отключений первого резонатора до двух раз в сутки.



ВЫВОДЫ



1. Обоснован выбор структуры CDS для дальнейшей разработки в качестве первого резонатора основной части.
2. Для выбранной структуры CDS проведена унификация основных размеров ячеек для четырех секций резонатора
3. Выбраны допуски изготовления для структуры CDS.
4. Рассмотрена возможность возникновения мультипакторного разряда в структуре CDS ИЯИ. Предложены два способа подавления МП.
5. Предложен способ настройки секций до пайки и контроля качества их изготовления
6. Предложена модель неоднородной системы из секций резонатора и мостовых устройств для выбора оптимального узла их соединения.



Представление результатов



Доклады на конференциях:

1. Конференция Молодежь и наука 2016, МИФИ, Москва – стендовый доклад «Анализ электродинамических характеристик компенсированных ускоряющих структур для основной части интенсивного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН»
2. Конференция RuPAC 2016, С.-Петербург – три стендовых доклада, опубликованы в трудах конференции:
I.V. Rybakov, A.V. Feschenko, Y.Z. Kalinin, L.V. Kravchuk et al. (7 co-authors). Proposal of the accelerating structure for the first cavity of the main part of INR linac. Proc. RuPAC 2016, St. Petersburg, Russia, pp. 216 – 218.
I.V. Rybakov, I.I. Isaev. Estimation of multipacting in CDS structure. Proc. RuPAC 2016, St. Petersburg, Russia, pp. 288 – 290.
I.V. Rybakov, V.V. Paramonov, A.K. Skasyrskaya. Manufacturing tolerances estimation for proton linac cavities. Proc. RuPAC 2016, St. Petersburg, Russia, pp. 291 – 293.
3. Конференция ЛаПЛАЗ 2017, МИФИ, Москва – устный доклад «Методика настройки ускоряющей структуры и контроля качества ее изготовления».
4. Конференция ЛаПЛАЗ 2018, МИФИ, Москва – устный доклад «Сравнение способов подавления мультипакторного разряда в ячейках связи ускоряющей структуры CDS»
5. Конференция RuPAC 2018, Протвино – стендовый доклад, опубликованный в трудах конференции I.V. Rybakov, V.V. Paramonov Study of the Non-Uniform Coupled System Model of CDS Section and Wave-guide Segment Based on Multimode Approximation. Proc. RuPAC 2018, Protvino, Russia, pp. 301 – 303.
6. *Доклад на 12 семинаре памяти В.П. Саранцева, Алушта «Input of RF Power into Coupling Element of Accelerating Cavity»

Статьи:

1. I. Rybakov *et al.*, “Comparison of accelerating structures for the first cavity of the main part of the INR linac”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 747, p. 012073, 2016.
2. I.V Rybakov and V.V Paramonov , «The method of accelerating structure tuning and manufacturing quality control», *J. Phys.: Conf. Ser.* p. 941 012094, 2017.
3. **Paramonov, V.V., Kravchuk, L.V. & Rybakov, I.V. , «Input of RF Power into Coupling Element of Accelerating Cavity» Phys. Part. Nuclei Lett., Volume 15, Issue 7, pp 915–918, 2018**
4. **I.V. Rybakov, V.V. Paramonov, «Comparison of the Techniques for Multipactor Discharge Damping in Coupling Cells of CDS Accelerating Structure», Physics of Atomic Nuclei, Vol. 81, No. 11, pp. 1–4, 2018**