

# Оптимизация и формирование магнитного поля изохронного циклотрона С-80 на основе 3D моделирования

Артамонов С.А.  
семинар ОФВЭ ПИЯФ

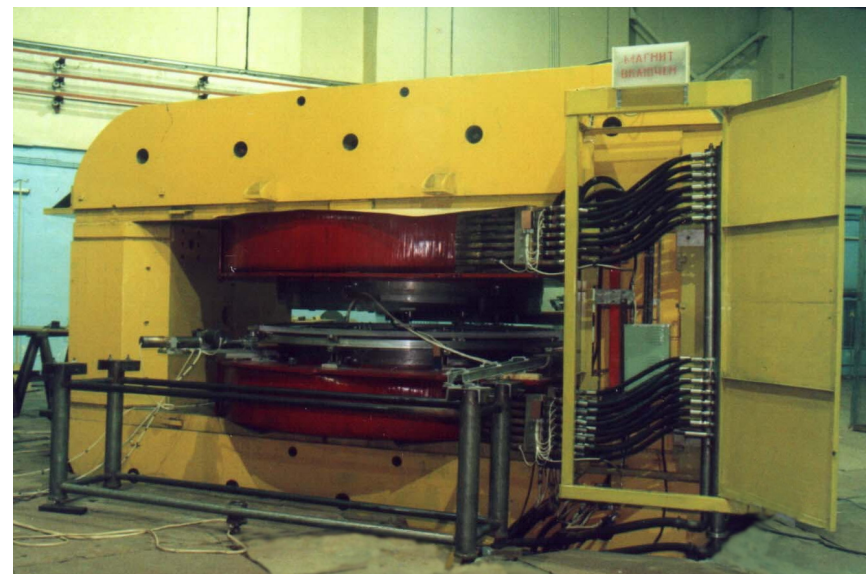
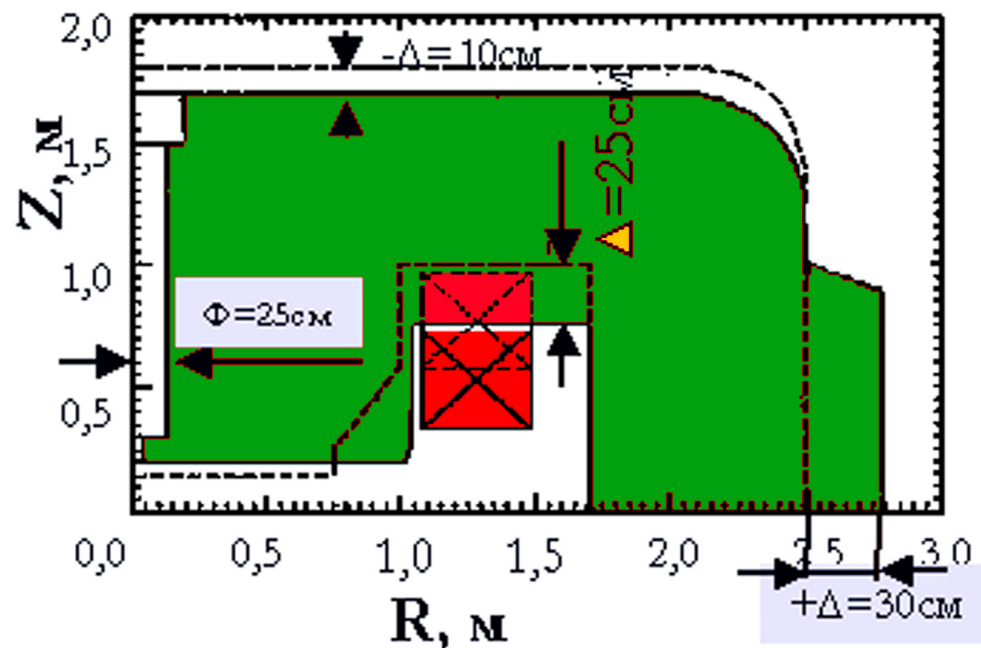
В ПИЯФ ведется строительство Гатчинского Изохронного Циклотрона (С-80) по ускорению Н<sup>-</sup> ионов до энергий 40 - 80 МэВ с током выведенного пучка ~ 100 - 200 мкА . С-80 планируется использовать как для фундаментальных исследований в ядерной физике и физике твердого тела, так и для различных прикладных задач, включая наработку всего спектра необходимых радиоактивных изотопов для медицины Северо-Западного региона России, а также и для лечения меланомы глаза и поверхностных форм рака кожи.

## Требования к магнитной структуре

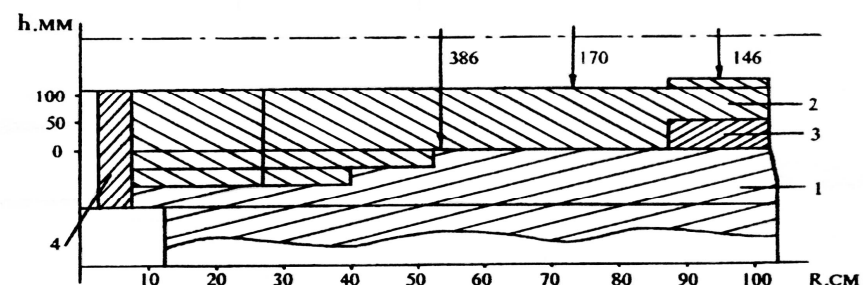
- На конечном радиусе ускорения  $R=90$  см магнитная жесткость д.б.  $BR=13.2$  кГс.м  $\rightarrow$  80 МэВ. Для этого:
- Сформировать изохронный подъем среднего по азимуту магнитного поля на 8.5%.  
( $B_0=13520$  Gs,  $\langle B_k \rangle = 14670$  Gs);
- Обеспечить  $r$  и  $z$  фокусировку в рабочей области;
- Ограничить диссоциацию  $H^-$  ионов величиной  $<5\%$ .  $\rightarrow$   
 $N=4$ ,  $A_4(\max) \sim 3000$  Gs,  $\gamma_{\text{геом}}^0 = 65^\circ$ ;
- Добиться минимального зазора между секторами не меньше, чем 146 мм.

Параметры – предельные ( $R_{\text{extr}}$ , зазор)

# Оптимизация магнитопровода СП-72



- Габариты: 5,7\*2,6\*3,4 м<sup>3</sup>, M= 250 т
- +Диаметр полюса: (1.5) 2.05 м
- +Зазор дол./холм:(289)386/146 мм
- Ток<sub>осн. обмотки</sub> = 784 А, P=120 кВт
- +Высота подъема : Δh<sub>max</sub> =450 мм(650)
- +Отверстия для акс. инжекции
- +Выборки в полюсах
- +Длинные шиммы



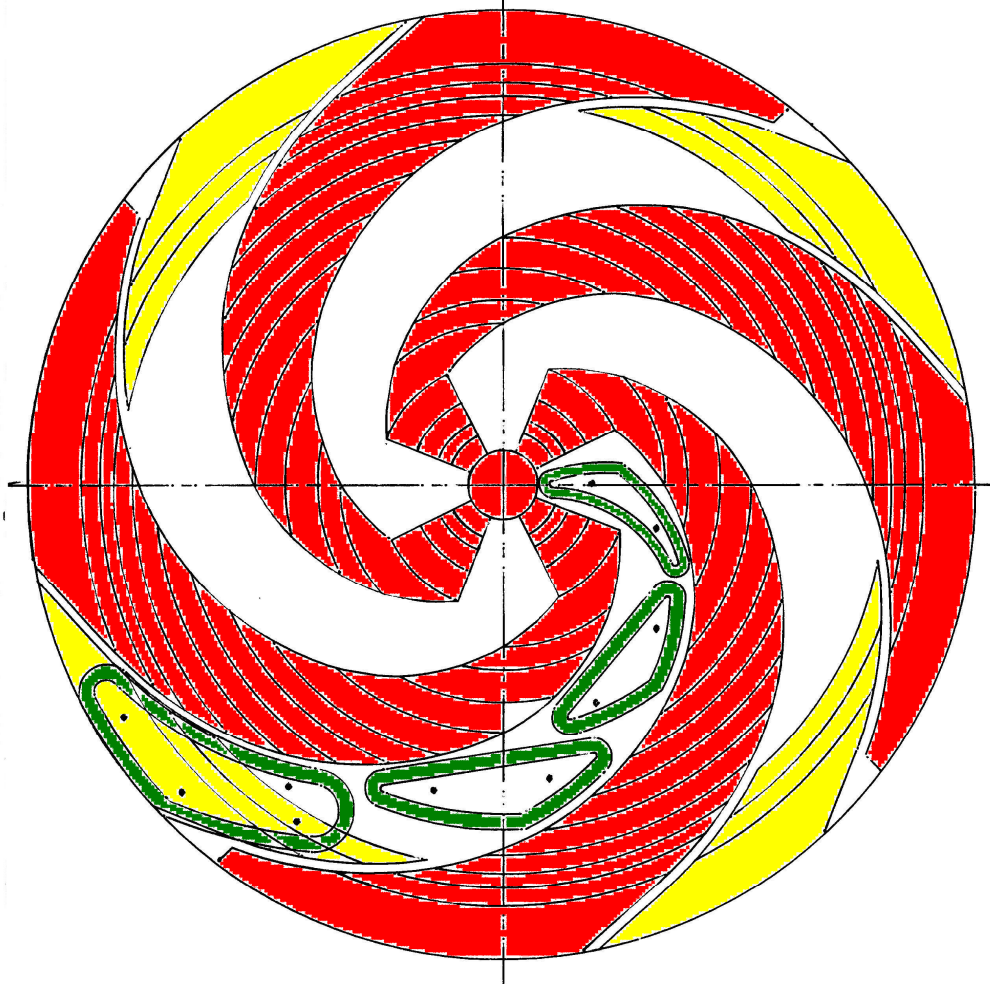
23.05.2012

## Выбор структуры секторов Ц-80

Основания: 2D расчеты и типа 3D.

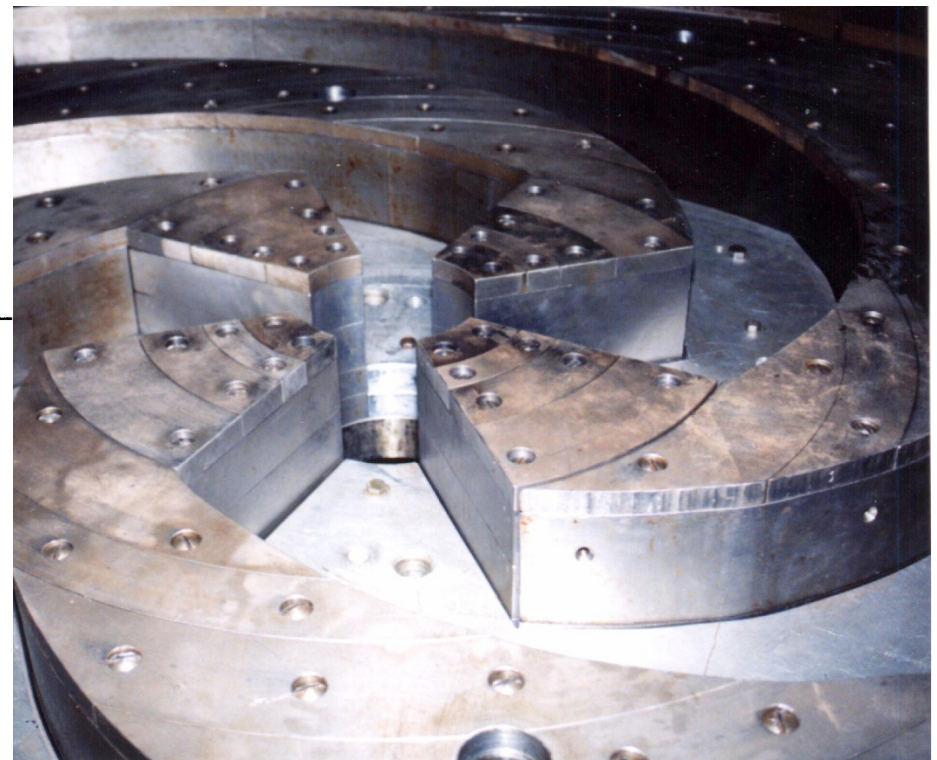
2 модели:

$k=1.36$  (малые  $\gamma_{geom}^o$  = большие потери  $H^-$ ),  
 $k=8$  (большие  $\gamma_{geom}^o$  = малые потери  $H^-$ )



## Основные параметры:

- Высота сектора -90 мм, всего 8
- Высота сект. накладок (max) - 18 мм, их 17 на каждом секторе
- Угол геом. спиральности  $\sim 65^\circ$ ,
- Число катушек  $4 \cdot 4 \cdot 2 = 32$  шт.
- Ток катушек -20 А (24 шт.)  
40 А (8 шт.)



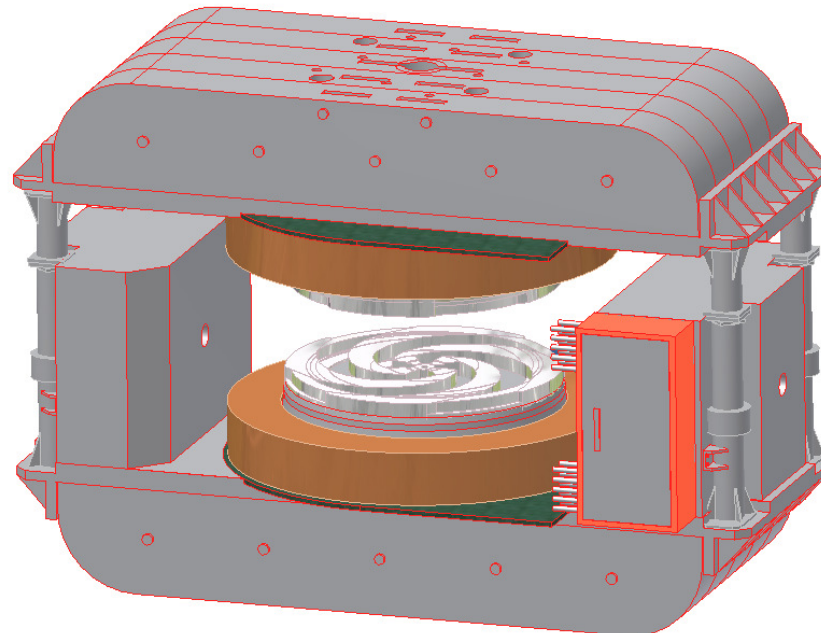
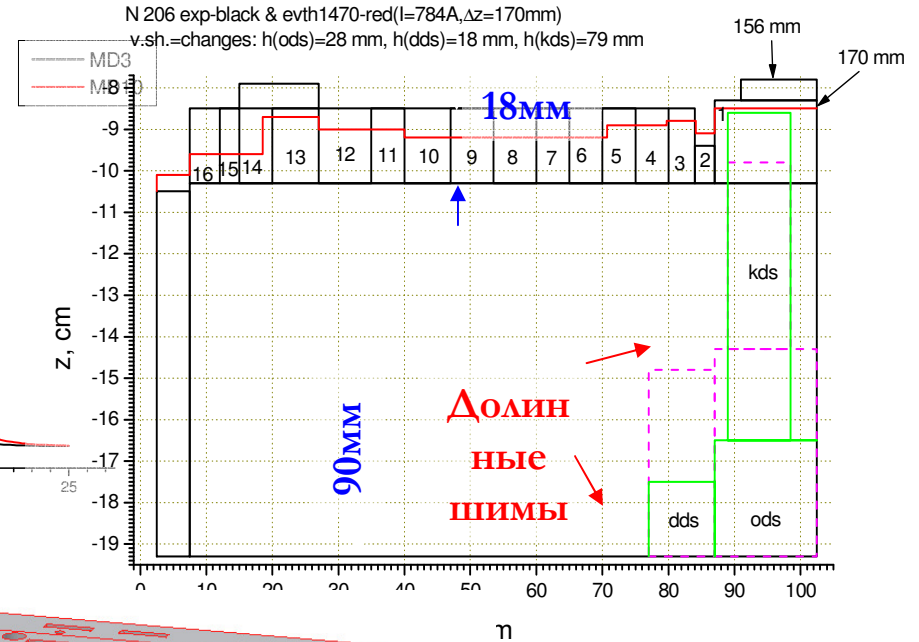
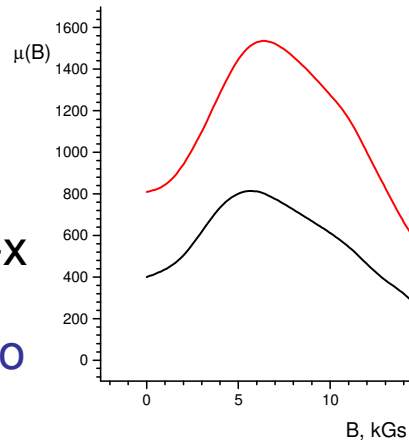


## Настройка параметров 3D программы Mermaid для формирования магнитного поля С-80

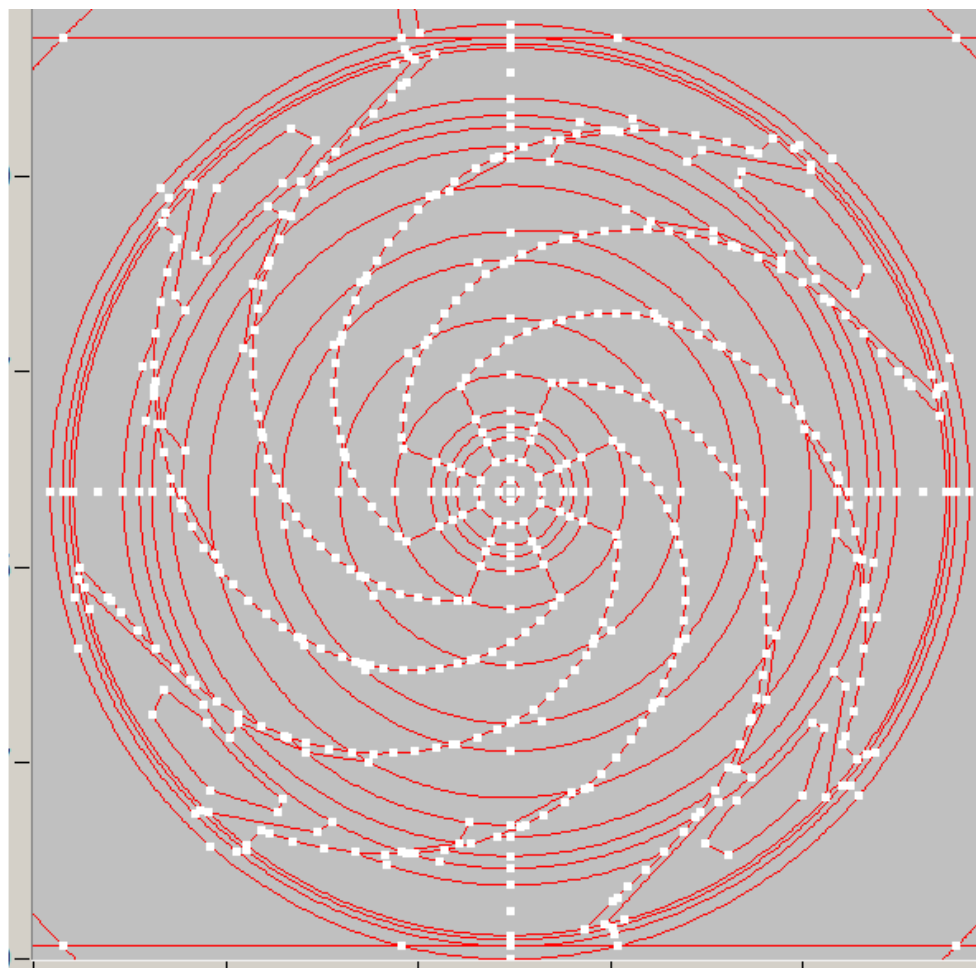
- Реализовано полное совпадение расчетной и натуральной 3D геометрий
- Поскольку экспериментальные кривые  $\mu(B)$  для сталей 3 и 10 отсутствуют, то модифицировать имеющиеся в “Mermaid” кривые, опираясь на ОПОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ (ОЭ)
- При этом сразу же возникла проблема выбора числа пространственных элементов при описании геометрии магнита для правильного воспроизведения в 3D расчете таких важных экспериментальных параметров структуры как:  $\langle B \rangle$ ,  $F$ ,  $A_N$ ,  $v_z$ ,  $v_r$
- Были рассмотрены модели с 3.8, 8.5 и 20.5 млн. прямых треугольных призм в программе “Mermaid” (для выбора  $h$ )
- 3D расчеты при использовании ~20.5 млн. прямых призм в программе дали для ОЭ приемлемые погрешности

# Основные трудности 3D расчетов для С-80

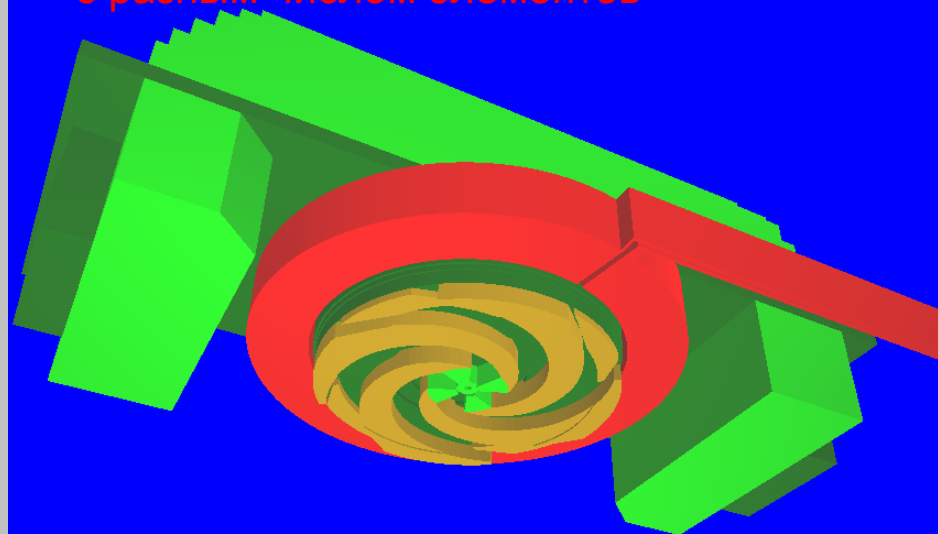
- Нелинейность задачи
- Магнит изготовлен из 2-х типов стали (3 и 10), существенно разные кривые намагничивания
- Сложная геометрия и большая спиральность секторов, 1/2 магнита в 3D расчетах (обычно 1/8)



# Сектора и магнит С-80 в 3D расчетах по программе MERMAID



Optimum  $h_x \sim h_y \sim 1$  cm,  $h_z = 0.5$  mm-30 mm  
-на основе анализа данных  
с разным числом элементов



Программа "Mermaid":1/2



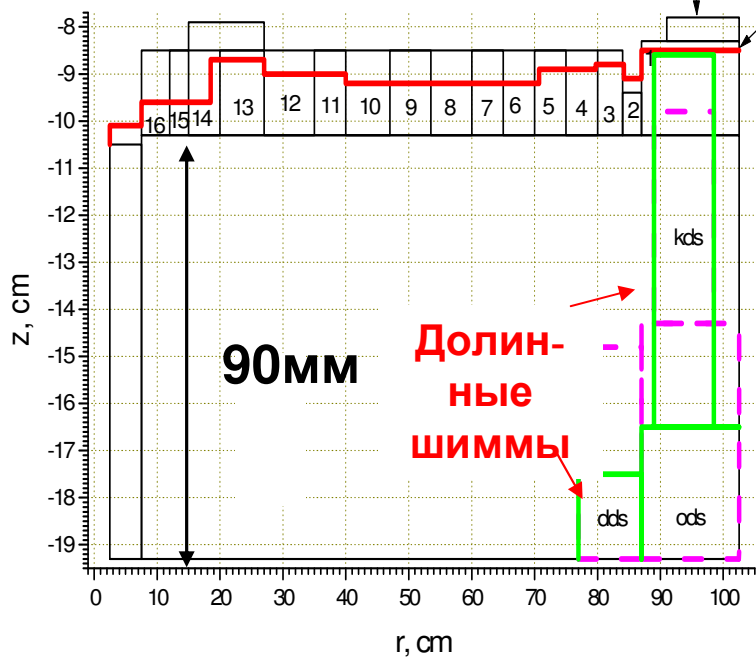
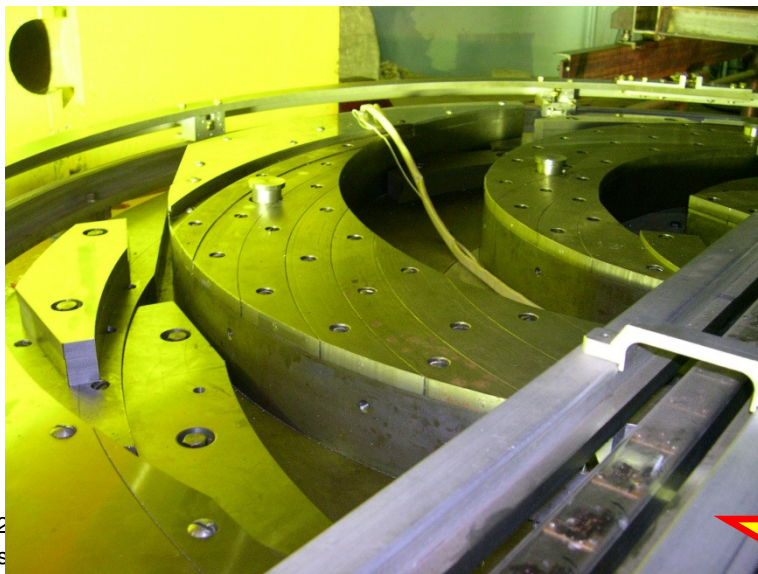
## Анализ 3D магнитного поля ( расчетного и экспериментального) проводится в два этапа:

1. По указанным ниже аналитическим формулам, используя ЭВМ. Такой подход относительно прост, нагляден и быстр. Но недостаточно точен для изохронного циклотрона. Поэтому необходимы уточнения на основе динамики.

2. Динамический подход:

Решаем численно соответствующие нелинейные уравнения движения; вычисляем статические равновесные орбиты в исходном магнитном поле; по ним определяем частоты бетатронных колебаний; вычисляем период обращения ускоряемой частицы на каждом радиусе; опираясь на эти данные строим по специальной процедуре изохронное поле; окончательно определяем частоты бетатронных колебаний в этом изохронном поле и вычисляем потери  $H^+$  ионов на электродиссоциацию (более трудоемкая процедура)

# схематично двухэтапная процедура формирования оптимального магнитного поля Ц-80 выглядит так



Требования:

$E=80$  МэВ; изохронность;

$z$ -, $r$ -фокусировка;

электродиссоциация  $< 5\%$

Мин. зазор 170 мм

Анализ :1,2

**MERMAID**

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ  
ШИММ, МОНТАЖ**

Анализ:1,2

**МАГНИТНЫЕ  
ИЗМЕРЕНИЯ**

# 1. Основные формулы для анализа (3D расчет и эксперимент) магнитного поля на первом этапе

- Среднее по азимуту магнитное поле на данном радиусе  $r$ :

$$\bar{B}(r) = \frac{1}{2l} \int_0^{2l} B(r, \theta) d\theta$$

- Поле в медианной плоскости разлагается в ряд Фурье:

$$B(r, \theta) = \bar{B}(r) \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ a_k(r) \cos\left(\frac{\pi}{l} k \theta\right) + b_k(r) \sin\left(\frac{\pi}{l} k \theta\right) \right] \right\}$$

$$= \bar{B}(r) \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k(r) \cos \frac{\pi}{l} k [\theta - \psi_k(r)] \right\}.$$

$$T = 2l \quad l = \frac{\pi}{N} \quad - \text{ для идеального изохронного циклотрона}$$

$$l = \pi \quad - \text{ на суперпериоде}$$

$$a_k(r) = \frac{1}{l\bar{B}(r)} \int_0^{2l} B(r, \phi) \cos\left(\frac{\pi}{l}k\theta\right) d\theta \quad b_k(r) = \frac{1}{l\bar{B}(r)} \int_0^{2l} B(r, \phi) \sin\left(\frac{\pi}{l}k\theta\right) d\theta$$

- коэффициенты ряда Фурье,

$$A_k(r) = \sqrt{a_k^2(r) + b_k^2(r)} \quad \psi_k(r) = \frac{l}{\pi k} \operatorname{arctg} \frac{b_k(r)}{a_k(r)}$$

- амплитуда и фаза  $k$ -ой гармоники,

• Флаттер поля  $F$

$$F = \frac{1}{2} \frac{\overline{B^2} - \bar{B}^2}{\bar{B}^2} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2, \quad \bar{B}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} B^2(r, \theta) d\theta$$

- Частоты радиальных бетатронных колебаний

$$\nu_r^2 = 1 + k + \frac{1}{2(N^2 - 1)(N^2 - 4)} \left[ 3N^2 A_N^2 (1 + \text{tg}^2 \gamma_1) + (5N^2 - 8) A_N A_N' \right] + \frac{A_N'' A_N}{2(N^2 - 1)} + \frac{(A_N')^2}{2(N^2 - 4)}$$

Здесь

$$k = \frac{r}{\bar{B}(r)} \frac{d\bar{B}(r)}{dr}, \quad \text{tg} \gamma_1 = r \frac{d\psi_N(r)}{dr}$$

- Частоты аксиальных бетатронных колебаний

$$\nu_z^2 = -k + F + \frac{1}{2(N^2 - 1)} \left[ A_N^2 \{1 + (2N^2 - 1) \text{tg}^2 \gamma_1\} - A_N A_N' - A_N'' A_N \right] + \frac{(A_N')^2}{2N^2}$$

Сюда входит –  $\gamma_1$  (магнитная спиральность). Она отличается от геометрической спиральности, которая заложена в конструкцию сектора.

## 2. Второй этап анализа 3D магнитного поля ( расчетного и экспериментального)

Соответствие между радиусом  $r$  и импульсом  $p$  в периодическом по азимуту магнитном поле **удобно** для равновесной частицы, совершающей движение по  $r$ , **записать в форме**, аналогичной аксиально-симметричному полю

$$p = \frac{q}{c} r_k \overline{B}(r_k)$$

2.1. Находим периодические решения нелинейных уравнений движения(SEO)

$$r'' = r + 2 \frac{r'^2}{r} + \frac{q \sqrt{r'^2 + r^2 + z'^2}}{\sqrt{E^2 - E_0^2}} \left[ B_z \left( r + \frac{r'^2}{r} \right) - B_r \frac{r' z'}{r} - B_\phi z' \right]$$

$$z'' = 2 \frac{r' z'}{r} + \frac{q \sqrt{r'^2 + r^2 + z'^2}}{\sqrt{E^2 - E_0^2}} \left[ B_z \frac{r' z'}{r} - B_r \left( \frac{z'^2}{r} + r \right) + B_\phi r' \right]$$

$$r_{eq}(2l) = r_{eq}(0), \quad r'_{eq}(2l) = r'_{eq}(0)$$

Исходя из SEO, находим по специальному алгоритму истинные частоты в «правильном» изохронном поле.

28.05.2012



## 2.2. Затем вычисляем потери ионов на электродиссоциацию при ускорении.

Диссоциация связана с тем фактом, что второй электрон имеет очень малую энергию связи  $\epsilon=0.755$  эВ и поэтому велика вероятность его отрыва электрическим полем  $E$ , которое возникает в системе отсчета, связанной с ионом, при его движении со скоростью  $v$  в магнитном поле  $B$ :

$$E=0.3 \beta \gamma B,$$

( $\beta$ - относительная скорость иона,  $\gamma$ - релятивистский фактор,  $B$  - измеряется в кГс,  $E$  - в МВ/см.)

При расчетах потерь исходим из соотношения: 
$$\frac{dI}{I} = -\frac{dt}{\gamma\tau} \quad (*)$$

$\tau$  – среднее время жизни  $H^-$  иона, определяемое вероятностью проникновения внешнего электрона через потенциальный барьер при наличии указанного выше эл\поля  $E$ . Это время может быть представлено в виде:

$$\tau(E) = \frac{A}{E} \exp\left(-\frac{D}{E}\right),$$

где  $A$  и  $D$  – константы, оптимальные, подобранные по опытным данным

## 2.2 Второй этап

Уравнение (\*) можно преобразовать к виду, наиболее подходящему для циклотронного режима ускорения

$$\frac{I}{I_o} = \exp \left[ - \int_0^{\theta_k} \alpha(\theta) d\theta \right] = \exp \left[ - N \sum_{i=1}^M \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \alpha(\theta) d\theta \right], \quad \alpha(\theta) = \frac{1}{\gamma \omega \tau},$$

$\theta_k$  - конечное значение угла на последнем обороте,

$$\theta_{i-1} = \frac{2\pi}{N}(i-1), \quad \theta_i = \frac{2\pi}{N}i$$

$\omega$  - циклотронная частота (const),

$$M = \frac{W_k}{dW/dM} = \frac{W_k}{\Delta W_o}$$

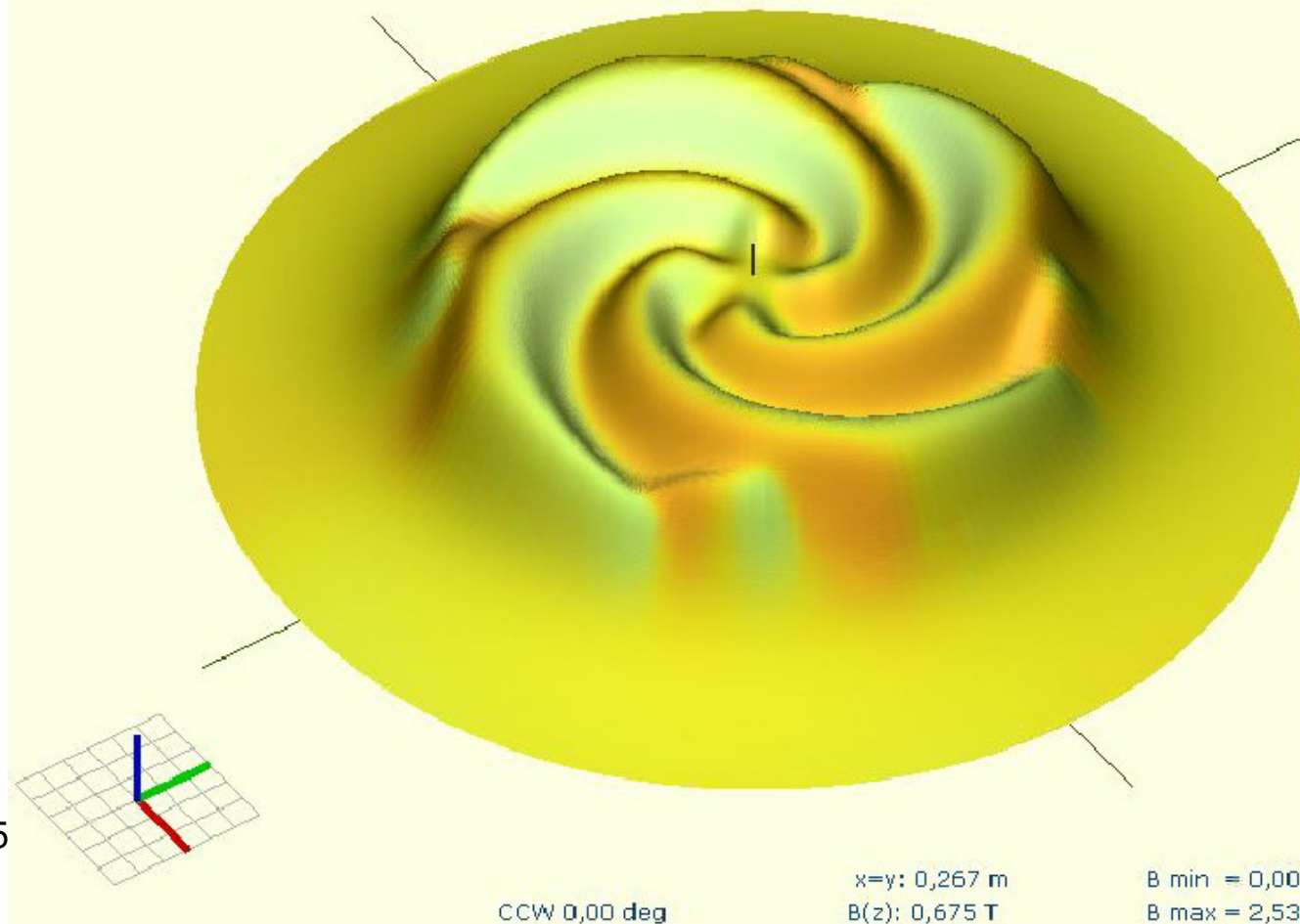
$N$  - число элементов периодичности структуры,

$M$  - число оборотов иона,

$W_k$  - конечная энергия иона.

## Расчетное 3D поле для С-80 ~20.5 млн. прямых призм

BCalc: Ar14106d.map Date: 02.12.08

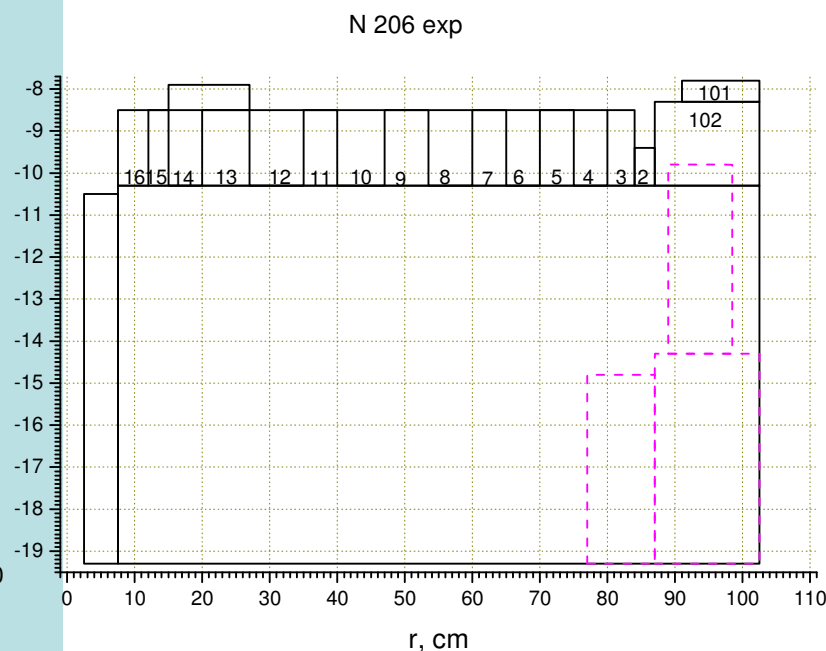
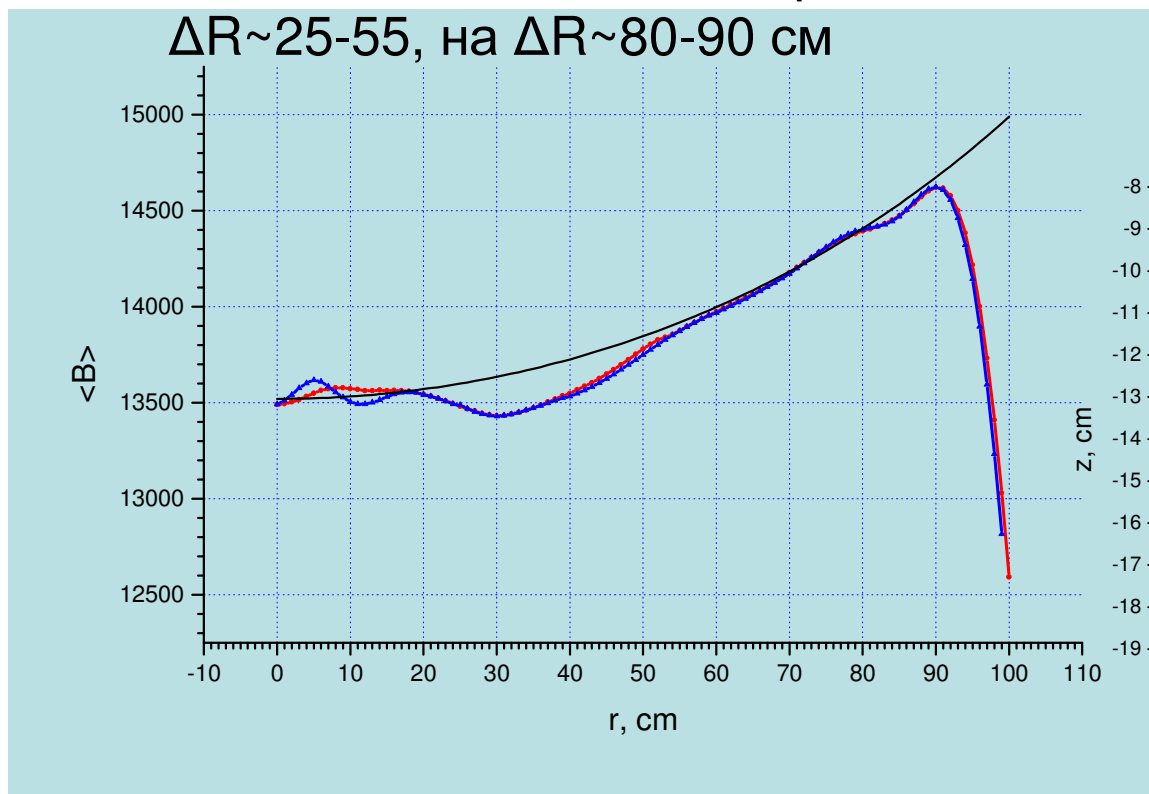


# Сравнение $\langle B_{calc} \rangle$ (red) & $\langle B_{exper} \rangle$ (blue) (ОЭ)

Зазор 156 мм

Видно, что исходная магнитная структура требует доработки: недостаточно точно воспроизводится  $\langle B \rangle$  в самом центре, на

$\Delta R \sim 25-55$ , на  $\Delta R \sim 80-90$  см

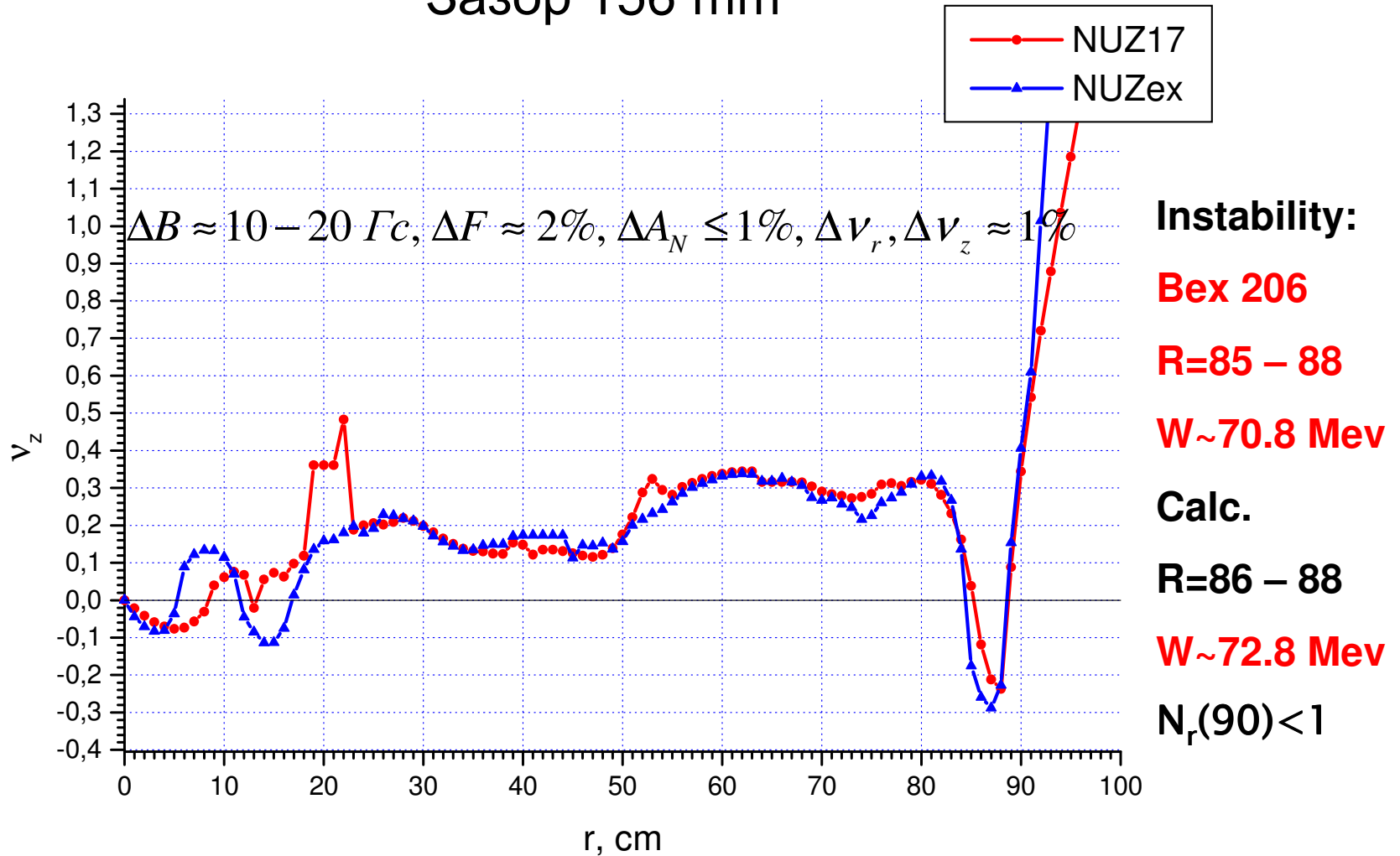


$$\Delta B \approx 10 - 20 \text{ Гс}$$

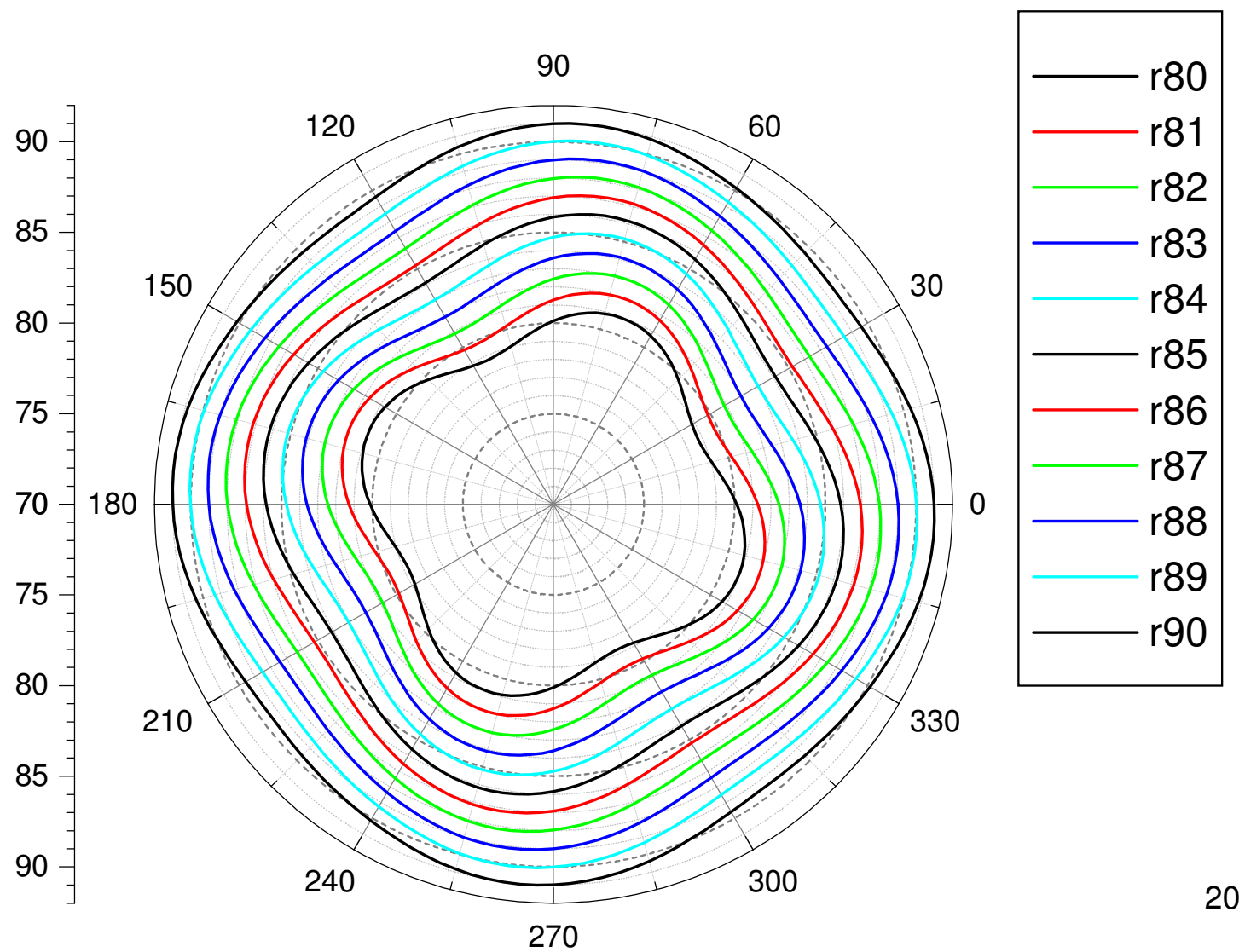
$$\bar{B}_{relat} = \frac{B_0}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{R_\infty^2}}}$$

# Частоты вертикальных бетатронных колебаний (ОЭ)

Зазор 156 mm



SEO-радиус меньше над секторами. Исходя из SEO, находим по специальному алгоритму истинные частоты в «правильном» изохронном поле



23.05.2012

20



## После настройки MERMAID алгоритм оптимизации МС таков:

- Сначала выполнялись оптимизационные 3D расчеты.
- Получив достаточно хороший вариант, секторные накладки и долинные шиммы снимались, отправлялись в ЦЭО, где их высоты делались равными расчетным минус 2 мм. Минус 2 мм были вызваны как опасениями, что 3D расчеты окажутся недостаточно точными, так и для свободы маневра в дальнейшем.
- Затем элементы МС снова монтировались + 2 мм, выполнялись натурные магнитные измерения и каждый раз убеждались, что 3D расчет совпадает с измерениями в указанных ранее пределах.
- После этого снова выполнялись оптимизационные 3D расчеты и т.д.
- Всего было выполнено 3 таких итерации и был получен следующий оптимальный вариант

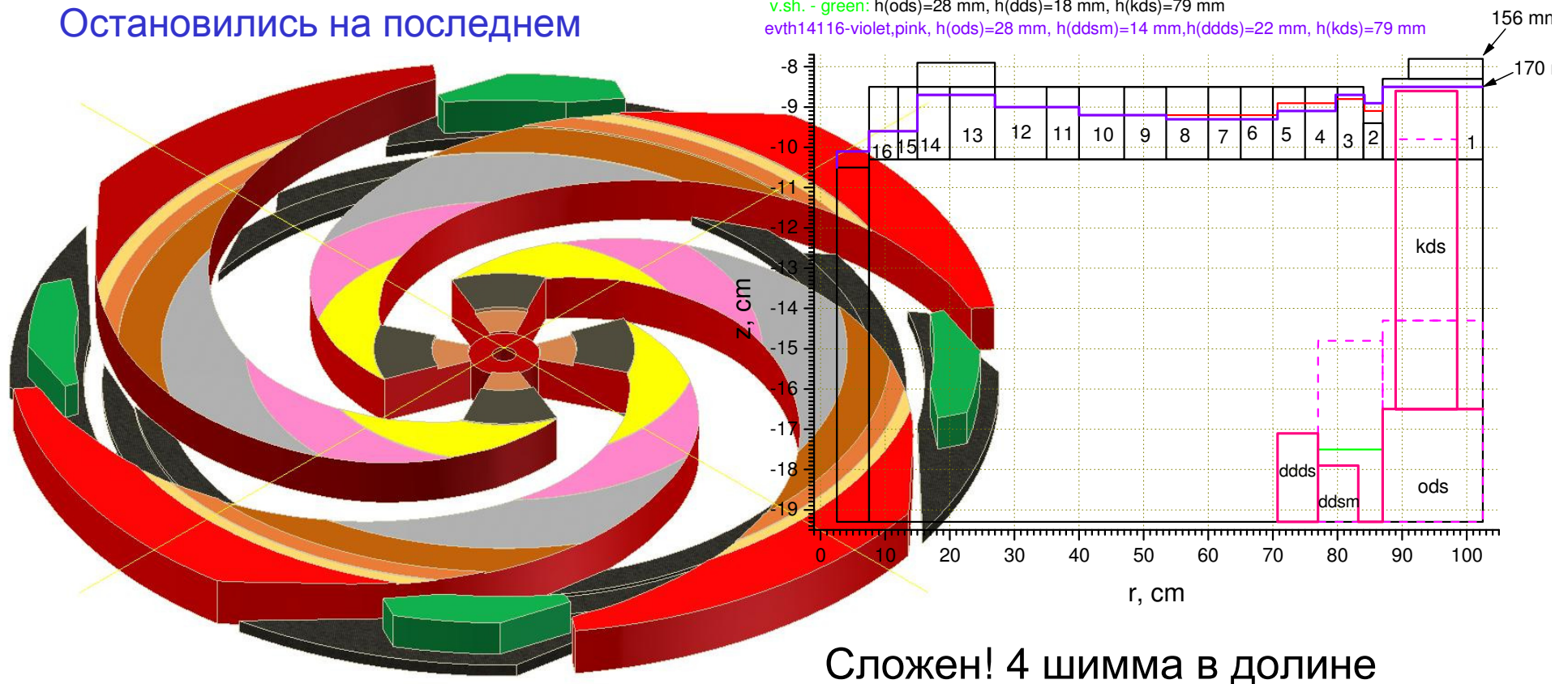
# Оптимальный вариант МС С-80 (old)

Зазор 170 мм

Всего было рассмотрено 4 варианта  
с разными зазорами: (156, 166, 176  
и 170 мм)

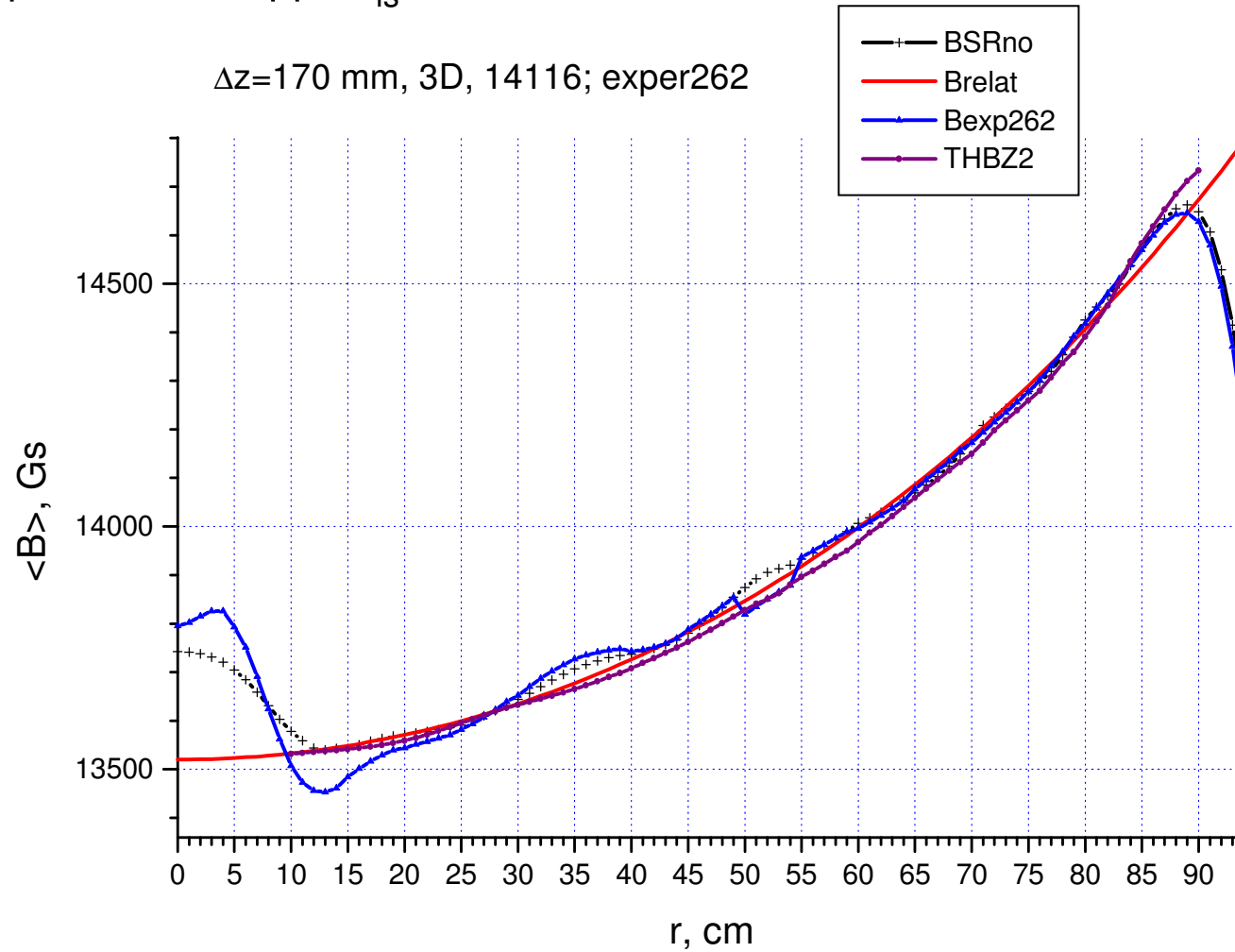
Остановились на последнем

Нов.  $R=70.74-77, h=22$   
 $h(dds)=14, R=77-83.2$



## Старый вариант секторов: средние поля

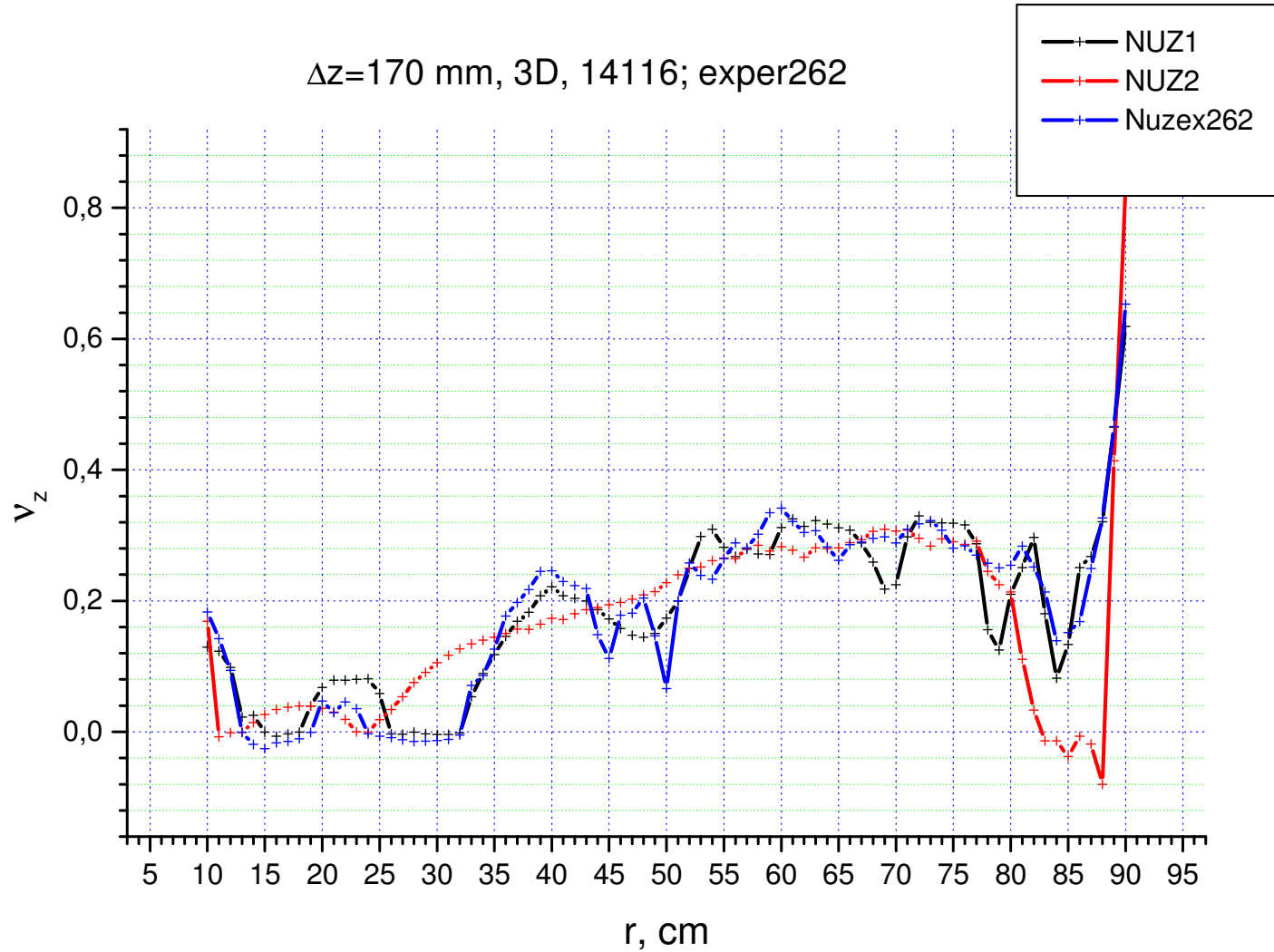
Не дотягиваем до  $B_{is} r > 85$



# Старый вариант секторов: частоты $v_z$

$\Delta z = 170$  mm, 3D, 14116; exper262

Нет  
устойчивости:  
1.  $v_z(r \geq 83) < 0$   
для  $V_{is} \rightarrow$   
 $W \sim 68$  Mev,  
If  $V_{calc} \rightarrow W \sim 75$   
2.  $R \sim 10-25$  -  
нет  
устойчивости



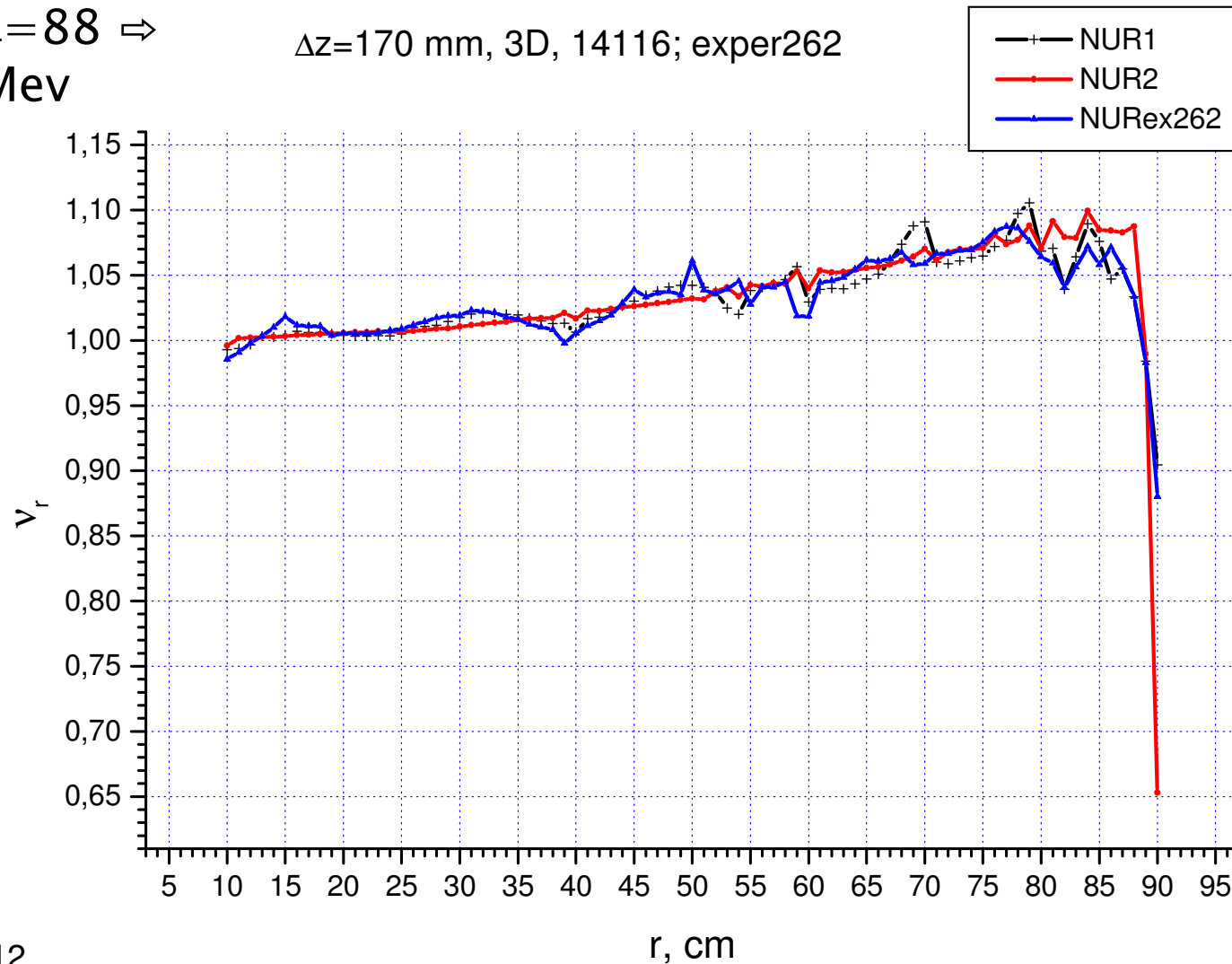
# Старый вариант секторов: частоты $\nu_r$

$$\nu_r(r=89,90) < 1$$

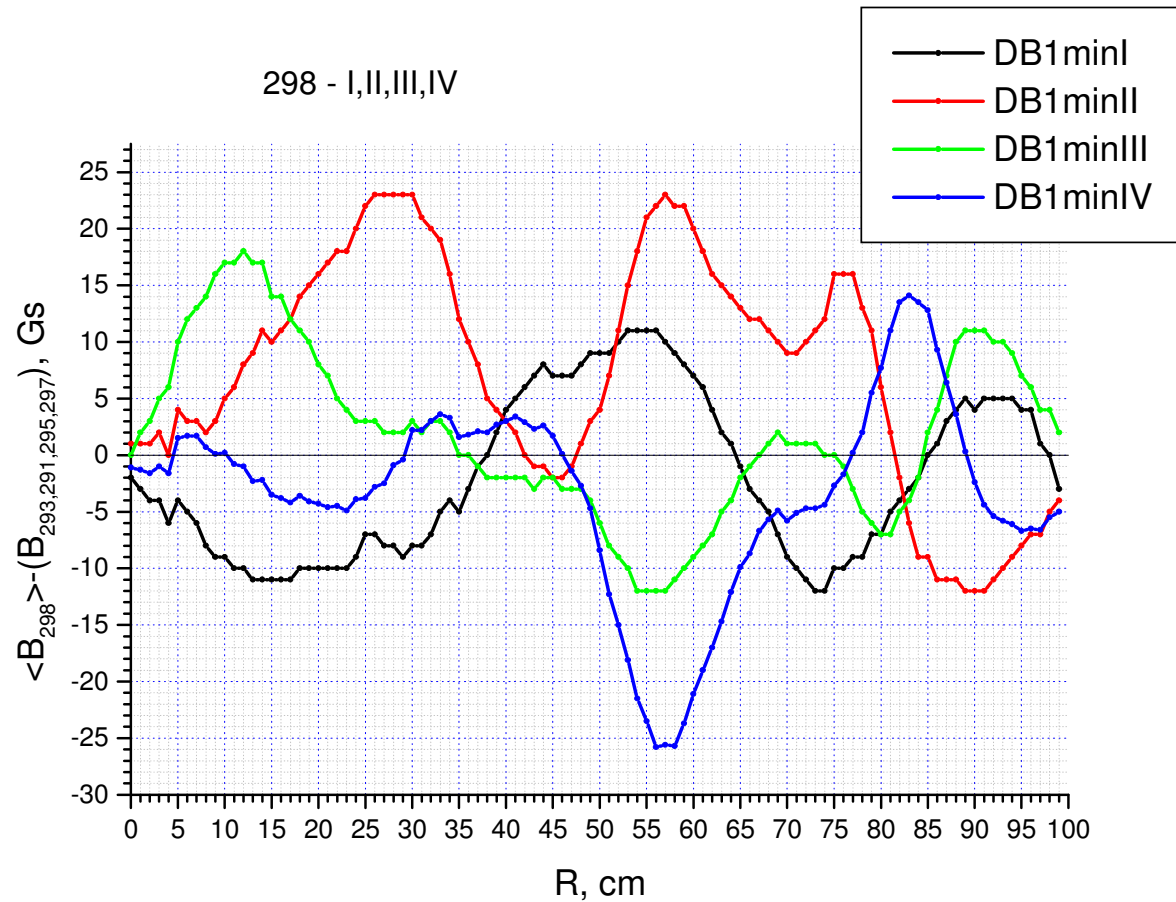
$$\Rightarrow R_{\text{extr}} = 88 \Rightarrow$$

$W \sim 75 \text{ Mev}$

$\Delta z = 170 \text{ mm}$ , 3D, 14116; exper262

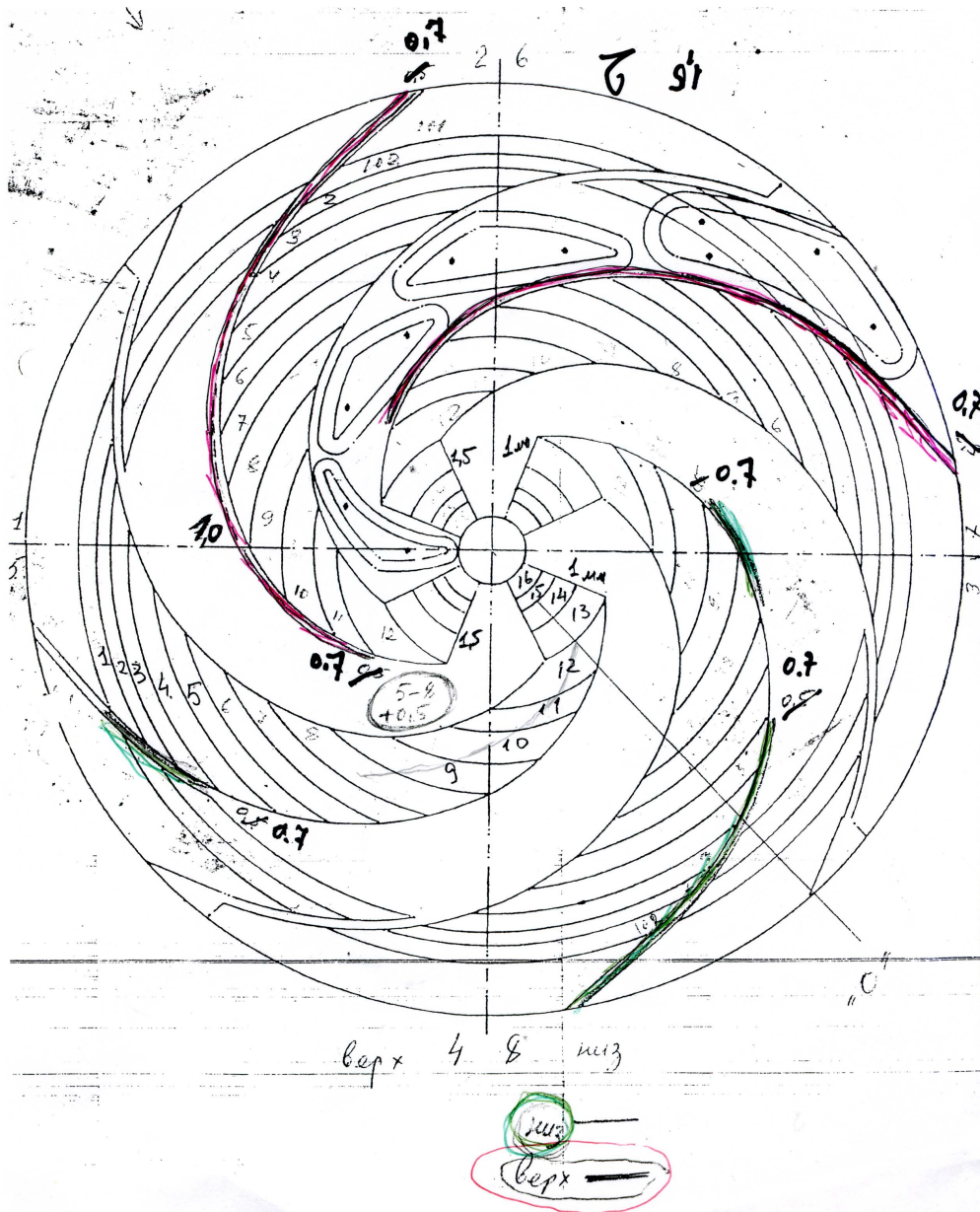


# Не идентичность секторов (эксперимент)-1 (по изготовлению → разная высота = разные поля)





# НЕ ИДЕНТИЧНОСТЬ СЕКТОРОВ-2 (по монтажу и изготовлению)



- Не идентичность секторов  
в многочисленных точках  
трудно устранить  
**и механически** (нет  
технической базы)  
**и по магнитным измерениям**  
(необходимо создать  
сложную новую  
измерительную систему, а  
на это нет времени)

## НЕ ИДЕНТИЧНОСТЬ СЕКТОРОВ-3 (по монтажу и изготовлению)

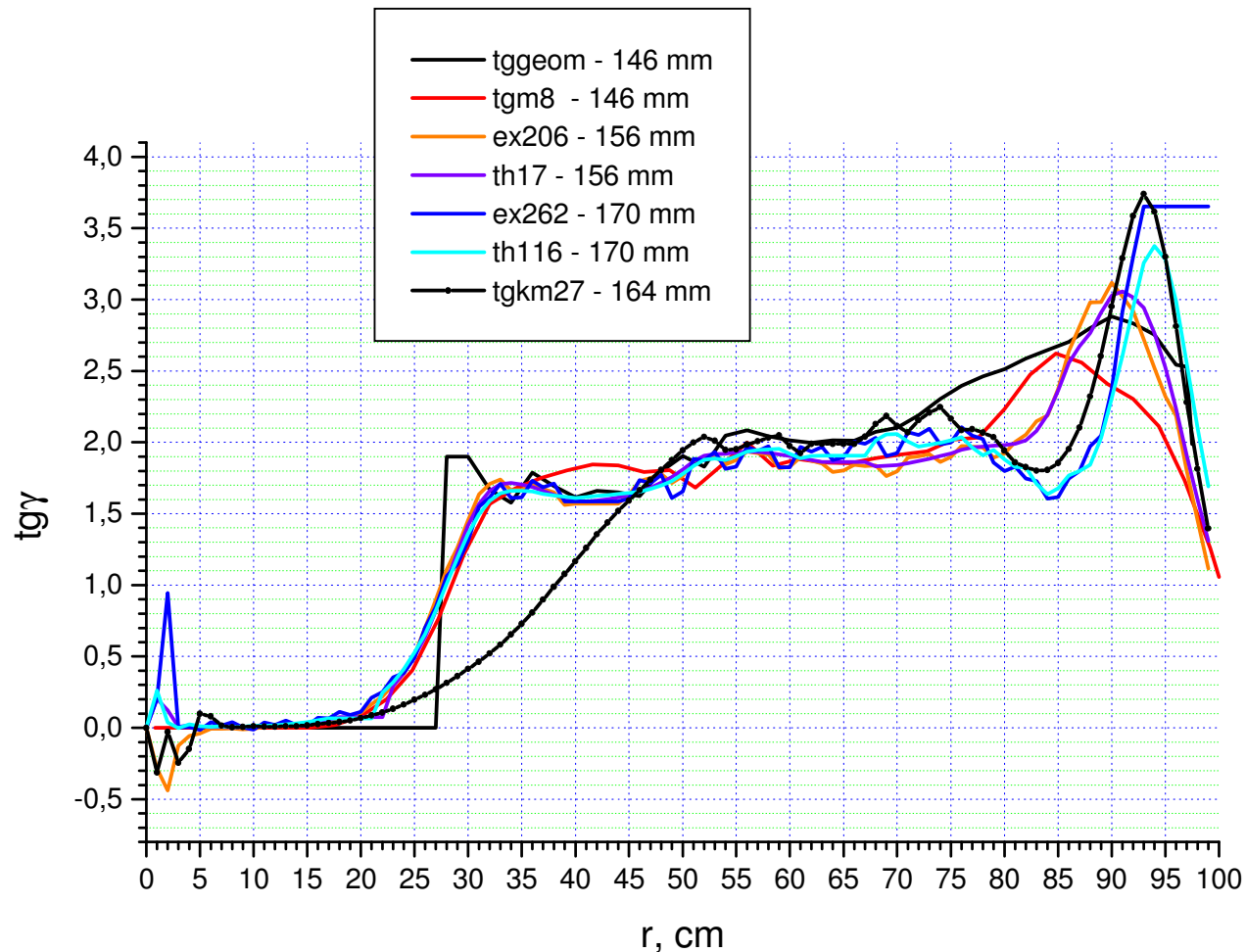
- Приводит к появлению средней по азимуту дополнительной компоненты поля  $B_r$ . Ее наличие вызывает когерентное смещение пучка от медианной плоскости, которое можно оценить по формуле:

$$z = \frac{B_r \cdot r}{B_z \cdot v_z^2}$$

- Если  $B_r = 7Gs, r = 0.7m, B_z = 1.65T, v_z \approx 0.25$   
то когерентное смещение составит  $\sim 5$  мм.
- Это приводит к ограничению по смещению от вертикали при монтаже пар секторов в  $\leq 0.1$  мм

## Обнаружен эффект отрыва магнитной спиральности от геометрической

Это сильнейшим образом усложнило оптимизацию МС  
(см. аналитическую формулу для  $v_z$ )



## Выводы: старый вариант секторов. Зазор 170 мм

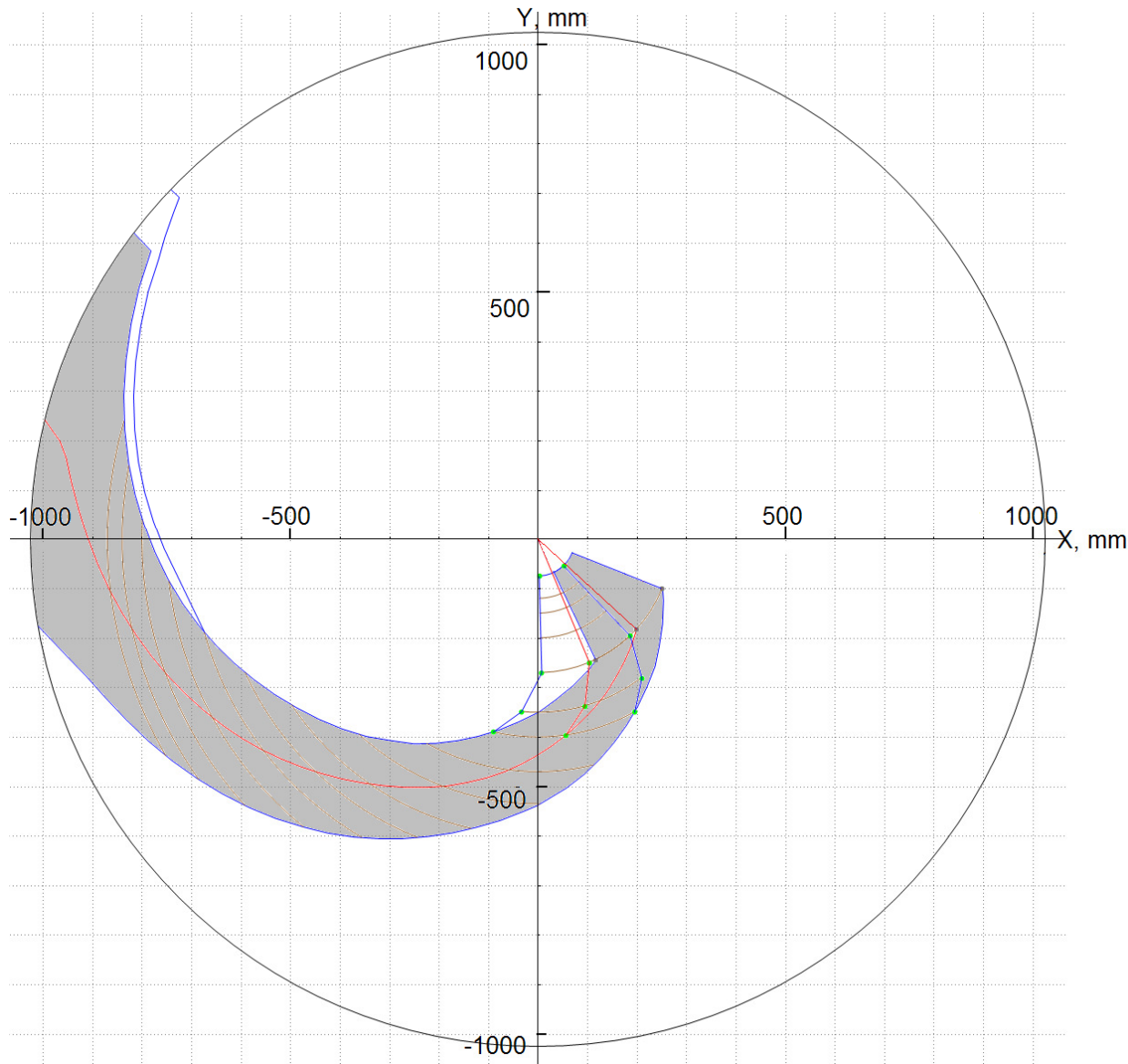
1. Основные недостатки: Не хватает устойчивости на конечных радиусах ускорения как по  $r$ , так и по  $z$ . Следовательно, **не достигаем конечной энергии ускорения 80 МэВ.**
2. МС С-80 получается перегруженной долинными шиммами (4x8), **но по другому не снизить потери  $H^-$  ионов (~3%) на электродиссоциацию.**
3. Одна пара секторов имеет слишком большие отличия от других пар, **что видно из эксперимента.**
4. Нет идентичности расположения секторов (верхнего и нижнего) в каждой паре. **Это приводит к появлению нежелательной компоненты поля  $B_r$ , что вызовет сдвиг пучка в целом из медианы.**
5. Нет устойчивости в ЦО, **сама ЦО не соответствует истинной геометрии.**

## **Основные дополнительные требования к конструкции НОВЫХ секторов**

- 1. Верхний и нижний сектора должны находиться симметрично относительно медианной плоскости и быть на одной вертикальной линии с точностью лучше 0.1 мм**
- 2. Расположение новых секторов на радиусах более 50 см должно совпадать с положением старых секторов, т. к. уже выбрано место выводного окна на камере ускорителя. (Камера на заводе изготовлена и привезена в ПИЯФ).**
- 3. Модернизировать ЦО: А) Обеспечить АИ. Б) Для устойчивости по z на малых радиусах ускорения необходимо уменьшить спиральность магнитной структуры до радиуса ~40 см**
- 4. Модернизировать сектора на больших радиусах для получения устойчивого движения до выводного радиуса 0.9 м**

**Отметим, что все дальнейшие результаты основаны только на 3D расчетах**

## Модернизация секторов



3D расчеты показали,  
что  
для реализации пп.3,4  
необходимы:

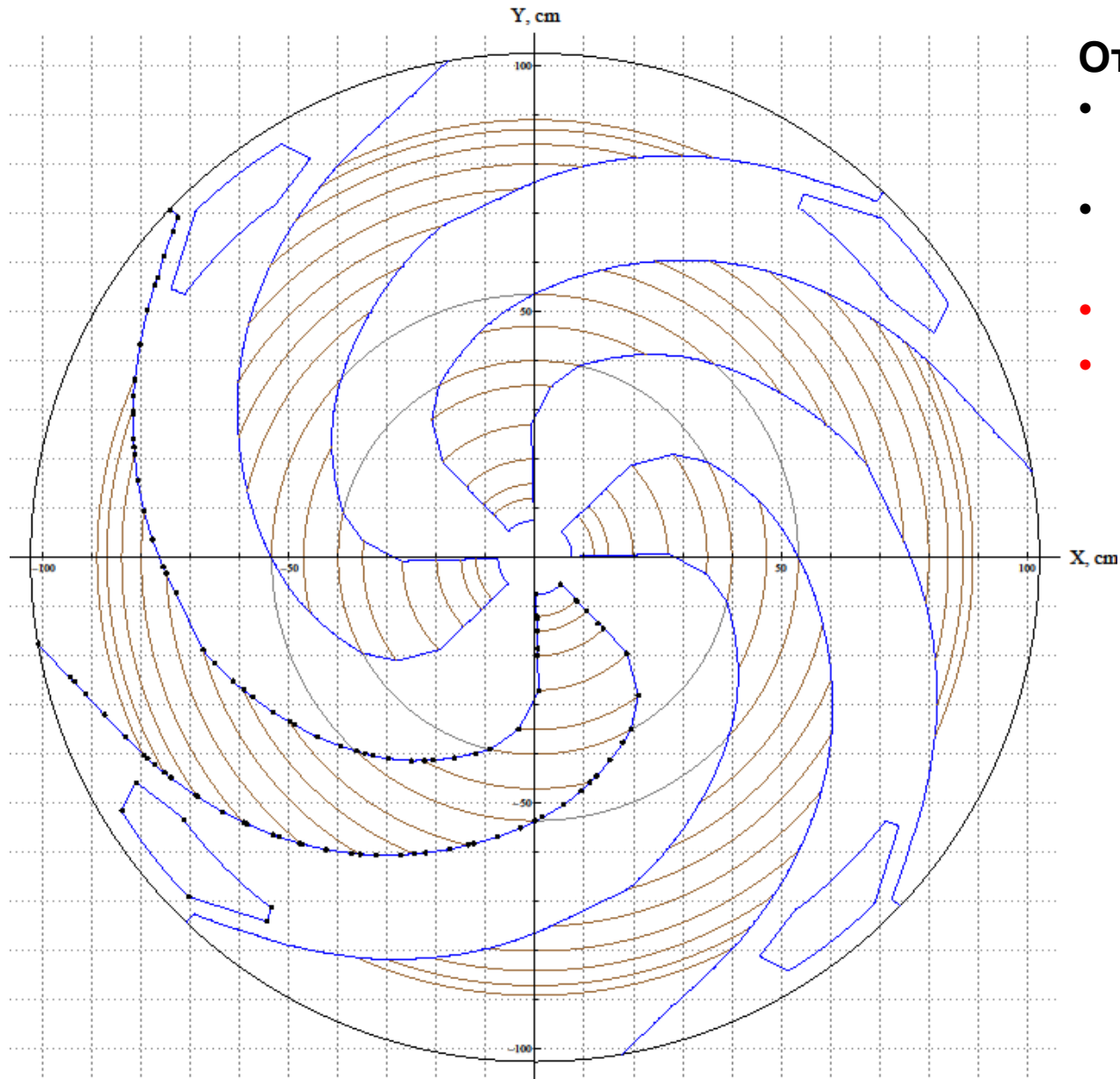
1. поворот «носика»,
2. расширение сектора ( $R > 70$ ),
3. Уменьшение зазора.

Это обеспечит  
достижения полной  
энергии ускорения до  
80 МэВ,

и при получении  
изохронности:  
увеличит частоты  
вертикальных и  
горизонтальных  
колебаний и уменьшит  
потери H- ионов на  
электродиссоциацию.



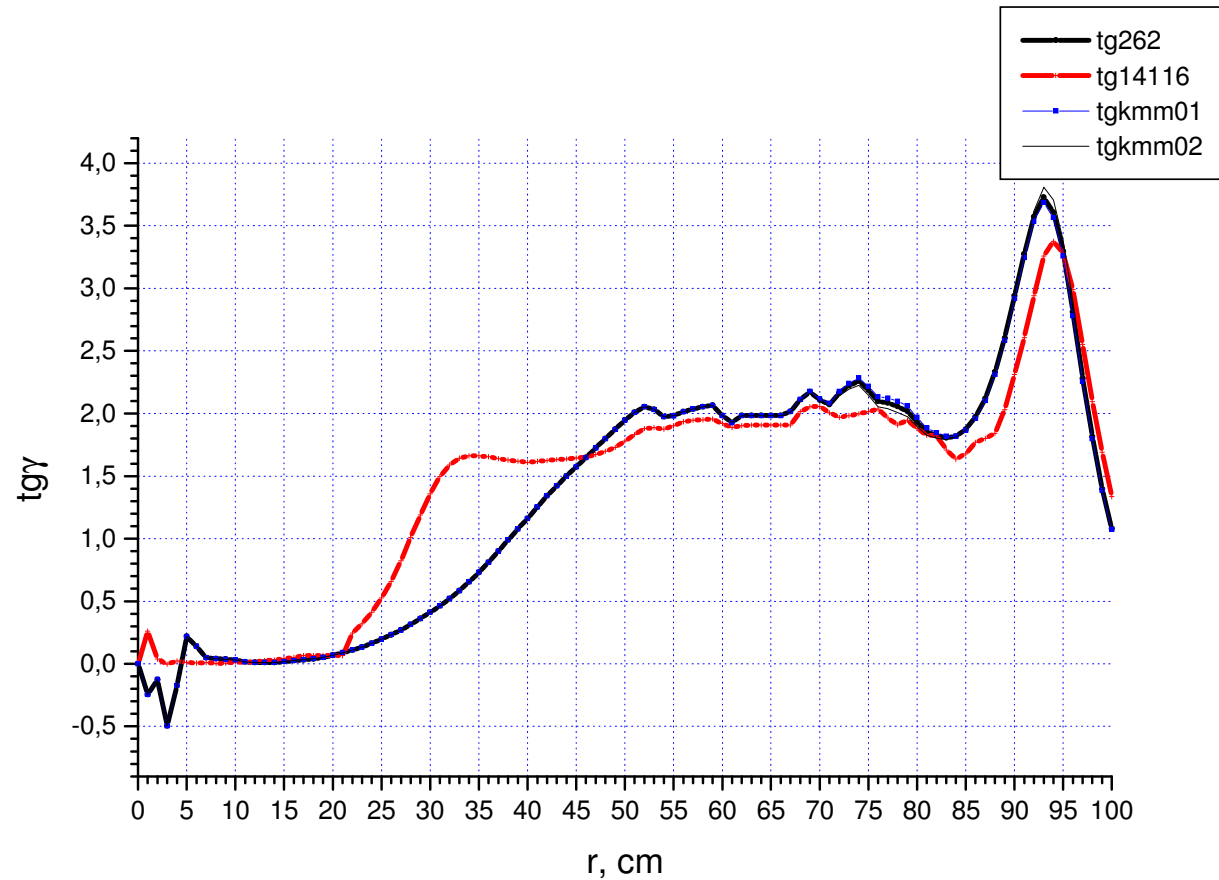
## Новая оптимальная МС С-80



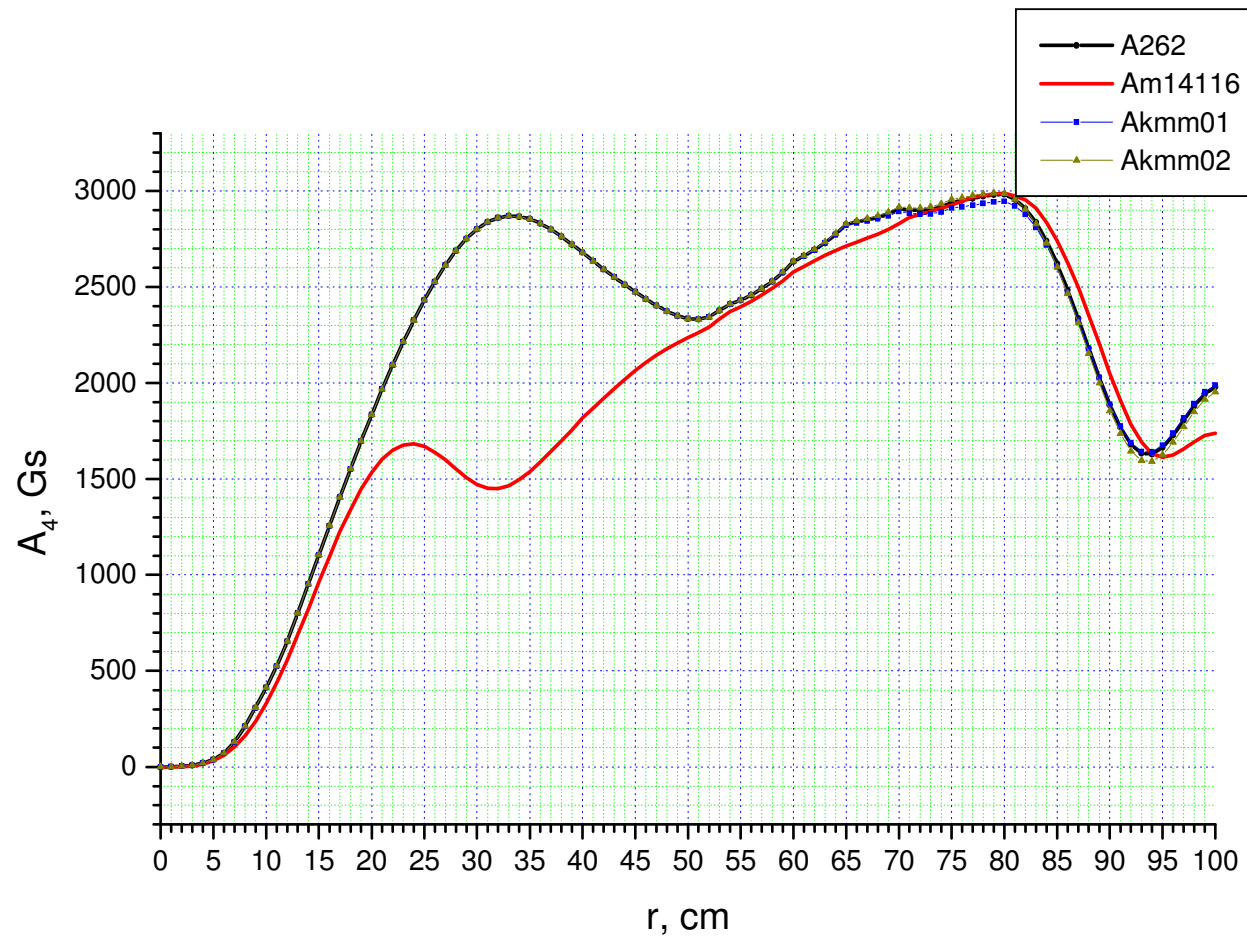
Отличия (red=new):

- Долинные шиммы: в одной долине - (4) **1**
- Секторные накладки: (16) **17**
- **Новая ЦО**
- **Зазор: (170) 164 мм**

**Поворот «носика» приводит к уменьшению магнитной спиральности поля на малых радиусах, и к ее РОСТУ за счет расширения сектора в критической области  $R \geq 80$  см**

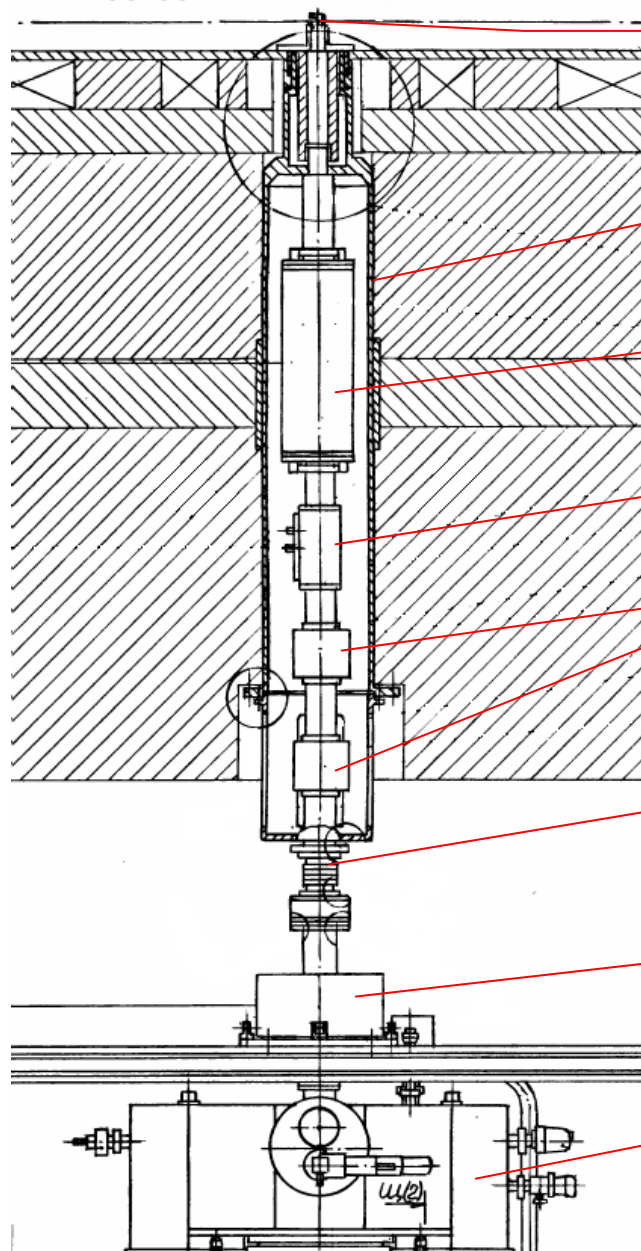


При этом амплитуда основной гармоники поля выросла на малых радиусах, но упала, к сожалению, на больших



# 3D расчетное поле использовано для системы аксиальной инжекции в новой МС С-80 (тракт транспортировки)

Медианная  
ПЛОСКОСТЬ



Инфлектор  
спиральный

Патрубок

Соленоид

ВЧ банчер

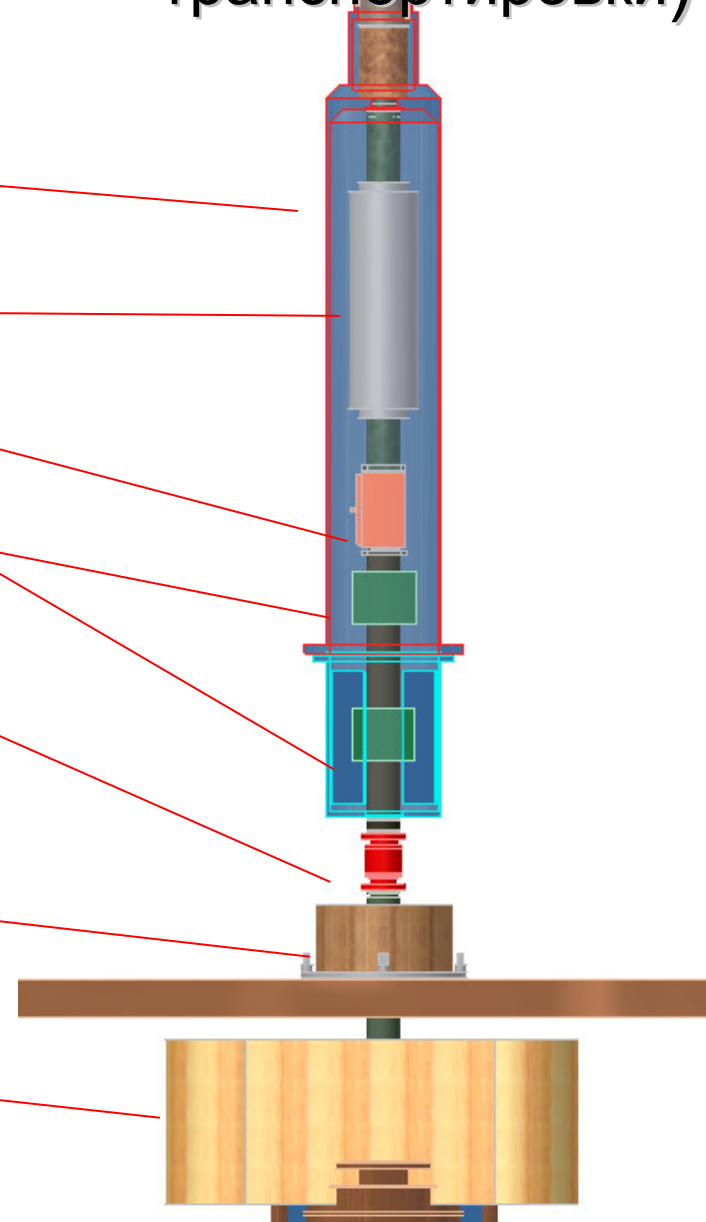
Фокусирующие  
электромагниты

Узел  
сильфонный

Соленоид

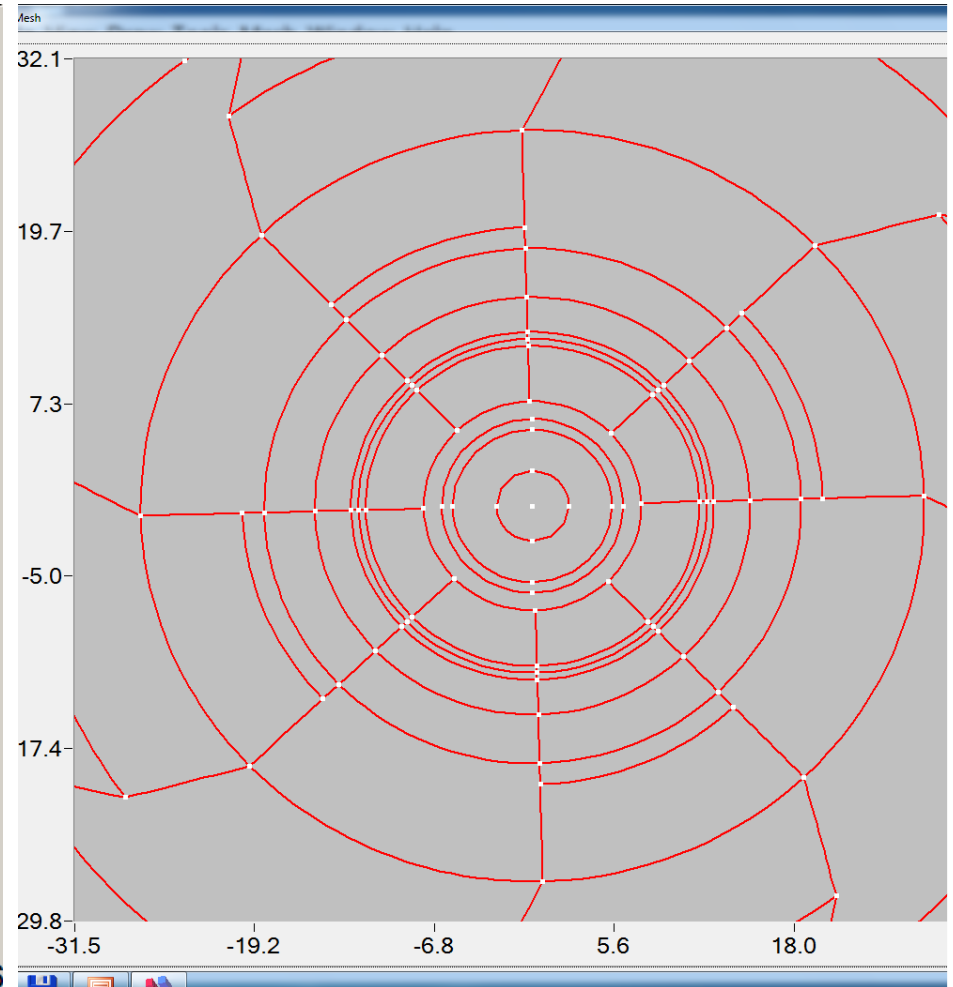
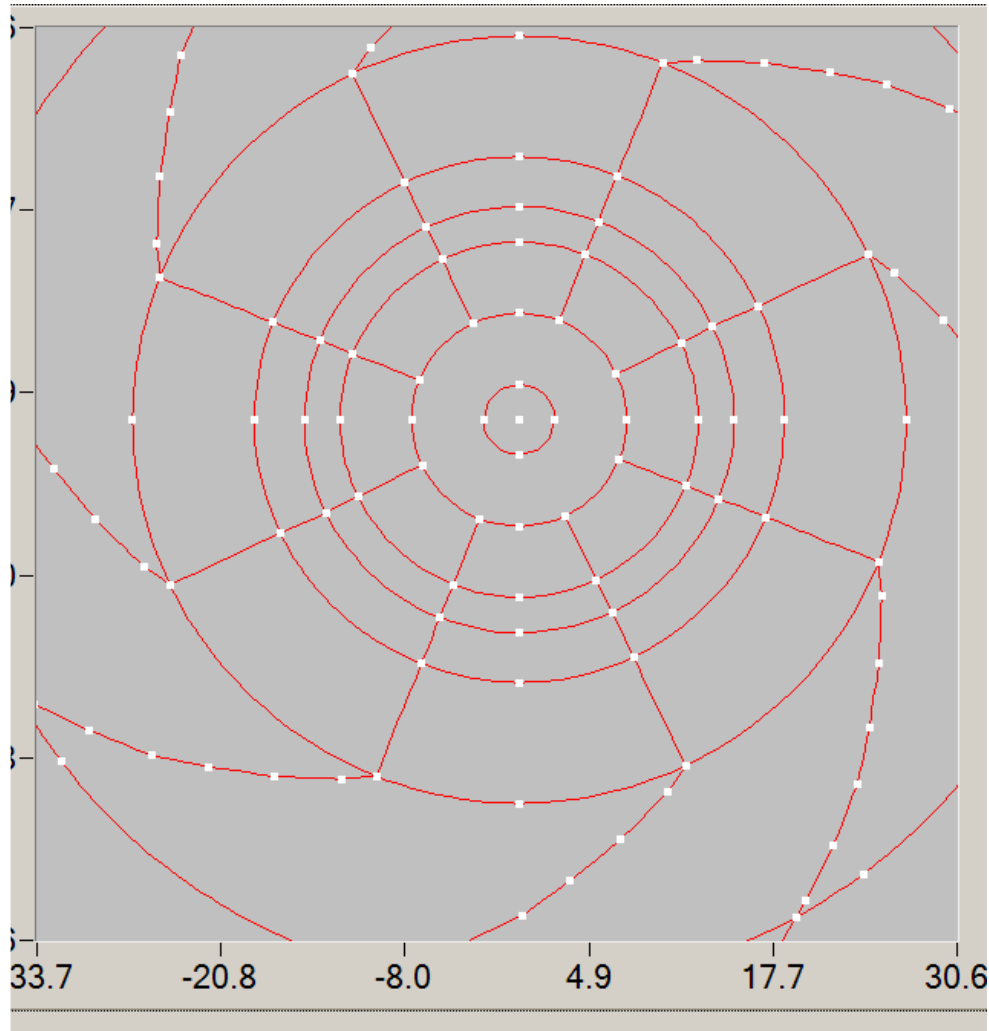
Ионный  
источник

транспортировки)



Старая ЦО: 2.5, 7.5, 12,15,18,27

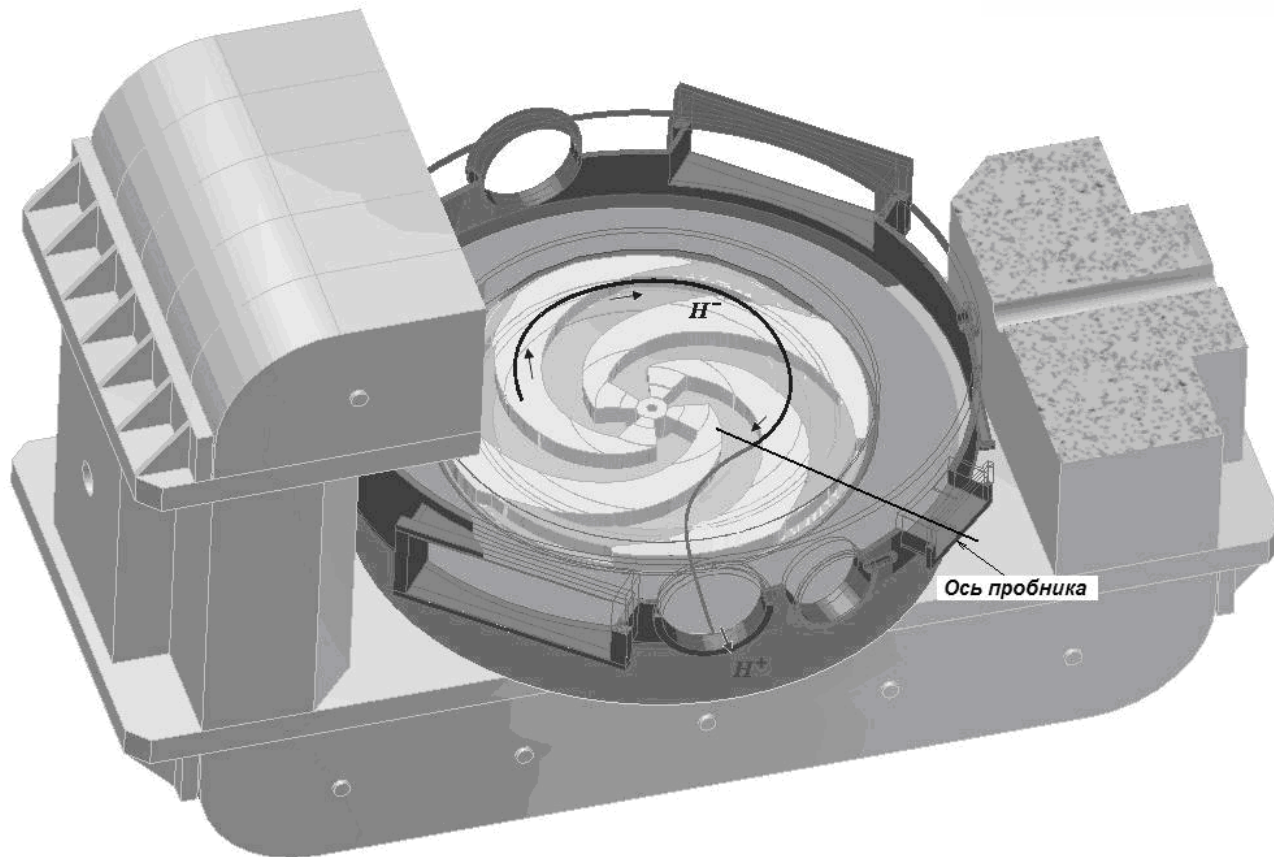
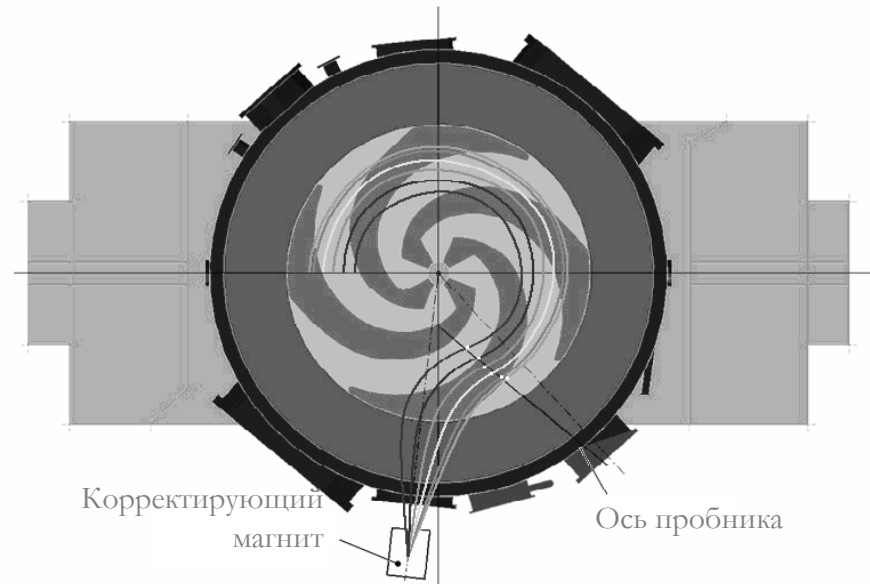
Новая ЦО: 2.5, 5.5, 6.25, 7.5, 11.5, 12, 12.5, 15, 18,20,27



23.05.2012

37

3D расчетное поле  
использовано и для  
системы вывода  $H^+$

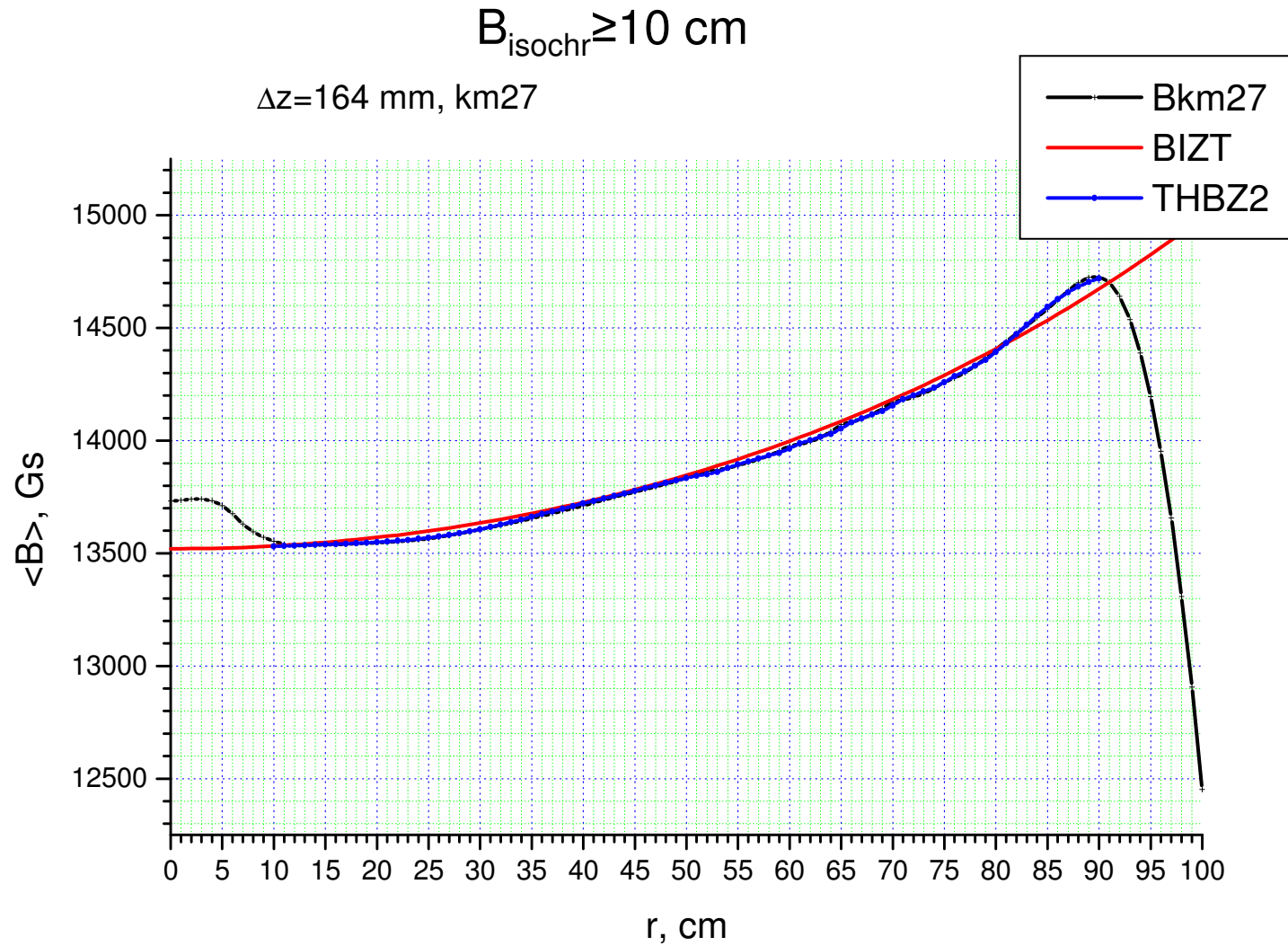


Основные  
параметры:

- $k = 100\%$
- С – углеродная фольга
- $\Delta E = 40-80$  МэВ
- $\Delta R = 0,65-1,0$  м

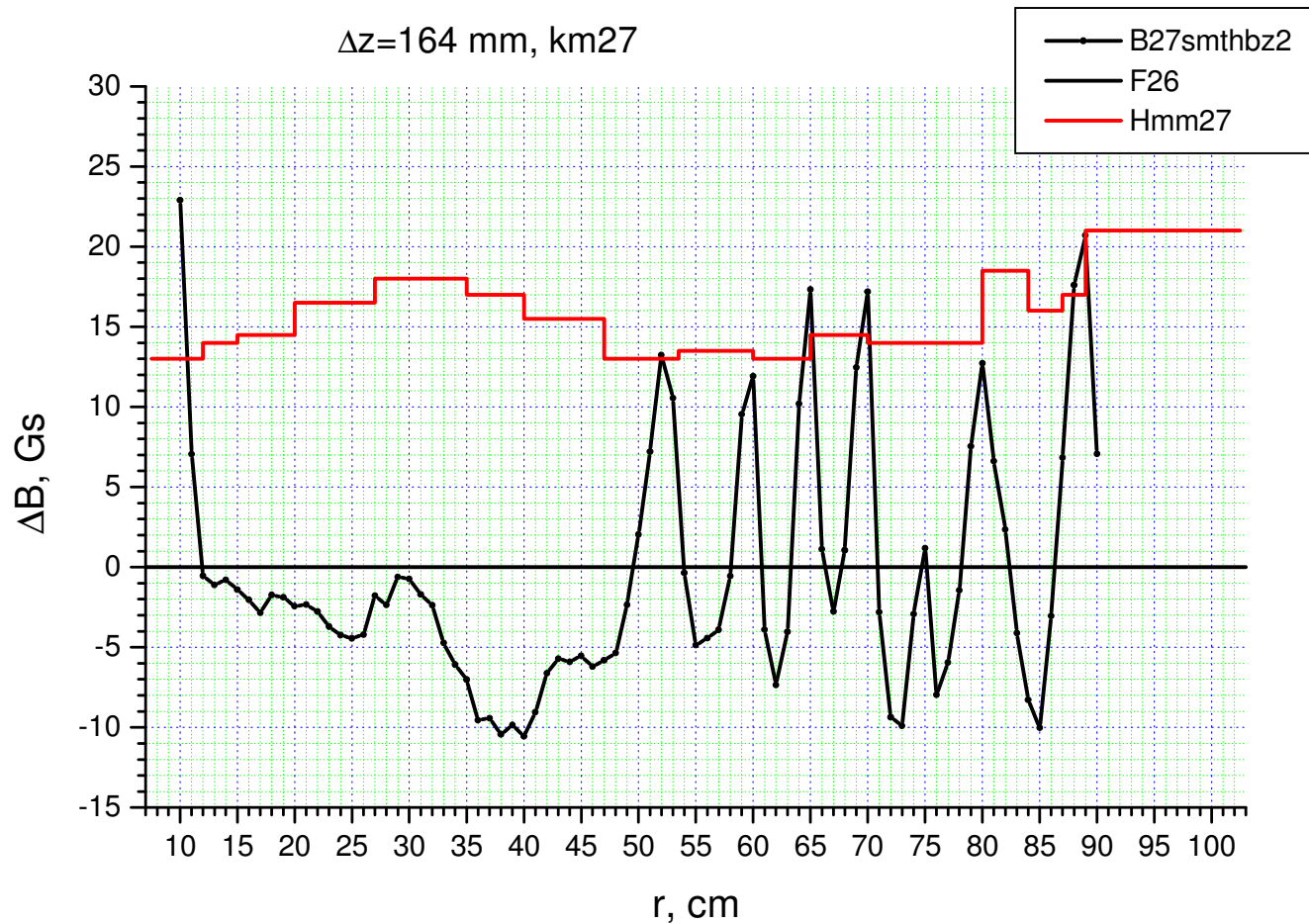


Для нового варианта секторов 3D расчет дает: среднее поле,  
 $B_0=13730$  Гс – для АИ



## ! Реакция МС на перепад высот секторных накладок при $R > 50$ см

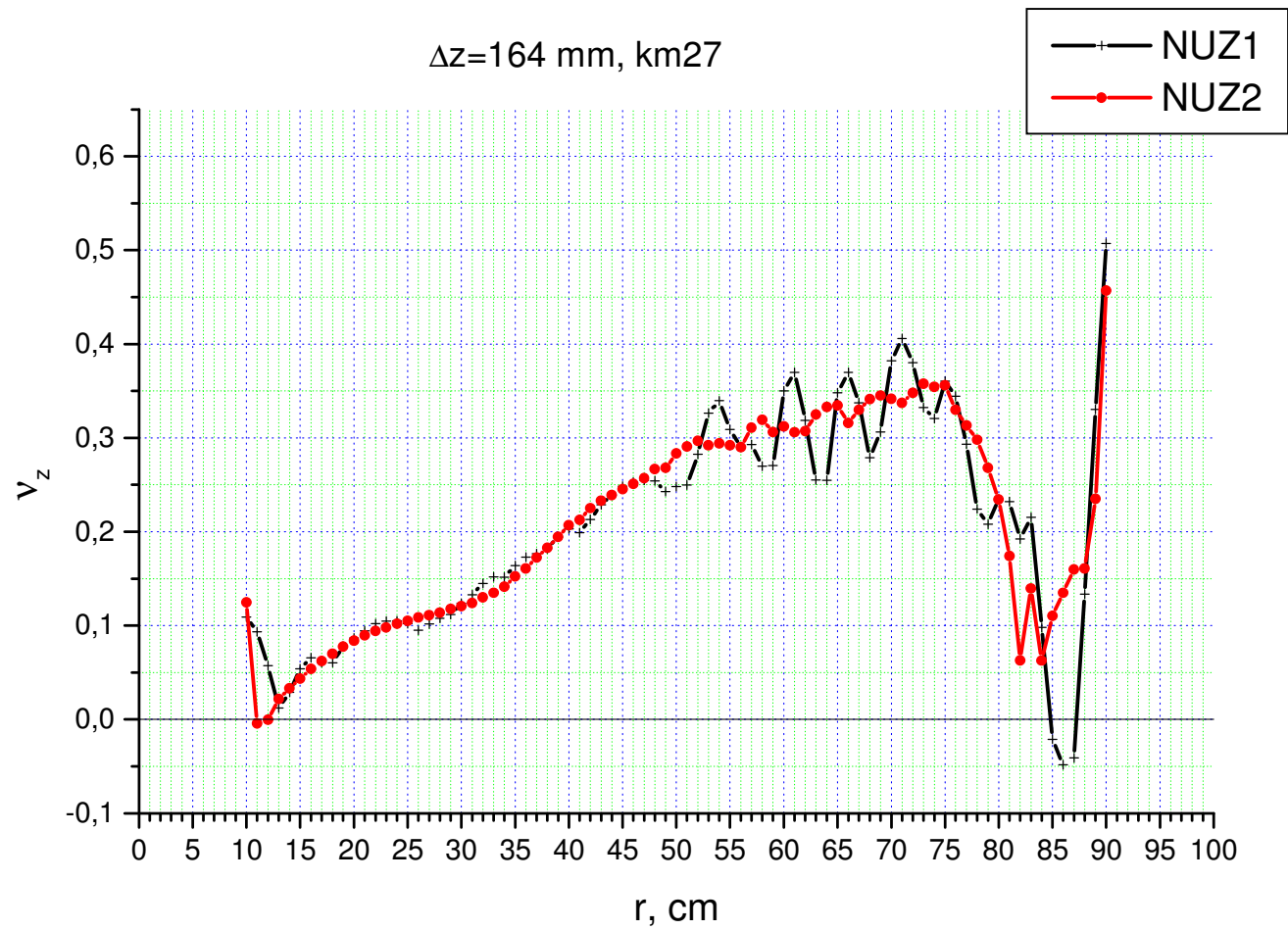
С другой стороны такая пила вызовет движение фазы ускоряемой частицы влево – вправо вблизи равновесного значения





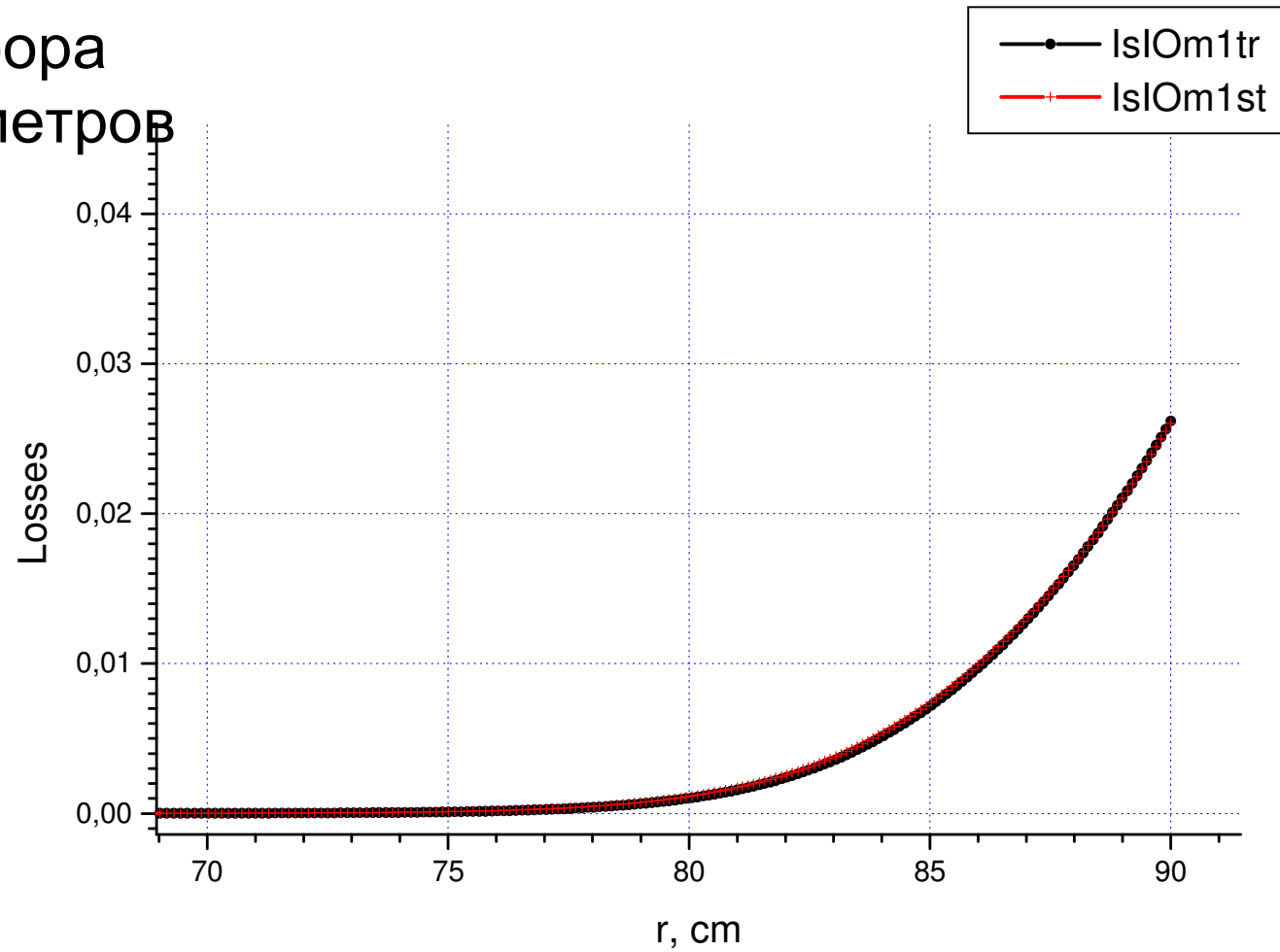
## Новый вариант секторов

- 3D расчет:
- частоты  $v_z$
- $v_r(90) = 1.02$



## Потери H<sup>-</sup> ионов в новой МС С-80 (~2.2-2.5%)

Два набора  
параметров



## Новый оптимальный вариант секторов (3D расчет)

- Всюду 3D расчет, зазор 164 мм:
- Боковая накладка (азимутальное расширение) в 20 мм от радиуса 70 см до конца сектора.
- Убраны все долинные шиммы, кроме катушечного вблизи  $R_{extr}$ ,
- Учтена реальная система аксиальной инжекции в ЦО
- Для обеспечения устойчивого движения вблизи ЦО произведен поворот «носика» секторов
- Сформирован бамп в ЦО
- Найден оптимальный набор секторных накладок:
- Устойчивость во всей области ускорения как по  $r$ , так и по  $z$
- Конечная энергия 80 МэВ
- Точность монтажа и изготовления с погрешностью  $\leq 0.1$  мм гарантирует симметрию по отношению к медианной плоскости.

## Следующие шаги

- Смонтировать новые сектора для последующих измерений
- На основе этих измерений и экспериментальной кривой  $\mu(B)$  выполнить уточняющие 3D расчеты, если они потребуются!
- В связке (3D расчет + эксперимент) провести окончательное шиммирование магнитного поля С-80
- В этом поле провести финальные расчеты динамики ускоряемых частиц в С-80

## Магнитная команда

- Процесс возглавили: **Абросимов Н.К.**, Рябов Г.А.,  
Иванов Е.М.
- 2D и 3D расчеты: **Артамонов С.А.**
- Обработка результатов измерений и 3D расчетов:  
**Артамонов С.А.**, Шевякова Н.В. – 1 этап,  
**Артамонов С.А.**, – 2 этап.
- Магнитные измерения: **Елисейев В.А.**, Горкин Г.И.,  
**Амерканов Д.А.**, **Артамонов С.А.**
- Калибровка датчиков Холла: Горкин Г.И., **Амерканов Д.А.**,  
**Артамонов С.А.**, **Чернов А.Н.**, **Чернова М.В.**
- Изготовление и установка шимм:  
**Гресь В.П.**, **Хануков М.**, **Горбунов В.**
- Сглаживание измеренного магнитного поля:  
**Кучер С.Е.**, **Рябов Г.А.**, **Чернов А.Н.**

Благодарю за внимание



23.05.2012

46