



**Опыт работы сильноточного линейного ускорителя
ионов водорода ИЯИ РАН
(Опыт настройки)**

Фещенко А.В.



Предварительные этапы:

- Юстировка оборудования ускоряюще-фокусирующего канала.
- Настройка ускоряющей системы, обеспечение требуемого пространственного распределения ускоряющих полей и его стабильности.
- Обеспечение требуемых уровней, временной стабильности и возможности регулирования в требуемых пределах ускоряющих и фокусирующих полей.

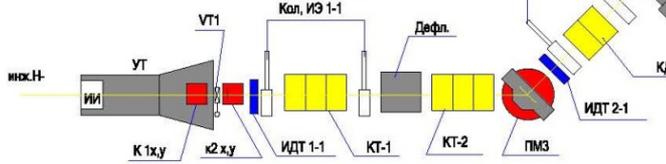
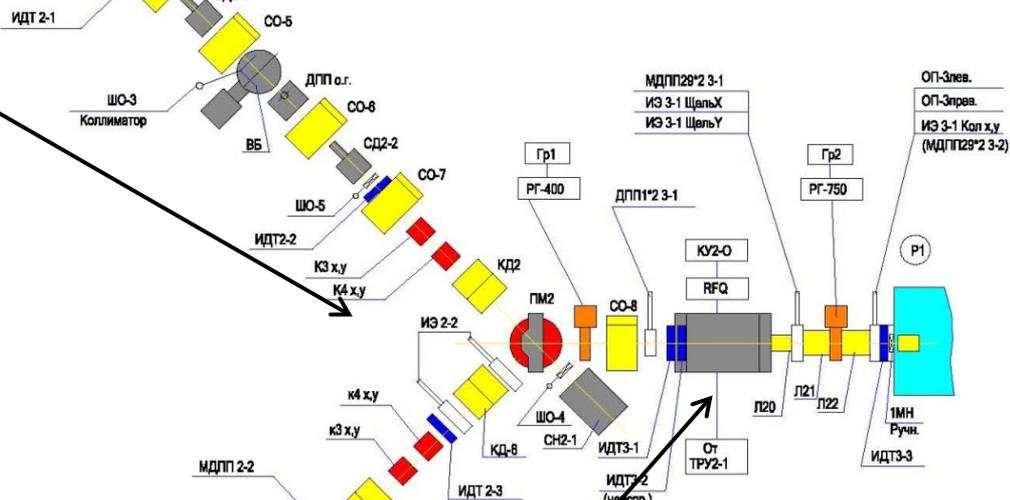
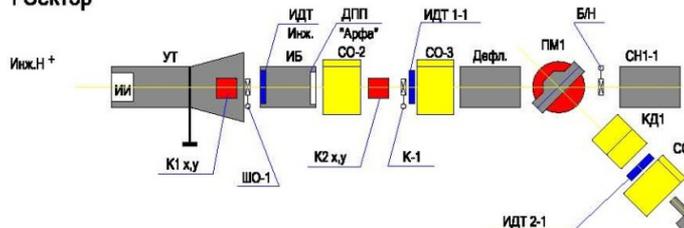
Этапы настройки:

- Установка проектных значений энергии инжекции, амплитуд и фаз ускоряющих полей, фокусирующих полей.
- Коррекция указанных значений по результатам измерений характеристик пучка.
- Оптимизация с целью обеспечения минимума потерь пучка и требуемой интенсивности.



Каналы инжекции

I Сектор



Изм.	Лист	№ докум.
Разраб.		Назаренко
Зав. ЛП	Мирошни	
Гл. Инж.	Серов	
Утверд.	Фещенко	

Листов
10

АН



Инжектор протонов

Платформа блоков питания ионного источника

Высоковольтный импульсный трансформатор 400 кВ

Стойка диодной стабилизации вершины высоковольтного импульса



Ионный источник : дуоплазматрон (разработка НИИЭФА)

Типичный режим - 70 мА, 200 мкс, 50 Гц

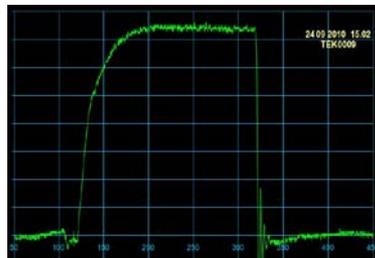
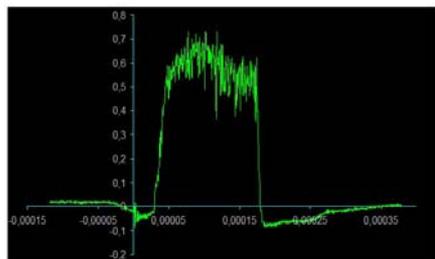
доля протонов ~ 90%

стабильность тока пучка ~ 1%

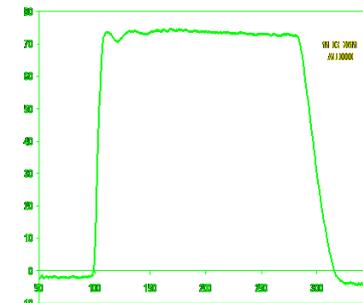
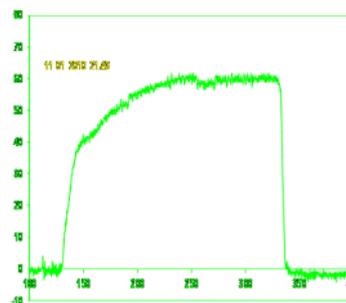
надежность > 99%

Эмиттанс (норм, 63%) = $0,03 \pm 0,05 \pi$ см²мрад

(в конце 80х годов ~ $0,4 \pi$ см²мрад)



Устранение шума на вершине импульса тока пучка за счет устранения колебаний в плазменном экспандере дуоплазматрона



Достигнуто улучшение формы импульса тока пучка установкой емкостного делителя на ускорительной трубке



Начальная часть ускорителя (100 МэВ)



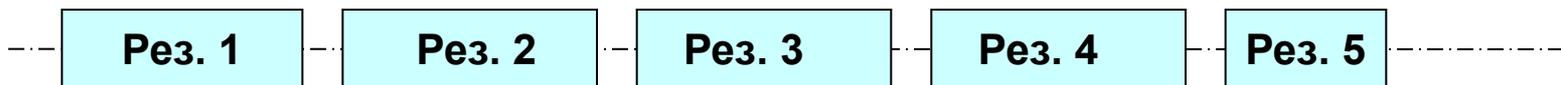
20 МэВ

49 МэВ

74 МэВ

94 МэВ

100 МэВ



5 резонаторов с трубками дрейфа

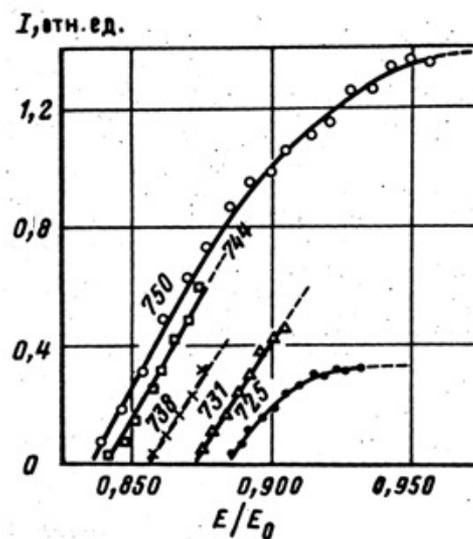
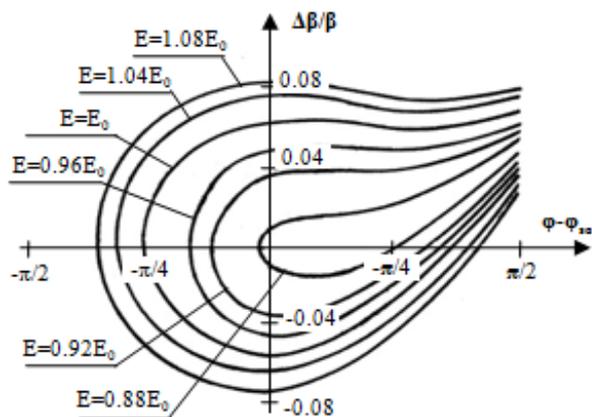
Частота - 198,2 МГц

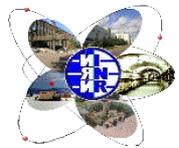
Выходная энергия - 100 МэВ



Установка амплитуды в первом ускоряющем резонаторе (20 МэВ).

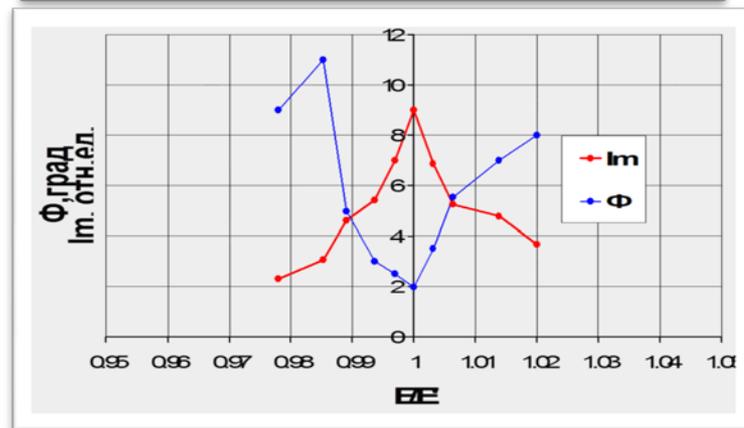
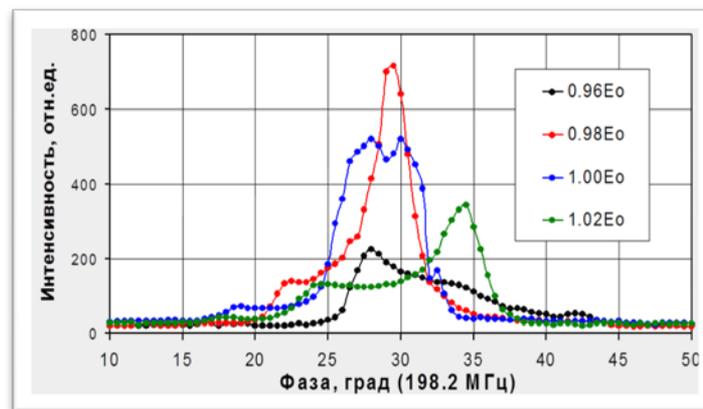
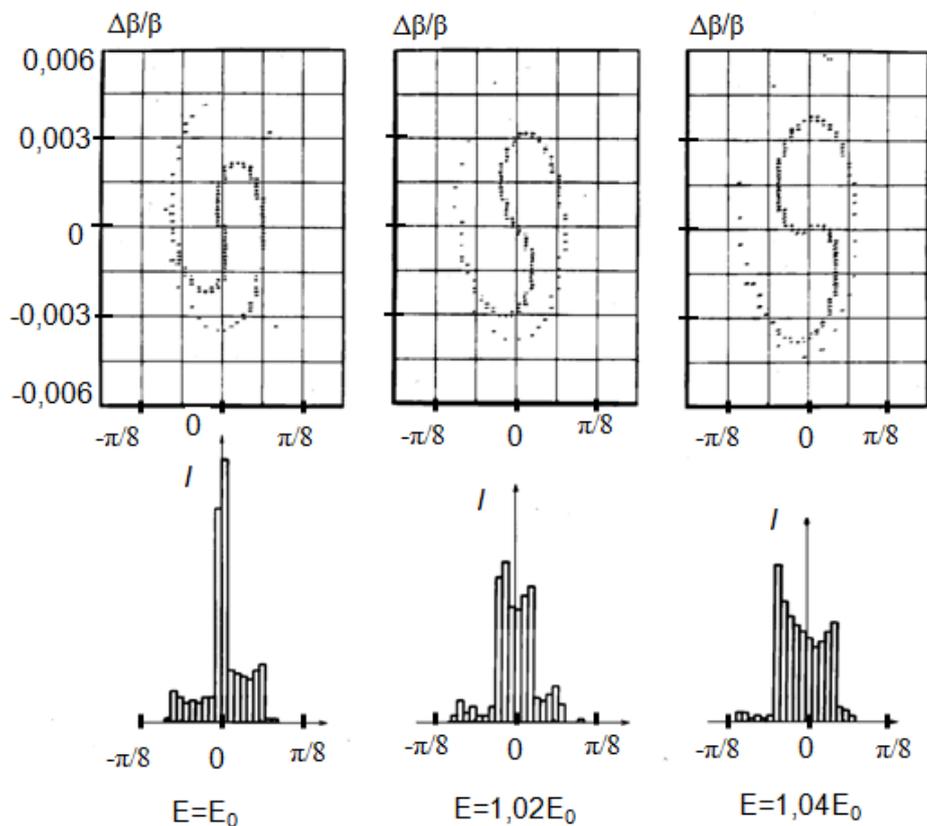
Метод отсечки





Установка амплитуды в первом ускоряющем резонаторе (20 МэВ).

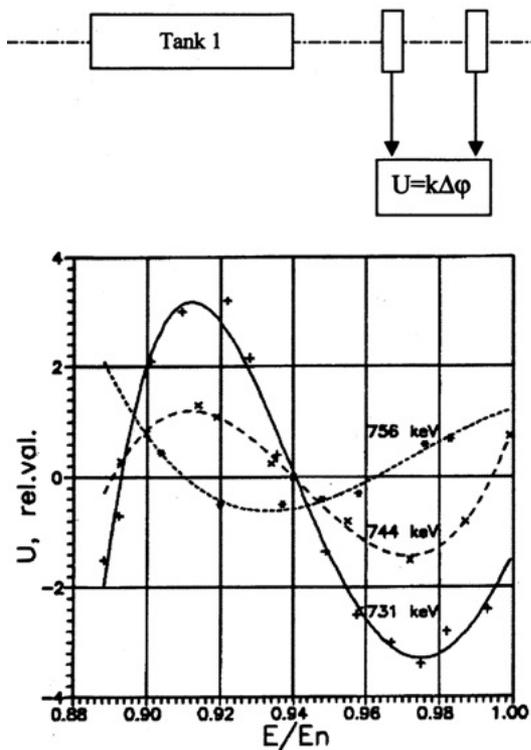
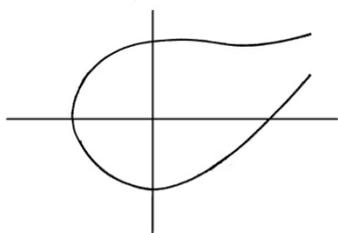
Регистрация набега фазы продольных колебаний по форме сгустка





Установка амплитуды в первом ускоряющем резонаторе ЛУ ММФ (20 МэВ)

Модуляция энергии при регулировании амплитуды



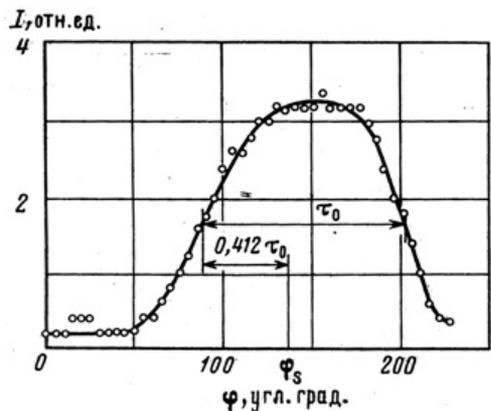
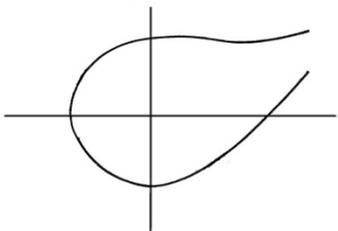


Метод зондирования сепаратрисы

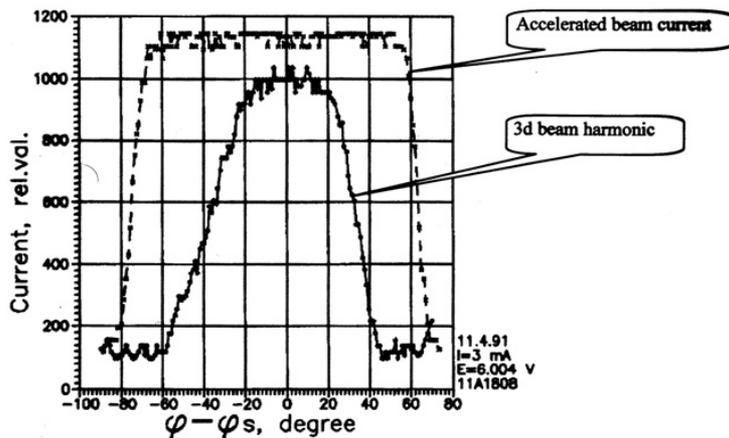
Используется для установки амплитуды и фазы поля в резонаторах 1, 2, 3 и 4.

Регистрируемые величины:

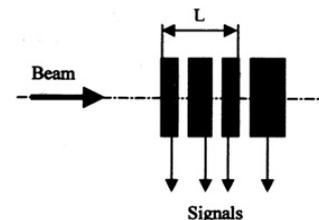
- Ток ускоренного пучка.
- Амплитуда гармоники тока пучка.
- Нагрузка пучком ускоряющего резонатора.



Резонатор №1 (ток ускоренного пучка)



Резонатор №4 (ток ускоренного пучка и амплитуда 3-ей гармоники)



Phase scan parameters

Tank #	W ₀ , MeV	W absorb. MeV	L, mm	Φ, deg	k
1	20			114	0.412
2	49	42.5	3.0	84	0.387
3	74	68.6	7.0	95	0.445
4	94	84.6	10.0	142	0.553
5	100	110.0	16.0		

Схема и параметры поглотителя для выделения ускоренных частиц (пластины из меди)



Пример реализации метода зондирования сепаратрисы

Сканирование - поглотитель#4_work.vi Front Panel

File Edit Operate Tools Browse Window Help

13pt Application Font

Резонатор 3 Резервный ВЧ канал OFF Амплитуда ВЧ поля в резонаторе, В/100 242 Число точек сканирования 120 Синхронная фаза, В/100 612 24_02_2010 19-15

Измерение Коррекция Обработка Запись данных в файл Установка синхронной фазы

Path (for Loading)

Загрузка файла данных

Работа с текущими данными

Аппроксимация OFF Тип аппроксимации Сглаживание Ранг аппроксимации 0

Требуемая амплитуда ВЧ поля, В/100 242,101

Отклонение амплитуды ВЧ поля от номинальной, % -0,04

Ширина на полувысоте, град 94,8531

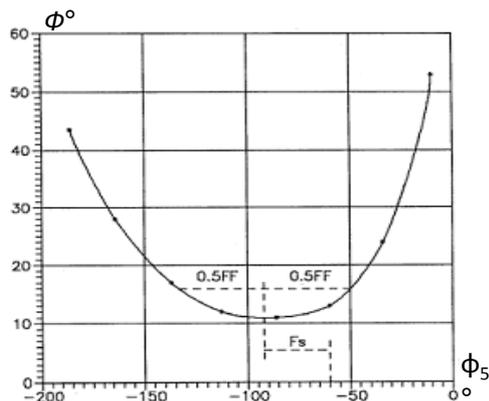
Уровень MIN, В/100 30 Уровень MAX, отн. ед. 0,97

	Резонатор 2	Резонатор 3	Резонатор 4
Номинальная ширина сепаратрисы, град	84,0	95,0	142,2

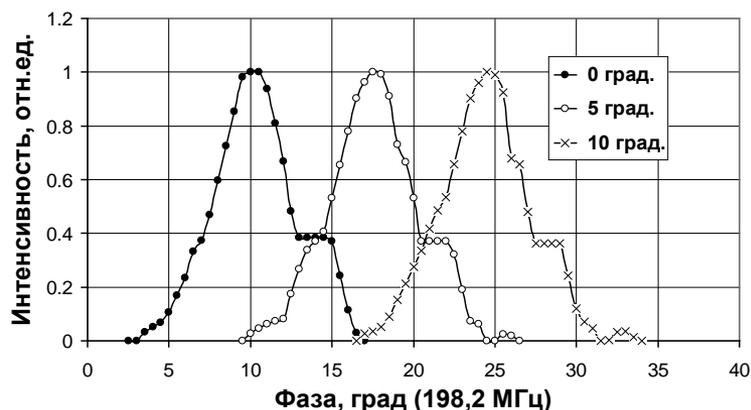


Установка амплитуды и фазы в ускоряющем резонаторе №5.

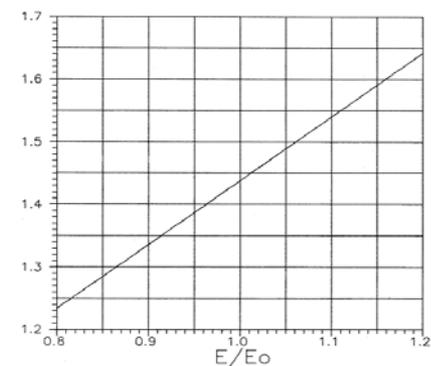
Основное назначение резонатора, - подавление когерентных продольных колебаний, - реализовано только в ручном режиме



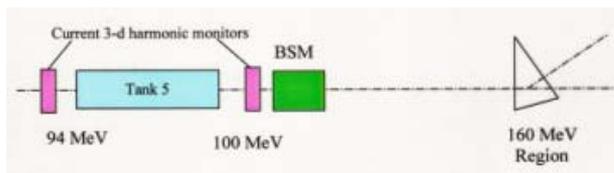
Зависимость фазовой протяженности сгустков от фазы поля в резонаторе



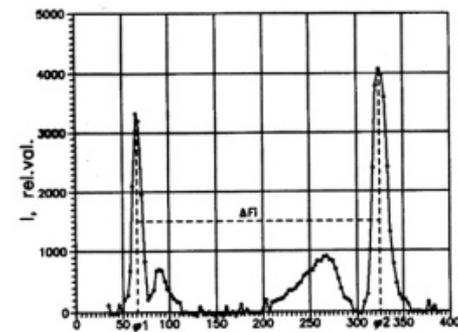
Изменение фазового положения сгустков на выходе резонатора при сдвиге фазы ускоряющего поля



Зависимость отношения смещения сгустка по фазе к сдвигу фазы ускоряющего поля от амплитуды.

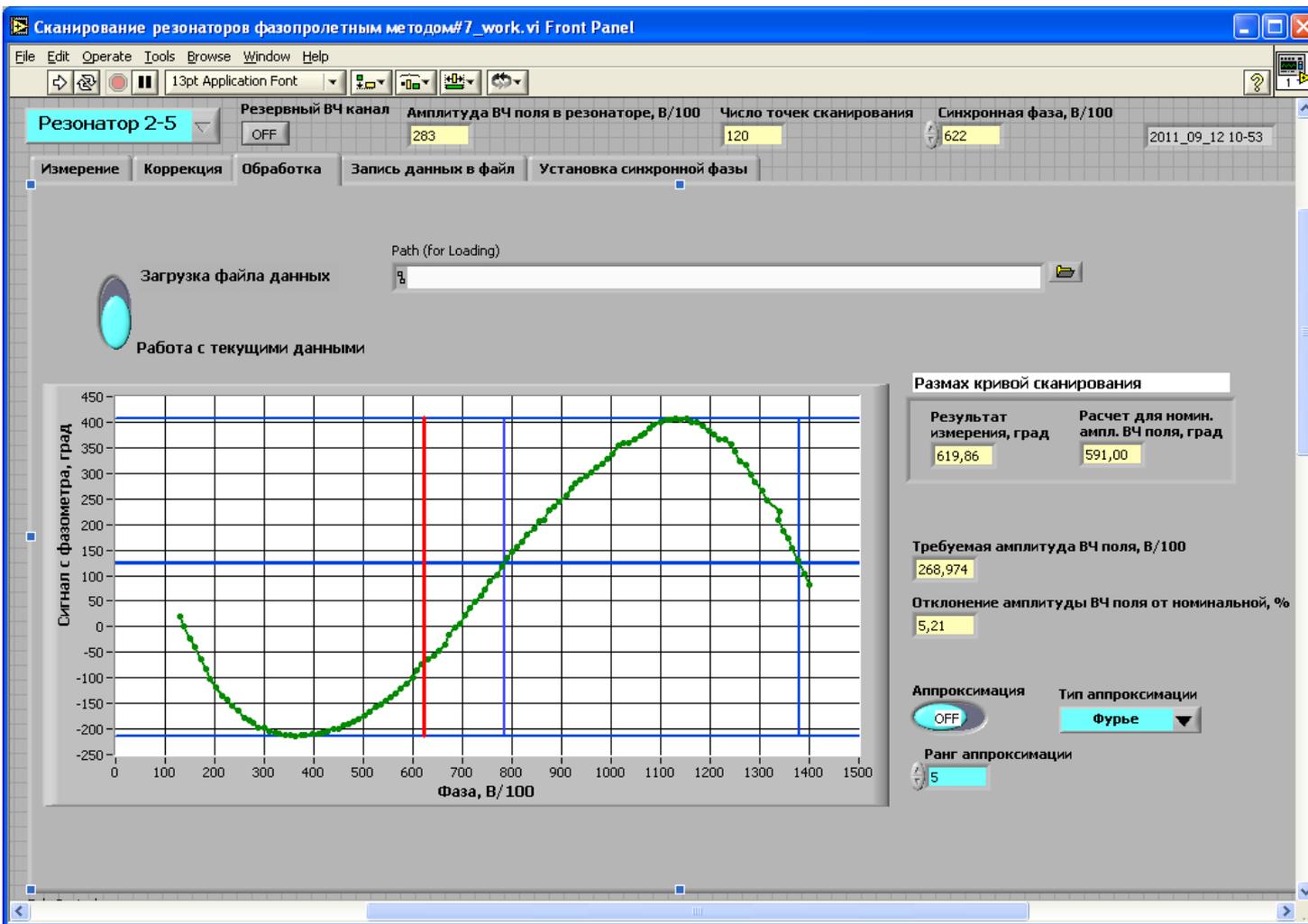


Зависимость интенсивности частиц выделенной энергии от фазы поля в резонаторе



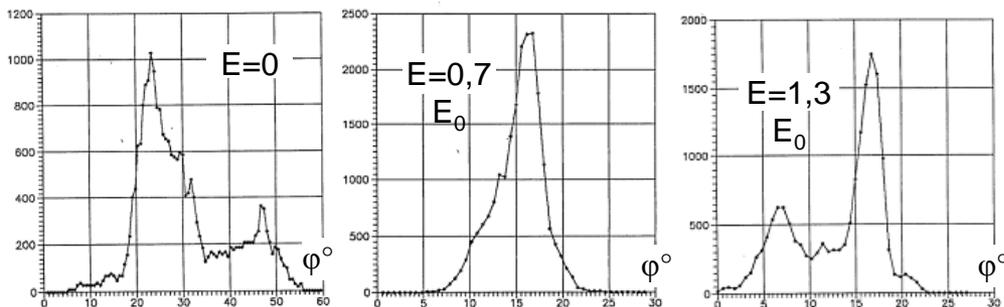


Пример установки амплитуды и фазы по разности фаз сигналов, наводимых пучком в датчиках гармоника тока на входе и выходе резонатора №5

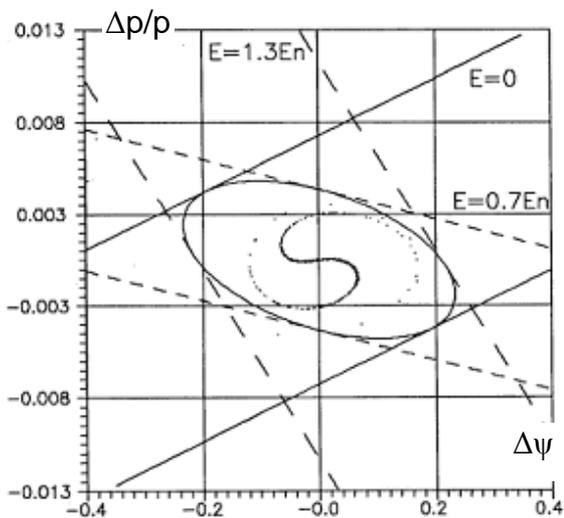




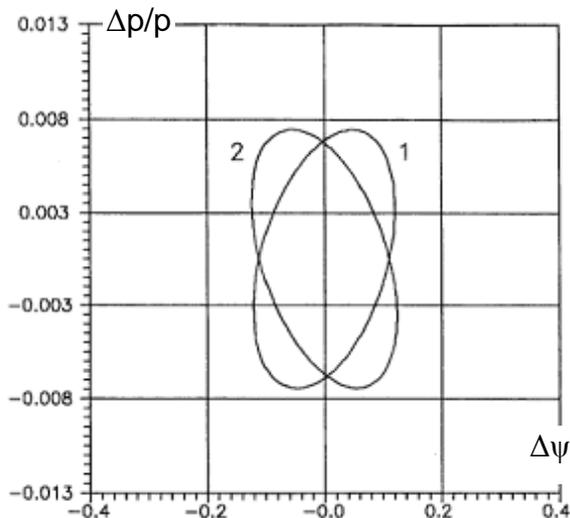
Измерение продольного эмиттанта на выходе начальной части (100 МэВ). Согласование по продольному движению.



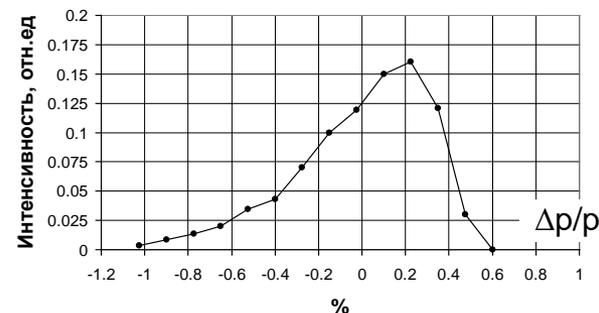
Измерение фазовых спектров при определении продольного эмиттанта.



Продольный фазовый эллипс на выходе четвертого резонатора.



Продольный фазовый эллипс на выходе пятого резонатора (1) и на входе основной части ускорителя (2).



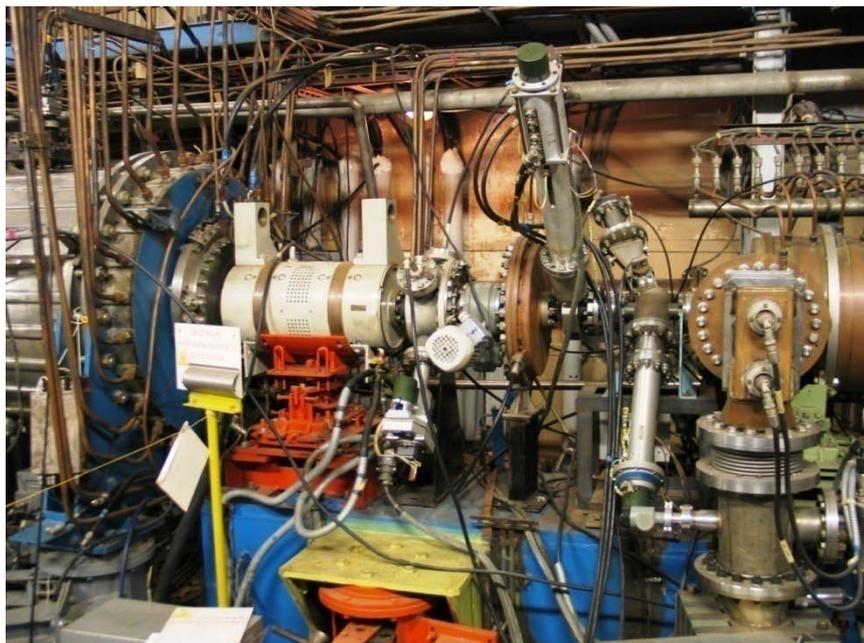
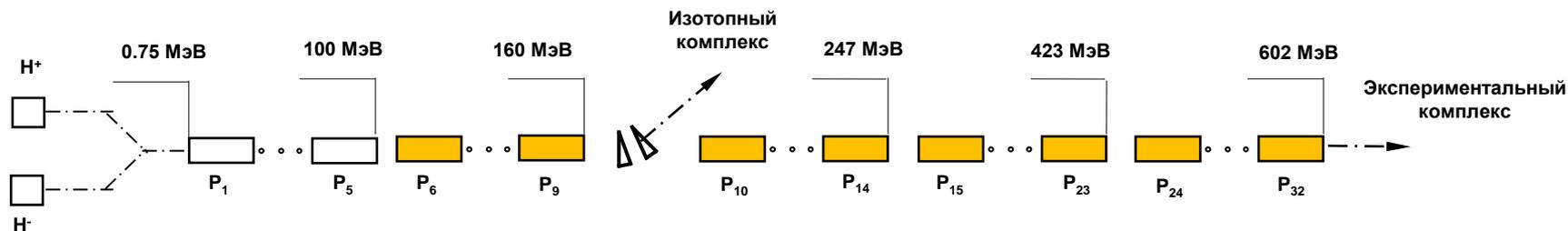
Энергетический спектр на выходе начальной части ЛУ ММФ.



Основная часть ускорителя (100-600 МэВ)



27 четырехсекционных резонаторов с шайбами и диафрагмами на частоте 991 МГц.



Участок перехода из начальной в основную часть ускорителя

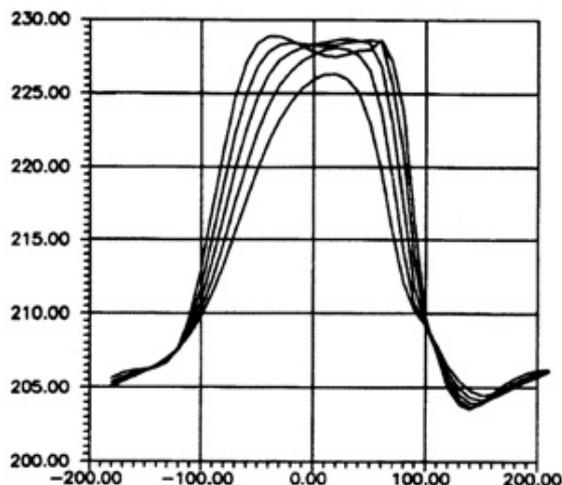


Ускоряющие резонаторы основной части ускорителя

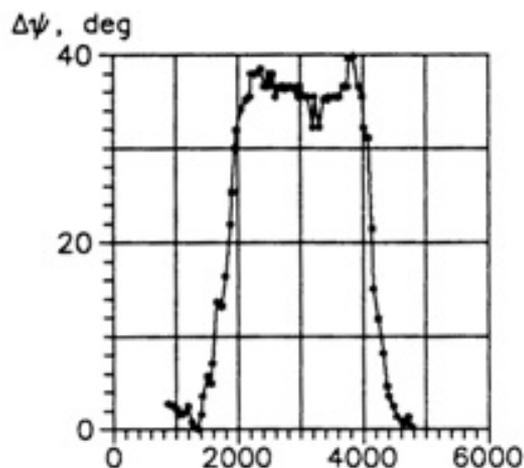


Установка амплитуды и фазы в резонаторах основной части.

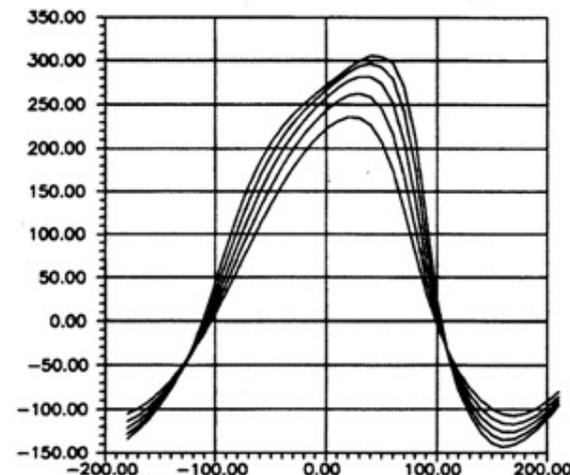
- «Зондирование сепаратрисы» – по нагрузке пучком.
- По разности фаз сигналов , наводимых пучком в датчиках гармоника тока.
- Δt -процедура (хорошо работает от 100 МэВ до $\sim 250\div 300$ МэВ).



Резонатор №13. Зависимость энергии от фазы для разных амплитуд



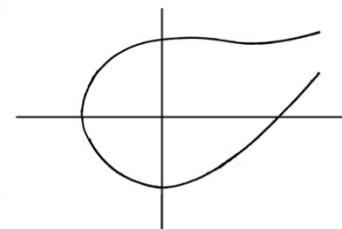
Резонатор №13. Зависимость разности фаз сигналов в двух датчиках , расположенных на участке дрейфа после резонатора, от фазы.



Резонатор №13. Зависимость разности фаз сигналов в двух датчиках , расположенных на входе и выходе резонатора, от фазы



Δt-процедура



Delta-t процедура#10_work.vi Front Panel

File Edit Operate Tools Browse Window Help

13pt Application Font

Измерение **Обработка** Запись данных в файл Установка синхронной фазы

Резонатор 3-1 Число точек сканирования: 11 Амплитуда ВЧ по: 286

Загрузка файла данных Path (for Loading): % dWa, keV: 84,19 Требуемая синхронная фаза, В/100: 123,38 E номин., В/100: 289,92 dE/E, %: -1,4

Работа с текущими данными

F1, deg

Ноль АРФ, В/100

F2, deg

Ноль АРФ, В/100

F2, deg

F1, deg

1. Измеренные точки
2. Линия перем. фазы (линейная аппроксимация по точкам 1)
3. Dt - модернизированная (перпендикуляр к 2)
4. Линия синхр. фазы (a11*F1+a12*F2=dPhi=0)
5. Отклон. энергии в "минус" на линии 4
6. Отклон. энергии в "плюс" на линии 4
7. Отклон. по фазе рез-ра в "плюс" на линии 2
8. Отклон. по фазе рез-ра в "минус" на линии 2
9. a21*F1 + a22*F2 = dWa = 0 (для dE/E=0)

Alpha, deg

dE/E, %

Зависимость угла наклона линии переменной фазы от амплитуды поля

Alpha, deg
34,47

АВ-OFF, АС-OFF (дрейф) АВ-ON, АС-ON Параметры граф. представления Схема Доп. результаты

$$F1 = (\Delta\varphi_{\text{АВ-OFF изм.}} - \Delta\varphi_{\text{АВ-ON изм.}}) - (\Delta\varphi_{\text{АВ-OFF расч.}} - \Delta\varphi_{\text{АВ-ON расч.}})$$

$$F2 = (\Delta\varphi_{\text{АС-OFF изм.}} - \Delta\varphi_{\text{АС-ON изм.}}) - (\Delta\varphi_{\text{АС-OFF расч.}} - \Delta\varphi_{\text{АС-ON расч.}})$$



Δt-процедура

Delta-t процедура#10_work.vi Front Panel

File Edit Operate Tools Browse Window Help

13pt Application Font

Измерение **Обработка** Запись данных в файл Установка синхронной фазы 15_04_2007 0-41

Резонатор 3-9

Число точек сканирования: 11

Амплитуда ВЧ поля в резонаторе, В/100: 298

Загрузка файла данных: Работа с текущими данными

Path (For Loading): []

dWa, keV: -7,59

Требуемая синхронная фаза, В/100: 294,47

Е номин., В/100: 299,18

dE/E, %: -0,4

F1, deg

Ноль АРФ, В/100

F2, deg

Ноль АРФ, В/100

F2, deg

F1, deg

1. Измеренные точки
2. Линия перем. фазы (линейная аппроксимация по точкам 1)
3. Dt - модернизированная (перпендикуляр к 2)
4. Линия синхр. фазы (a11*F1+a12*F2=dFIa=0)
5. Отклон. энергии в "минус" на линии 4
6. Отклон. энергии в "плюс" на линии 4
7. Отклон. по фазе рез-ра в "плюс" на линии 2
8. Отклон. по фазе рез-ра в "минус" на линии 2
9. a21*F1 + a22*F2 = dWa = 0 (для dE/E=0)

Alpha, deg

dE/E, %

Зависимость угла наклона линии переменной фазы от амплитуды поля

Alpha, deg

54,90

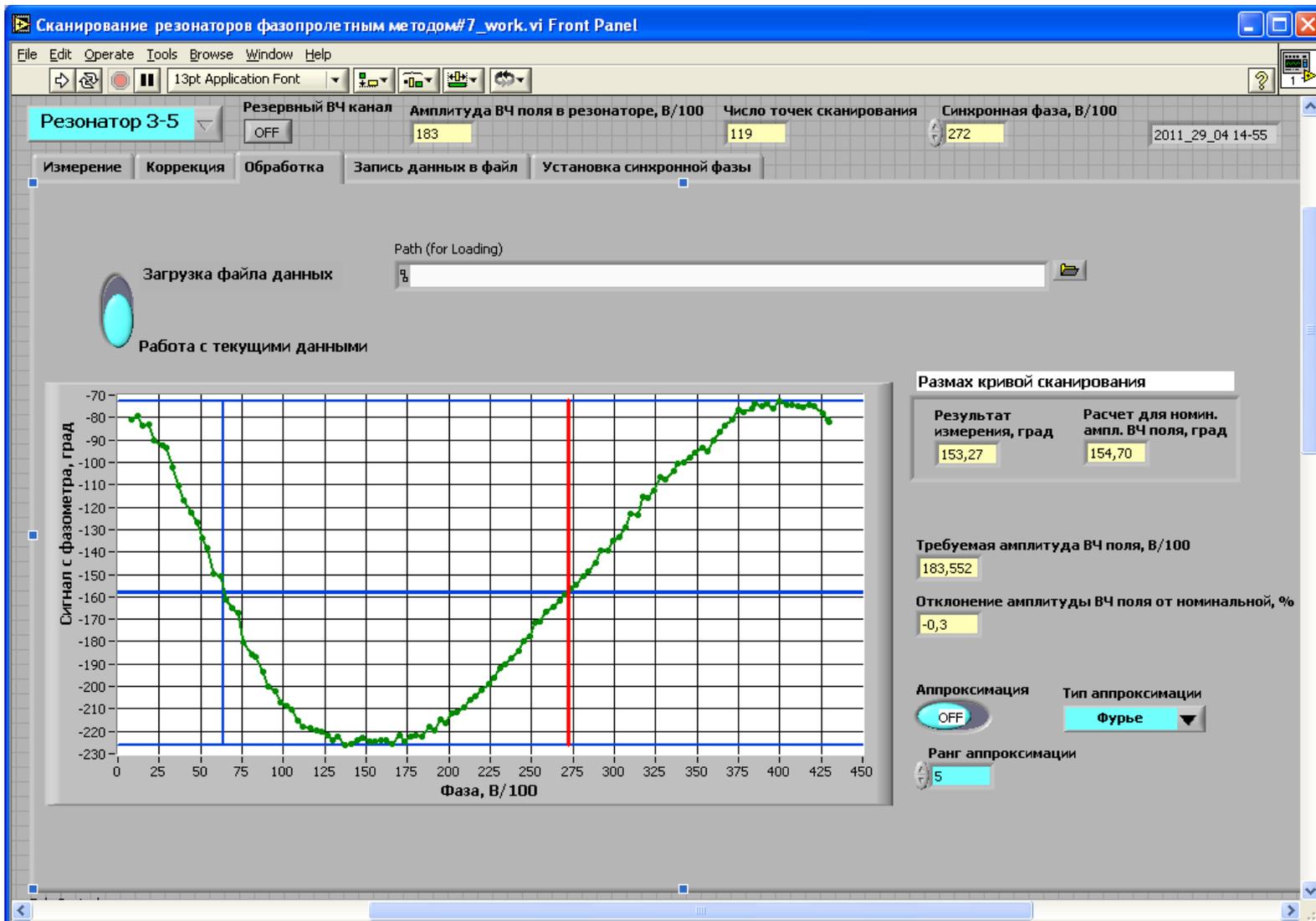
АВ-OFF, АС-OFF (дрейф) АВ-ON, АС-ON Параметры граф. представления Схема Доп. результаты

$$F1 = (\Delta\varphi_{\text{АВ-OFF изм.}} - \Delta\varphi_{\text{АВ-ON изм.}}) - (\Delta\varphi_{\text{АВ-OFF расч.}} - \Delta\varphi_{\text{АВ-ON расч.}})$$

$$F2 = (\Delta\varphi_{\text{АС-OFF изм.}} - \Delta\varphi_{\text{АС-ON изм.}}) - (\Delta\varphi_{\text{АС-OFF расч.}} - \Delta\varphi_{\text{АС-ON расч.}})$$



Установка амплитуды и фазы в согласующем резонаторе на участке промежуточного вывода (160 МэВ)

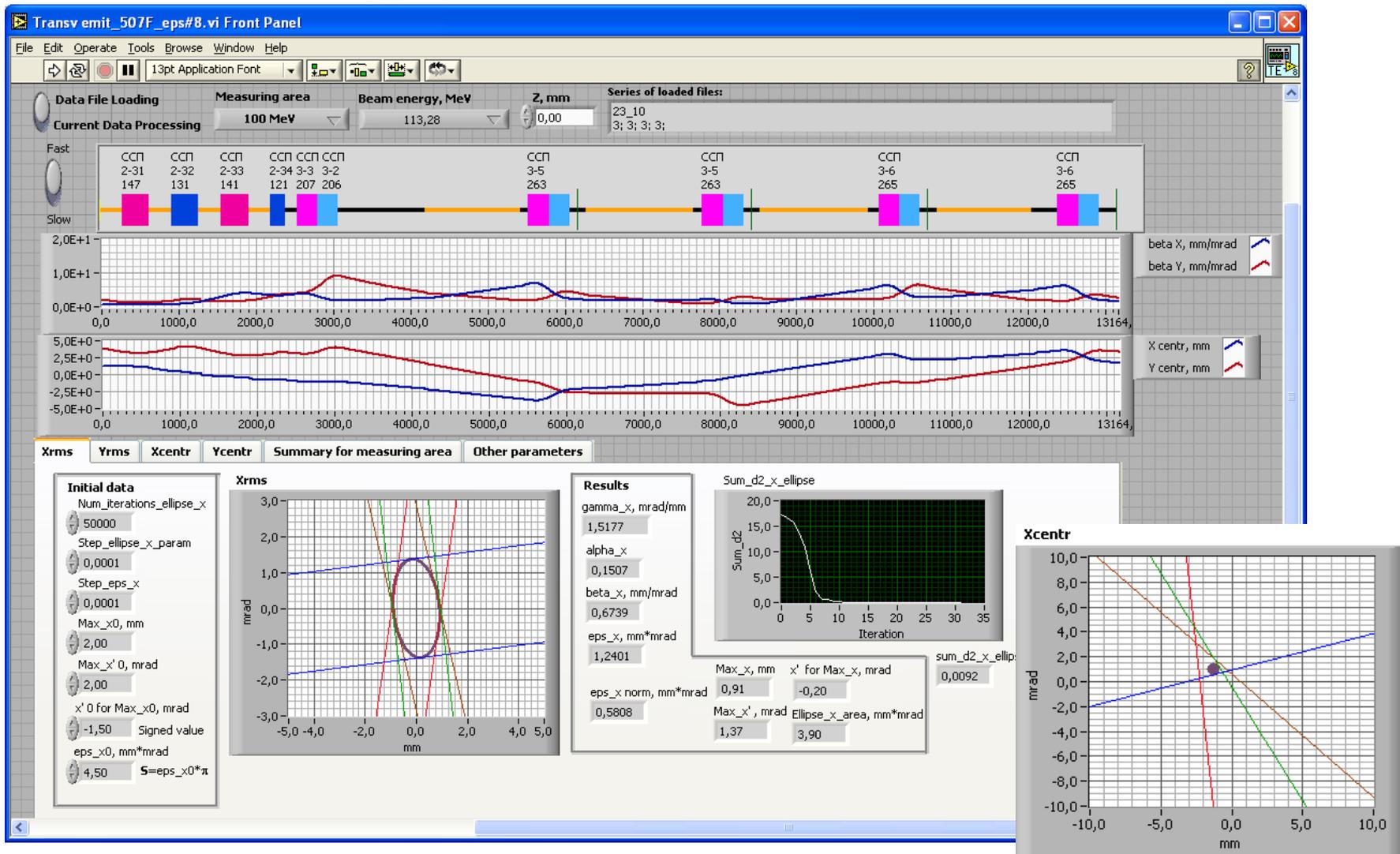


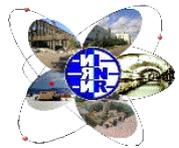


Некоторые вопросы поперечной настройки



- Согласование.
- Коррекция положения.

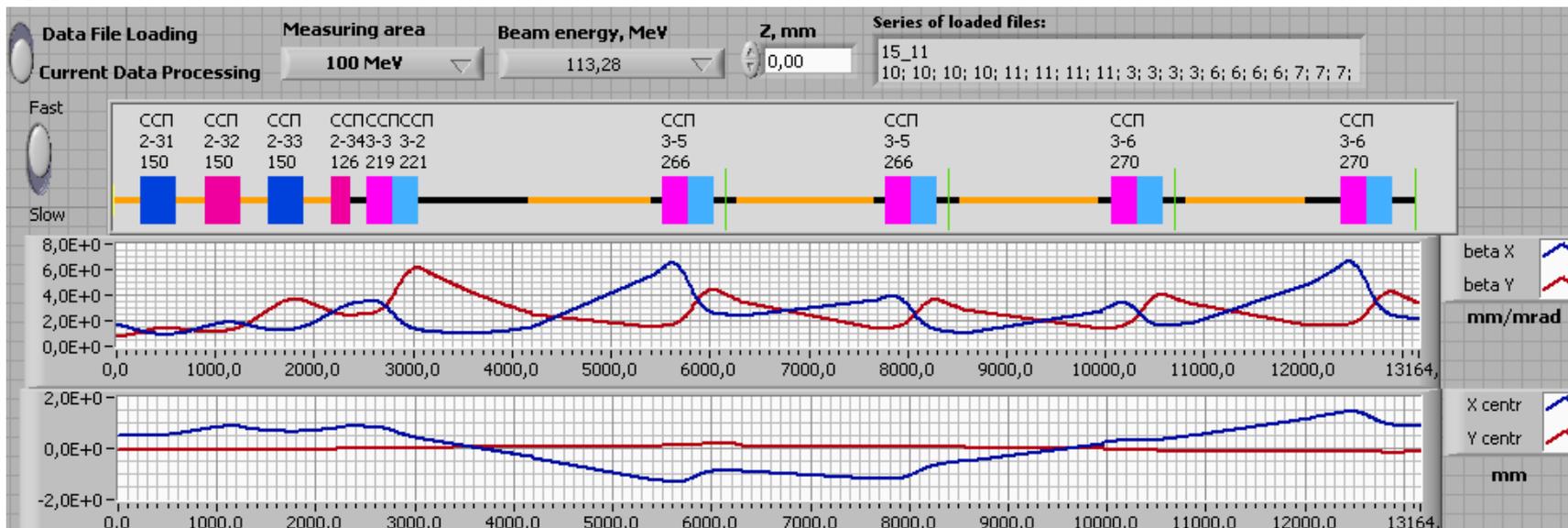




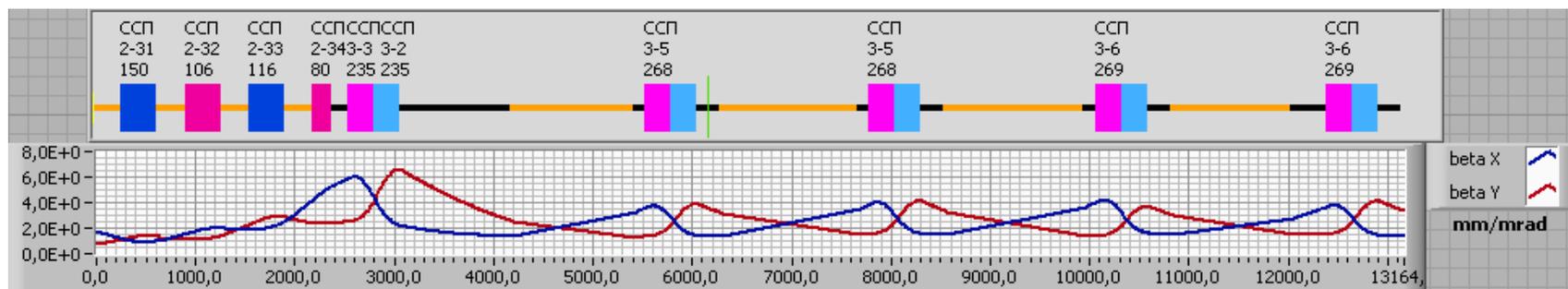
Пример согласования пучка на участке перехода из начальной в основную часть



До согласования

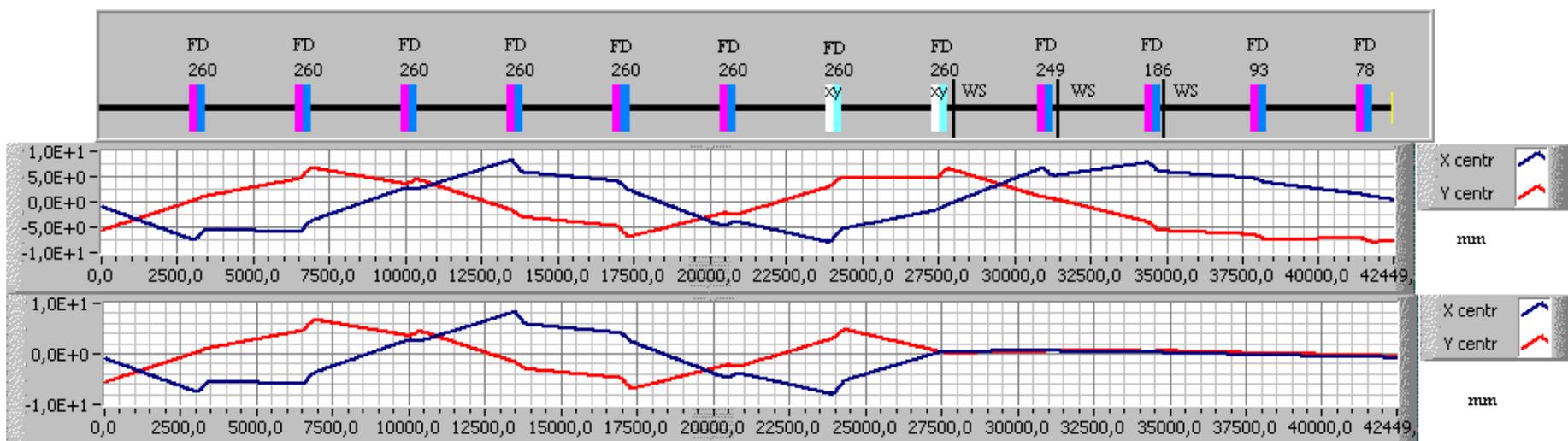


После согласования





Пример коррекции пучка на участке промежуточного вывода (160 МэВ)



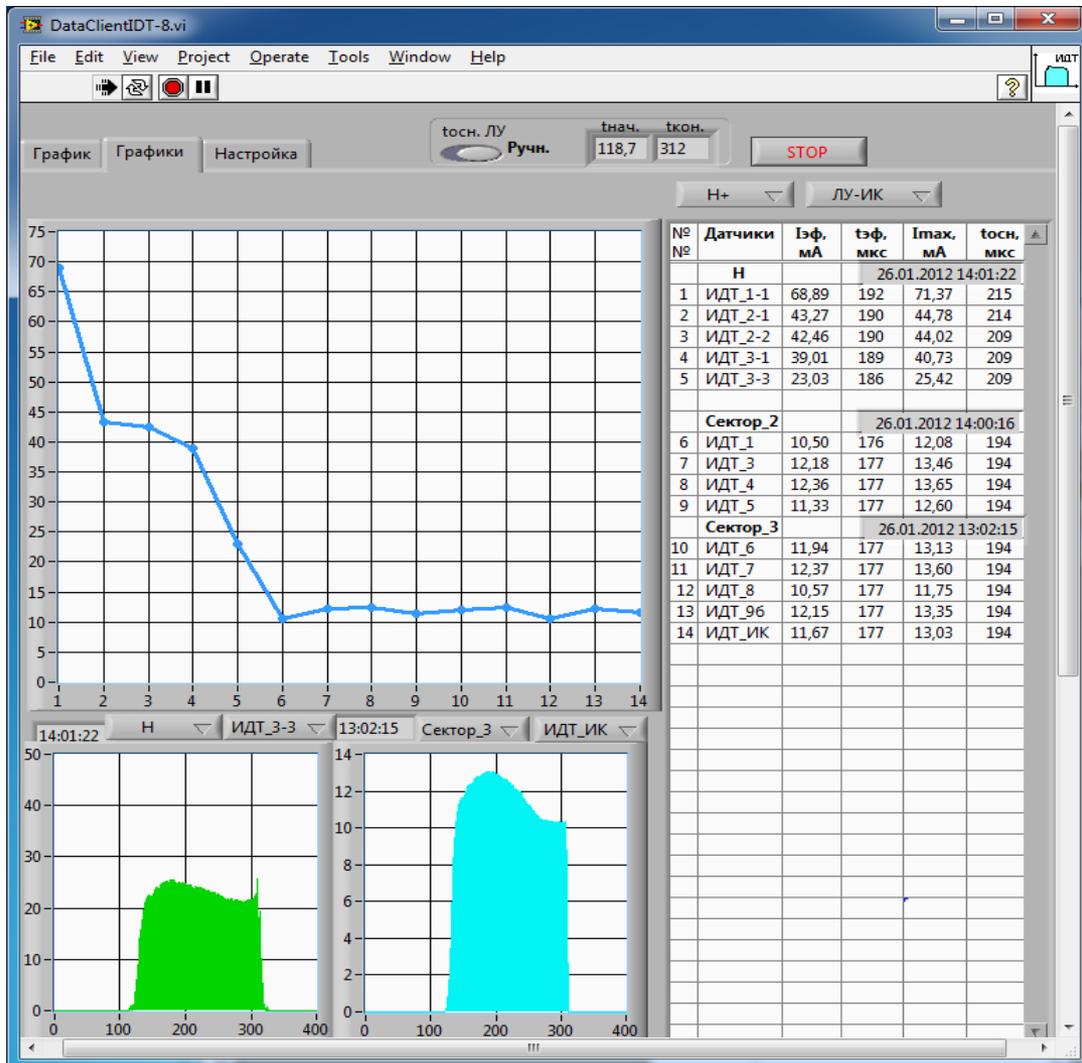


Минимизация потерь пучка

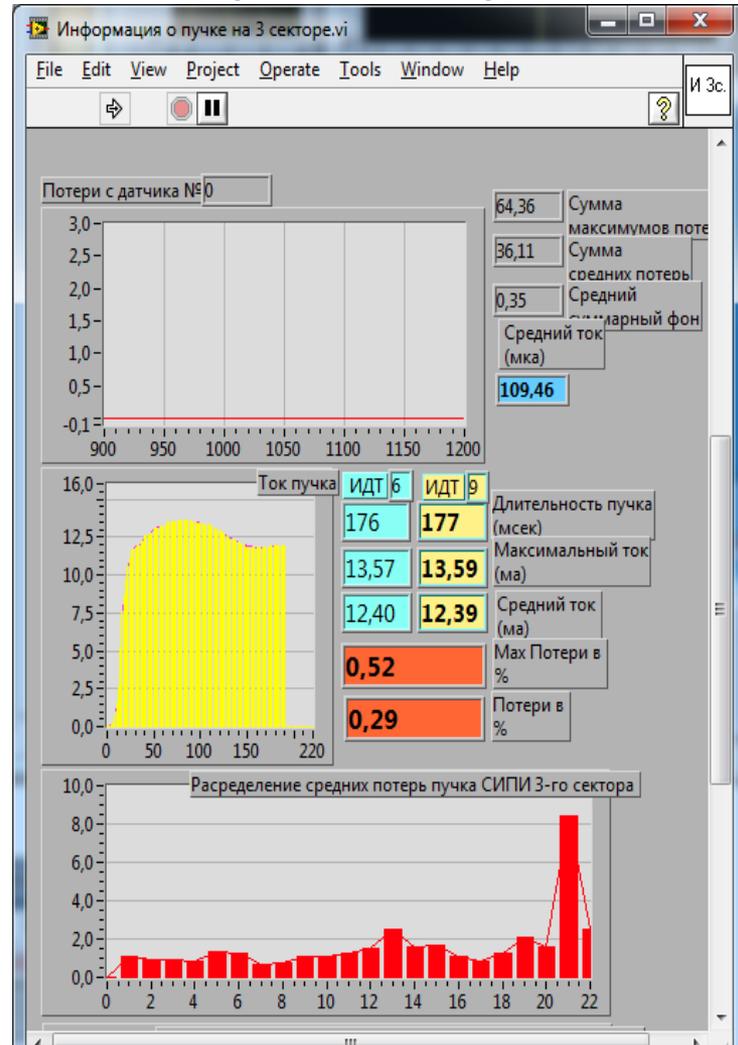
Система измерения потерь (СИПИ): 120 датчиков на основе ФЭУ и 30 нейтронных датчиков.

Пример работы на изотопный комплекс

Ток пучка вдоль ускорителя



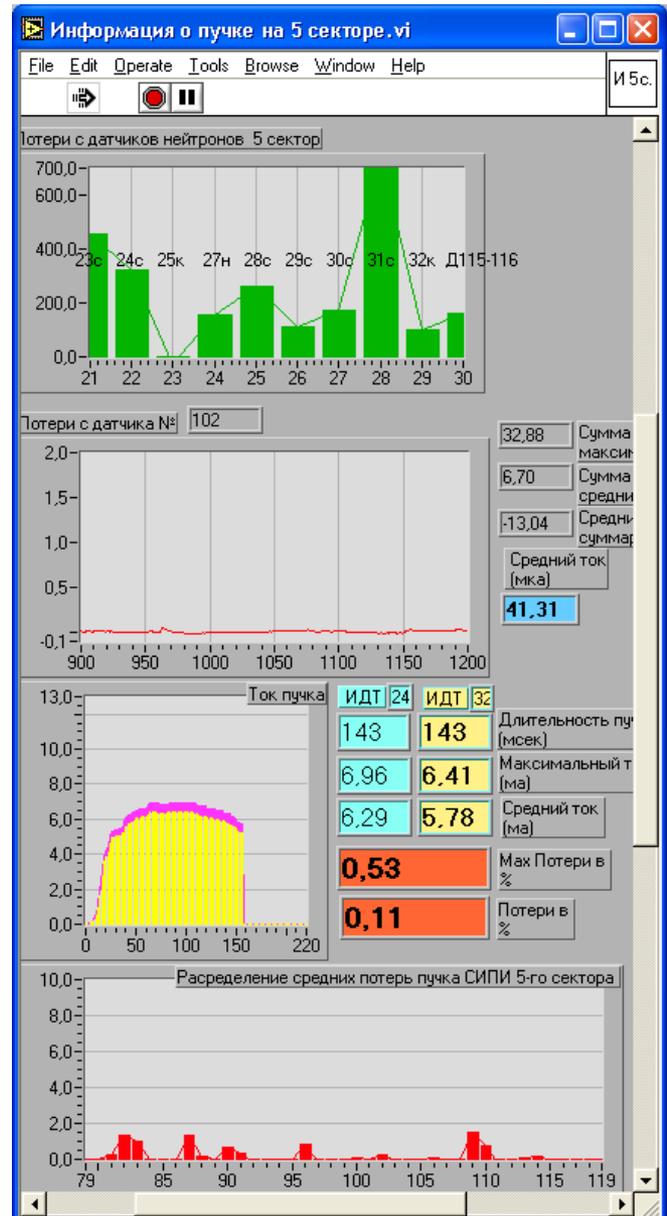
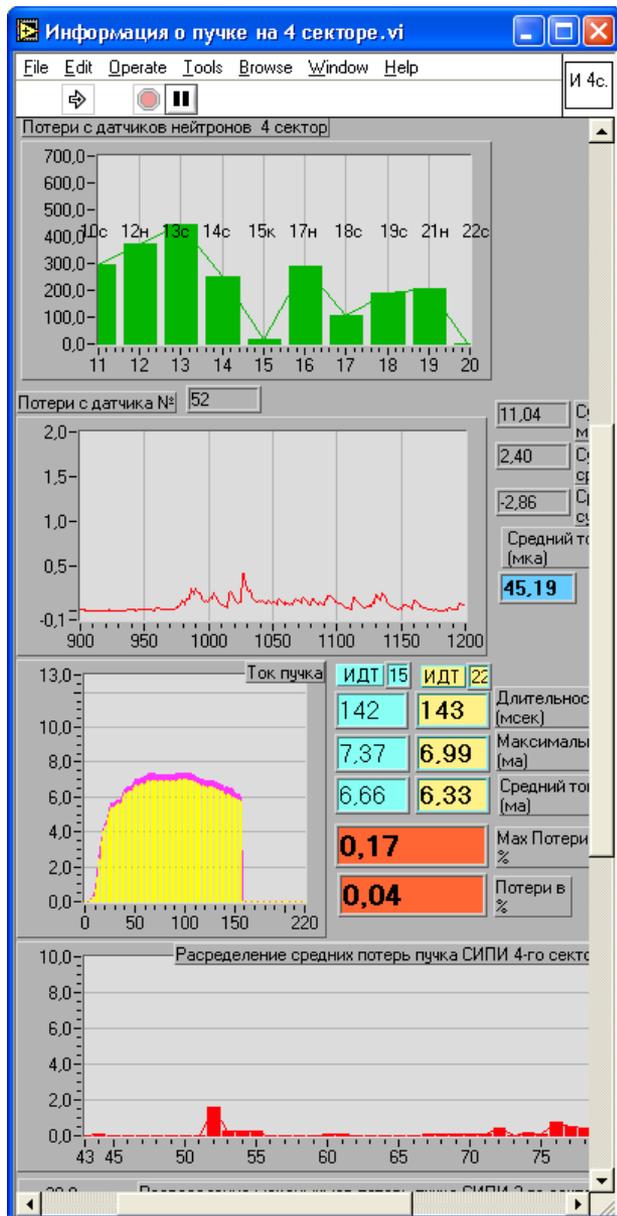
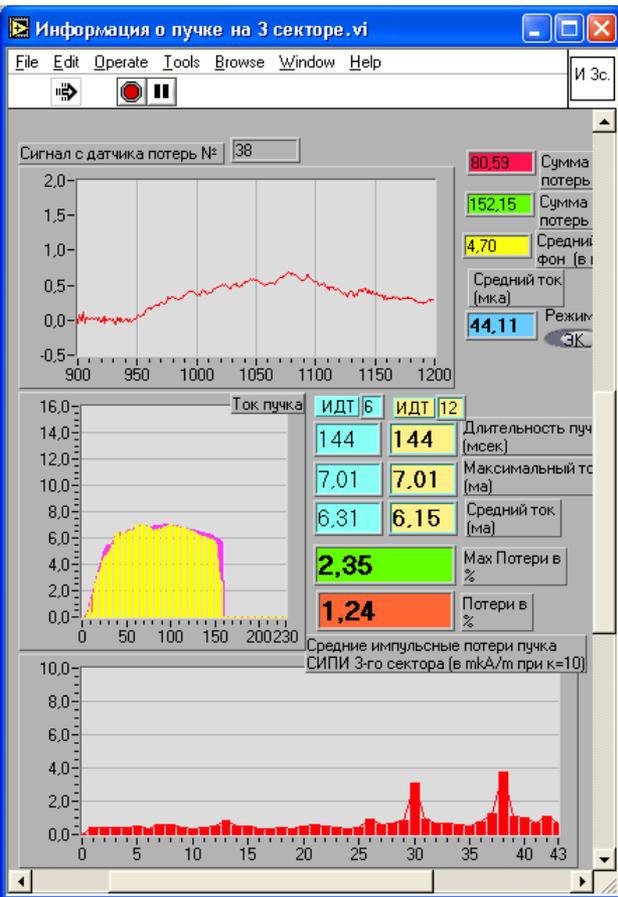
Потери пучка вдоль ускорителя





Минимизация потерь пучка

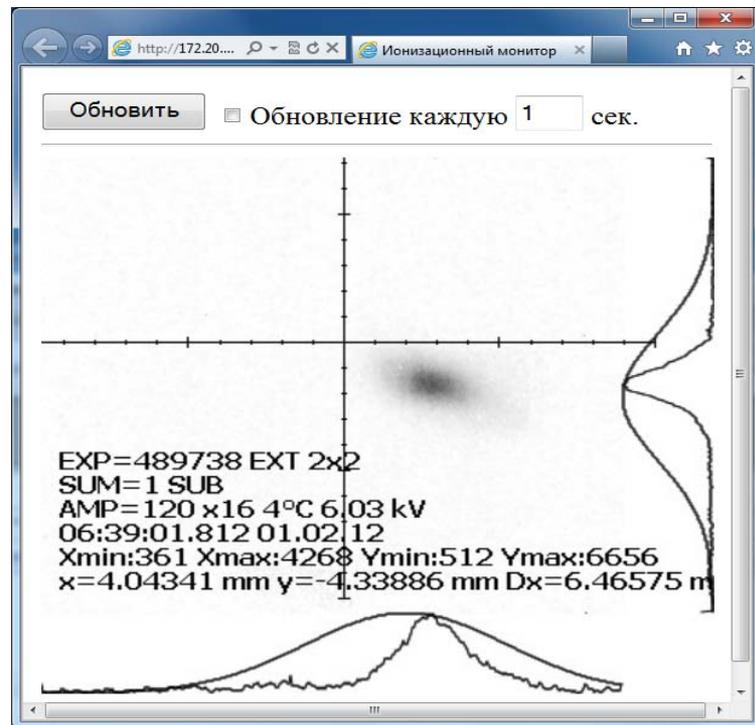
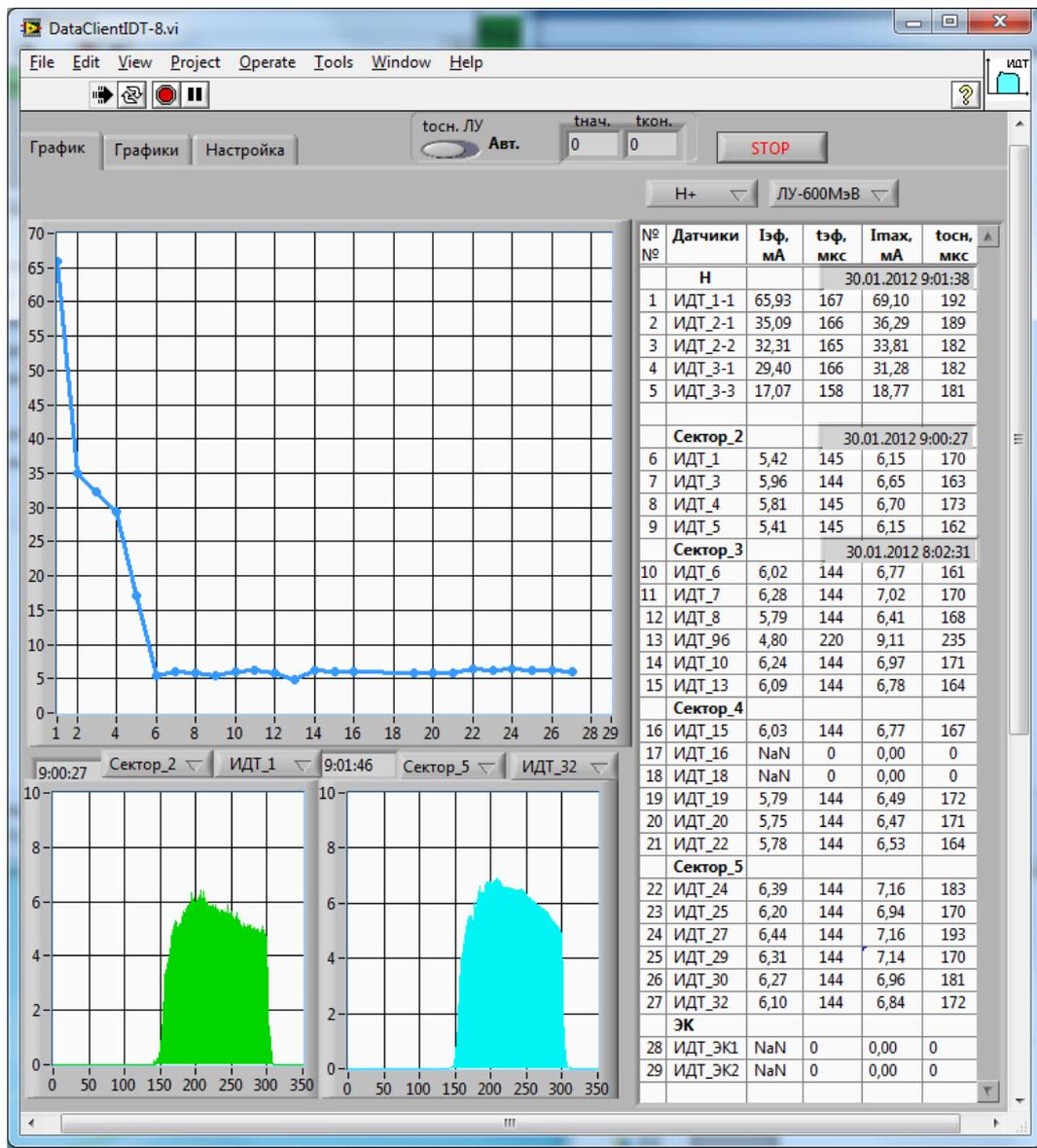
Пример работы на экспериментальный комплекс





Минимизация потерь пучка

Пример работы на экспериментальный комплекс





Параметры ускорителя

Параметр	Проект	Достигнуто	Состояние на февраль 2012 г.
Ускоряемые частицы	H^+ , H^-	H^+ , H^-	H^+ , H^-
Энергия, МэВ	600	502	209
Импульсный ток, мА	50	16	15
Частота повторения, Гц	100	50	50
Длительность импульса, мкс	100	200	0,28...200
Средний ток, мкА	500	150	120

* Параметры указаны для H^+