



Пучки протонов переменной энергии на СЦ-1000

“Если эксперимент подтверждает теорию, это приятно.
Если не подтверждает – это интересно”.

Я. Зельдович

Ускорительный отдел

Лаборатория Физики и Техники Ускорителей

Артамонов С.А.

Семинар ОФВЭ 02 апреля 2019

Содержание

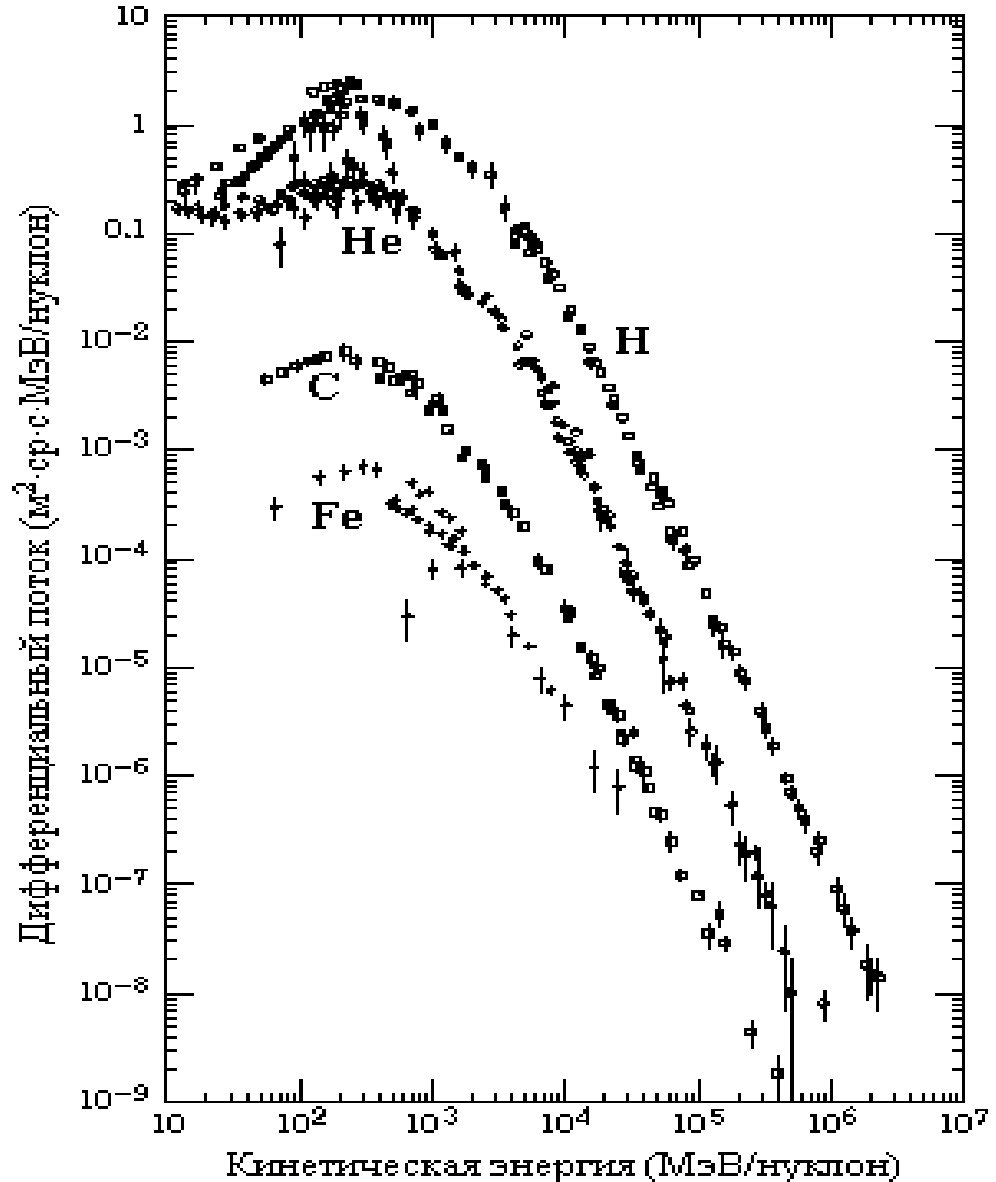
1. Требования к пучкам переменной энергии (НИИ КП)
2. Ускоритель СЦ-1000, тракт пучков с переменной энергией Р3, и тракт Р2 с энергией-1000 МэВ
3. Моделирование на основе программы Geant4
4. Моделирование пучков переменной энергии в тракте транспортировки Р3 (программа Meson) и оптимизация параметров магнитных элементов тракта Р3 (программа Optimum + Meson)
5. Результаты оптимизации
6. Изготовление и установка автоматического деградера
7. Эксперименты и испытательные стенды
8. Планы и перспективы

1 Требования к пучкам переменной энергии (НИИ КП)

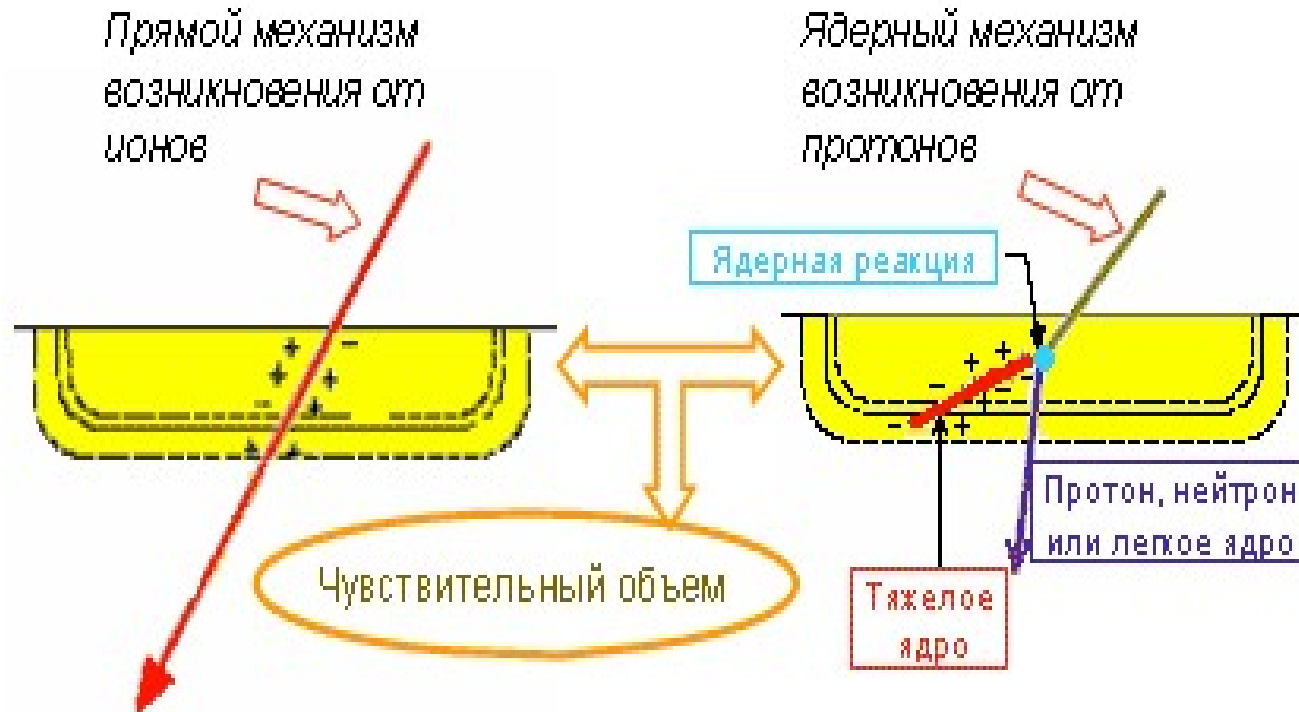
- Энергия из диапазона, МэВ (50-60)-1000
с шагом 100 МэВ
- Время изменения энергии, мин <30
- Погрешность задания энергии, % <3
- Плотность потока, частиц·см⁻²·с⁻¹ 10⁵-10⁸
- Неравномерность потока, % ≤10
- Диаметр поля облучения, мм ≥25
- Погрешность измерения характеристик, % <10
- Температура на объекте испытаний, °С +25...+125
- On-line контроль флюенса протонов



Космическое
излучение:
97% протоны,
2% He,
1% ионы



Single Event Effects



На слайде представлены два механизма возникновения ОСЭ при воздействии частиц космической радиации: непосредственно от ионов, входящих в состав космических лучей (прямой механизм), и от вторичных ионов, создаваемых в результате ядерных столкновений протонов космической радиации с ядрами вещества (ядерный механизм).

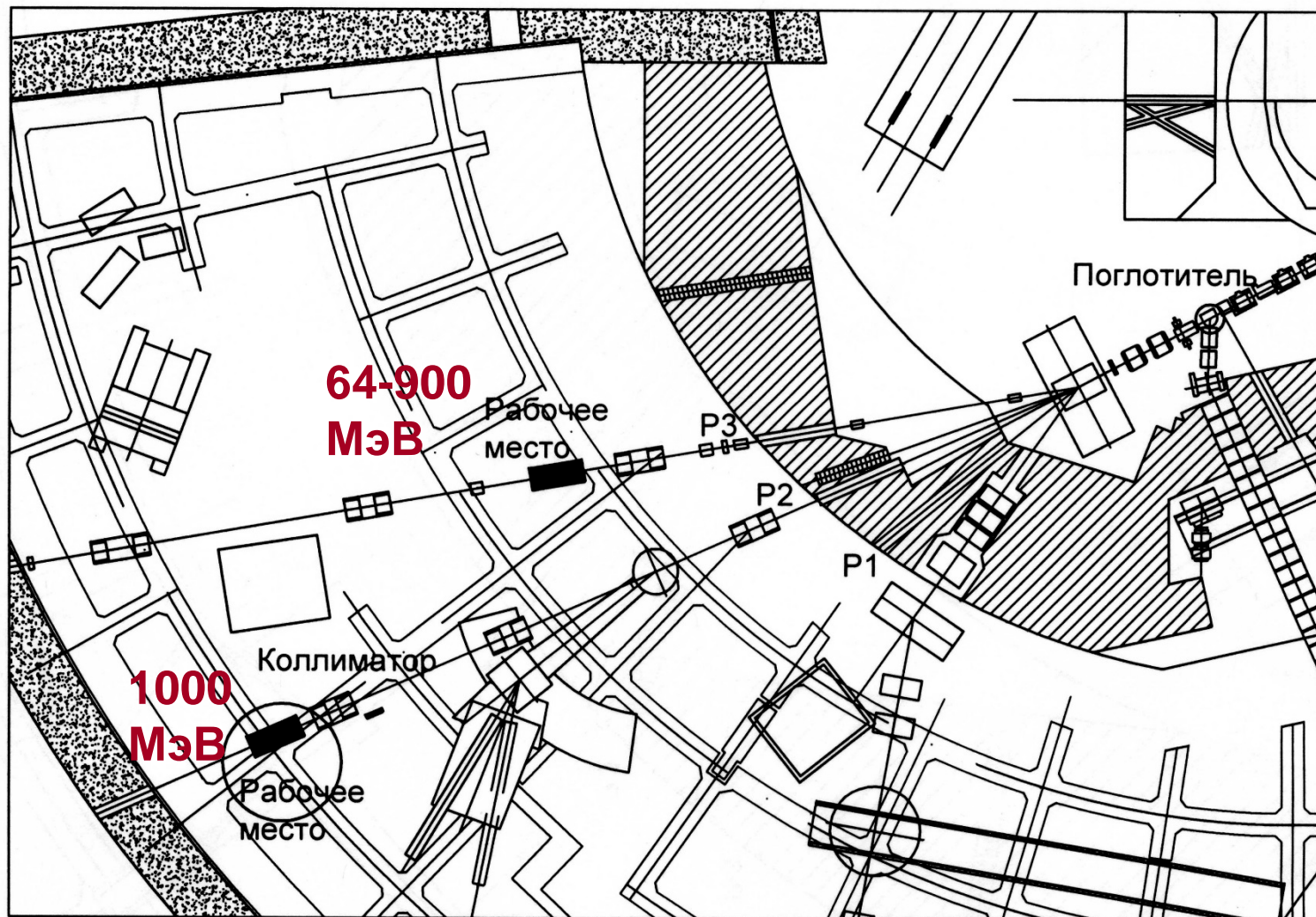


СЦ-1000

Энергия выведенного пучка	1 ГэВ (const)
Однородность энергии	1%
Интенсивность пучка внутри камеры	≤ 3 мкА (var)
Интенсивность выведенного пучка	≤ 1 мкА (var)
Коэффициент вывода	30%
Частота повторения макроимпульса	40÷60 Гц
Длительность макроимпульса	300 мкс÷10 (17) мс

2.1. СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ НА КАНАЛАХ P2 И P3

Общая длина тракта P3 до рабочего места составляет ~26 м



3.0 Моделирование по программе Geant4

- Метод Монте-Карло в задачах переноса частиц в веществе сводится к пошаговому моделированию (трассировке) движения каждой частицы в некотором объеме с заданными характеристиками. Свободный пробег, результат столкновения, а также характеристики первичной и вторичных частиц после столкновения разыгрываются из соответствующих вероятностных распределений, описываемых дифференциальными сечениями соответствующих элементарных процессов. При этом значения дифференциальных сечений взаимодействий могут быть как экспериментальными, так и теоретически рассчитанными.
- В данной работе в программе Geant4 перед поглотителем генерировался пучок протонов (несколько миллионов), вышедших из некоторого вакуумного объема тракта ускорителя.
- Полагалось, что пучок имеет гауссову форму с параметрами $\sigma_x = \sigma_z = 0,64$ см (x, y – поперечные размеры) и с энергией 1000 МэВ ($\sigma_E = 4,20$ МэВ), которые соответствуют экспериментальным результатам. Т.е. полагалось, что плотности распределения вероятностей соответствующих величин имеет вид:

$$p(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y-a)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

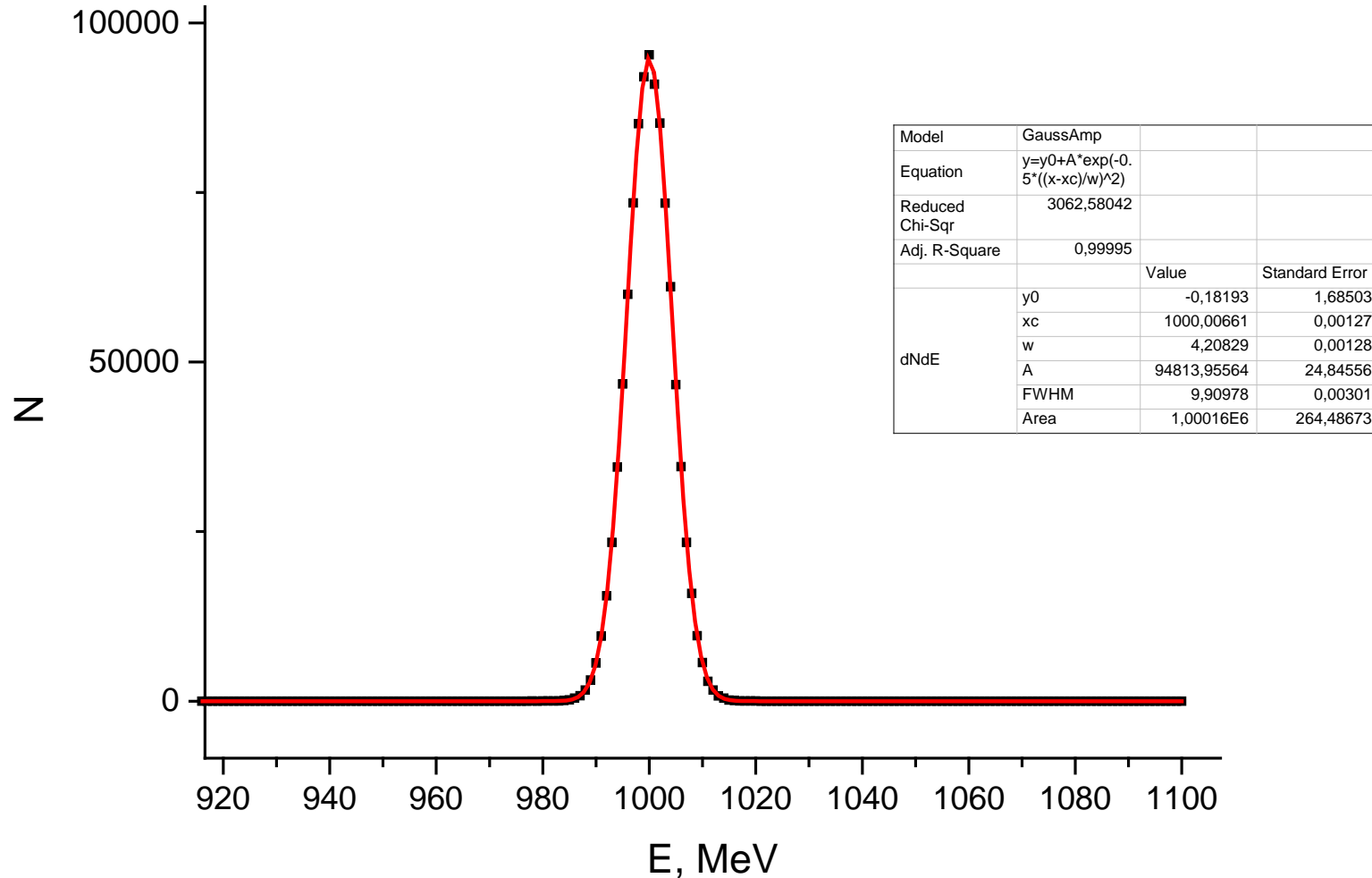
где σ - среднее квадратичное отклонение, α - математическое ожидание.

3.1 Geant4, основные предположения

- В моделировании прохождения пучка сквозь поглотитель применялся набор физических взаимодействий (Physics List), описывающий электромагнитные процессы, emstandart_opt3.
- Были учтены потери энергии на ионизацию, рождение δ - электронов, многократное рассеяние,
- комптоновское рассеяние, тормозное излучение, фотоэффект, рождение пар, e^+e^- -аннигиляция.
- Были также подключены все адронные взаимодействия (упругое рассеяние, образование мезонов, распады частиц, возбуждение ядер и излучение фотонов, деление ядер, захват нейтронов, расщепление ядер).
- Для расчета неупругих взаимодействий была использована модель Binary cascade, которая хорошо работает в нашей области энергий. (Заметим, что в пакете Geant4 предусмотрены 3 модели расчета неупругих взаимодействий: Gheisha, Bertini cascade and Binary cascade)

В выводные файлы записывалась информация о частицах, достигших выходной плоскости поглотителя (их координаты, компоненты импульса и энергия). Т.е., были записаны файлы характеристик **первичных** протонов (не испытавших неупругих взаимодействий при торможении в поглотителе) и для **вторичных частиц** (продуктов неупругих взаимодействий). Все эти данные были использованы при дальнейшем анализе движения прошедших поглотитель частиц по тракту и для оптимизации параметров магнитных элементов тракта.

3.2 Geant4, сначала пучок 1000 MeV



3.3 Geant4. Определение длины поглотителей из меди и сплава вольфрама

- Поглотитель центральной части пучка предполагался во всех расчетах выполненным в виде цилиндра диаметром 80 мм либо из меди плотностью $\rho(m) = 8,88 \text{ г/см}^3$, либо из сплава порошков: вольфрама — 97,50 %, никеля — 1,75 % и железа — 0,75 % (ВНЖ) с плотностью $\rho(w) = 18,6 \text{ г/см}^3$ (цилиндр в этом случае полагался изготовленным методом порошковой металлургии).
- Длина поглотителя $L(d)$ для получения протонов необходимой энергии $E(i)$ определялась как разность длин пробегов

$$L(d) = R(0) - R(i)$$

где $R(0)$ – длина пробега протонов начальной энергии 1000 МэВ, а $R(i)$ - длина пробега протонов, которая соответствует i -ой энергии

- Таким образом, длина поглотителя соответствует потере энергии частицы от 1000 МэВ до фиксированной энергии $E(i)$.
- Следует отметить, что длины пробегов частиц с одинаковой энергией оказываются несколько отличными друг от друга. Это связано с тем, что при замедлении в веществе потери энергии частицей имеют статистический характер.

3.4 Geant4. Поглотитель из вольфрама

- Результаты расчетов показывают, что с учетом современных возможностей при изготовлении деталей методом порошковой металлургии, для каждого значения энергии поглотитель необходимой длины из сплава ВНЖ может быть сформирован на основе комбинации из 13 базовых дисков диаметром 80 мм. При этом диски должны иметь следующие толщины: **100, 100, 50, 50, 20, 20, 10, 5, 2, 2, 1, 0.5, 0.3 мм.**
- В процессе разработки поглотителя выяснилось, что изготовление дисков из сплава ВНЖ с заданной плотностью $=18,6 \text{ г/см}^3$ в принципе возможно, но по довольно сложной и дорогостоящей технологии. Поэтому было решено наряду с поглотителем из сплава ВНЖ, рассмотреть и вариант, где в качестве материала поглотителя, выбрана традиционная медь.

3.5 Geant4. Сравнение расчетов пробега протонов и длины поглотителя из смеси ВНЖ с плотностью $\rho(w)=18,6$ г/см³, выполненных по SRIM и Geant4

$E(i)$, МэВ	Пробег $R(i)$, мм		Длина поглотителя $L(Dw)$, мм	
	SRIM	Geant4	SRIM	Geant4
60	2,55	2	316,56	310
100	8,34	7,5	310,77	304,5
200	26,91	25,5	292,2	286,5
300	52,35	50,5	266,76	261,5
400	82,79	80,5	236,32	231,5
500	116,92	114	202,19	198
600	153,89	150	165,22	162
700	193,02	188,5	126,09	123,5
800	233,82	228	85,29	84
900	275,95	269	43,16	43
1000	319,11	312	0	0

3.6 Geant4. Поглотитель из меди

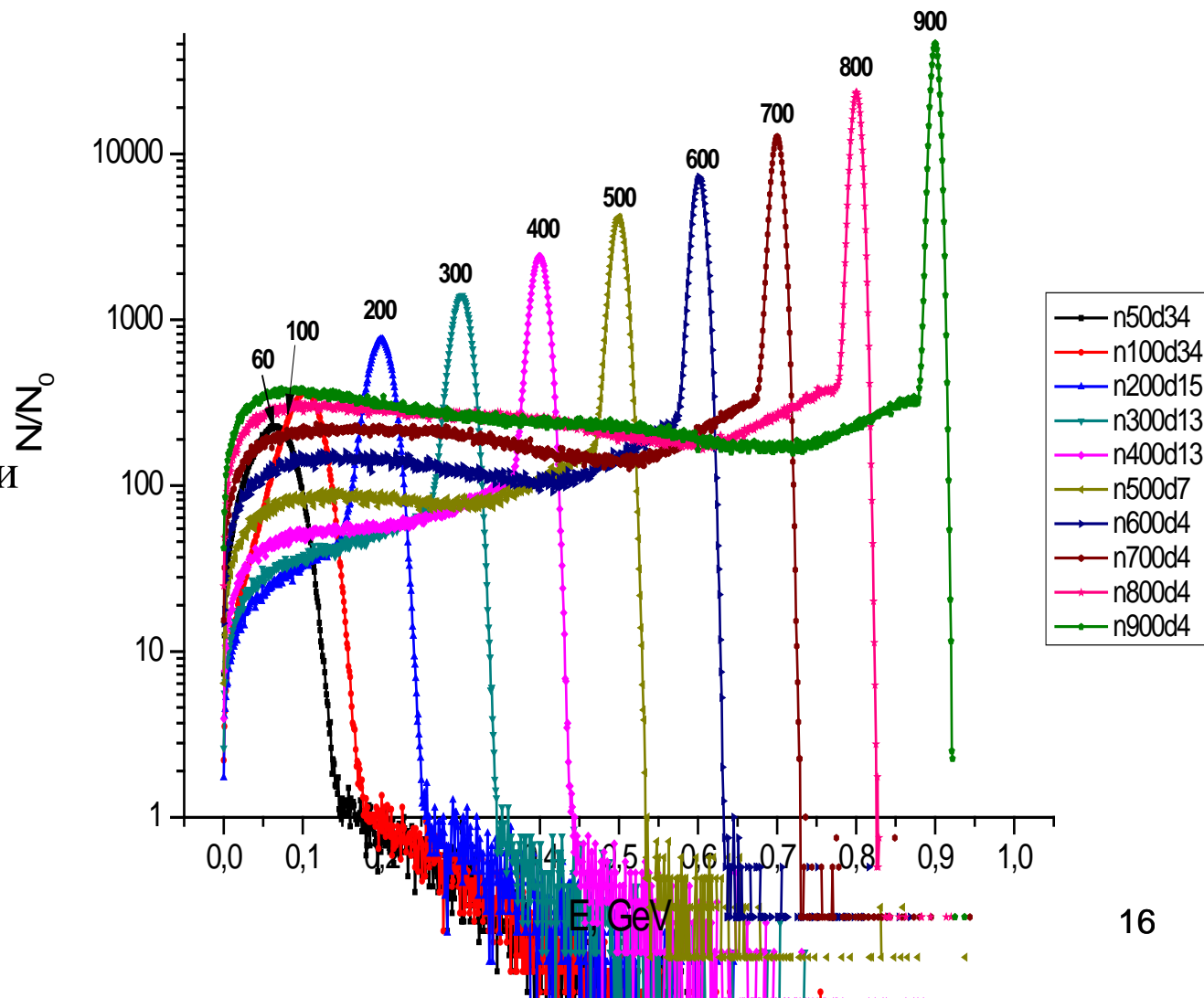
- Расчеты показали, что техническая реализация наборного поглотителя из меди с плотностью $8,88 \text{ г/см}^3$, вполне возможна при использовании **11 базовых дисков** диаметром 80 мм и со следующими толщинами:
200, 150, 100, 50, 20, 20, 10, 5, 2, 2, 1 мм.
- В результате было решено изготовить поглотитель из медных дисков, дистанционно управляемые комбинации которых задают необходимую энергию пучка протонов. ДГ может устанавливаться в главном зале СЦ-1000, а также при необходимости он может быть снят с пучка.

3.7. Сравнение расчетов пробега протонов и длины поглотителя из меди, выполненных по SRIM, Geant3 и Geant4

<i>E(i), МэВ</i>	$\rho=8,8 \text{ г/см}^3$				
	<i>Пробег, мм</i>		<i>Длина поглотителя L(Dt), мм</i>		
	SRIM	Geant4	SRIM	Geant4	Geant3 [6]
60	3,95	4,2	530,48	526,9	-
100	13,27	13,4	521,16	517,7	-
200	43,68	43,7	490,75	487,4	484
300	85,78	85,6	448,65	445,5	442
400	136,43	136,0	398,00	395,1	392
500	193,49	192,7	340,94	338,4	336
600	255,48	254,3	278,95	276,8	275
700	321,32	319,6	213,11	211,5	211
800	390,12	388	144,31	143,1	143
900	461,32	458,6	73,11	72,5	73
1000	534,43	531,1	0	0	0

3.8. Geant4. Пучки переменной энергии после поглотителя из меди

Видно, что для каждого значения энергии после поглотителя, как правило, слева от основного пика, виден несимметричный вклад (практически по всей предшествующей шкале энергий) неупругих соударений в суммарное распределение.



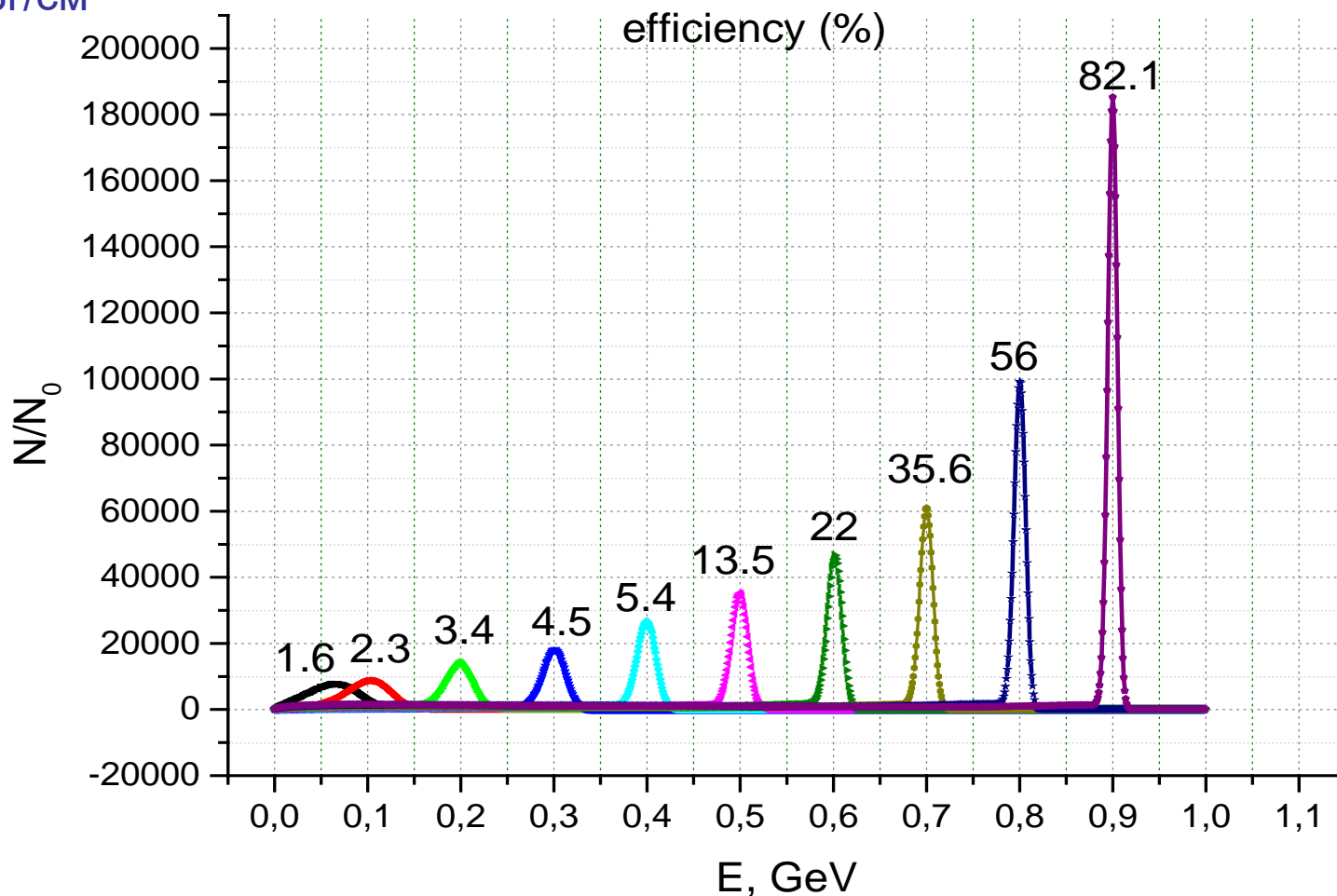
3.9. Geant4. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ ПОСЛЕ ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Здесь: E - мат. ожидание (энергия) пучка, $\sigma(E)$ - его ср. кв. откл., P - импульс, I/I_0 - эффективность прохождения пучка через поглотитель. Компактный по поперечным размерам исходный пучок протонов 1000 МэВ после прохождения поглотителя из меди практически сохраняет свою круглую форму, но увеличивается его угловая расходимость и поперечный размер для каждой энергии.

E , МэВ	$\sigma(E)$, МэВ	P , МэВ/с	I/I_0 %	$\sigma(x)$, см	$\sigma(z)$, см
62,1	28,20	346,973	1,6	2,570	2,571
100,09	24,63	444,795	2,3	2,578	2,594
197,93	15,77	640,783	3,4	2,293	2,289
300,21	12,12	808,385	5,4	1,935	1,943
399,12	10,24	953,030	8,4	1,599	1,599
499,24	8,92	1089,078	13,5	1,305	1,306
601,03	7,89	1220,275	22,0	1,059	1,061
699,88	7,01	1342,819	35,6	0,875	0,874
800,18	6,13	1463,501	56	0,753	0,753
899,85	5,13	1580,593	82,1	0,687	0,688

3.10. Geant4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОХОЖДЕНИЯ ПУЧКОВ ЧЕРЕЗ ПОГЛОТИТЕЛЬ

Cu,
 $\rho=8.88\text{г/см}^3$

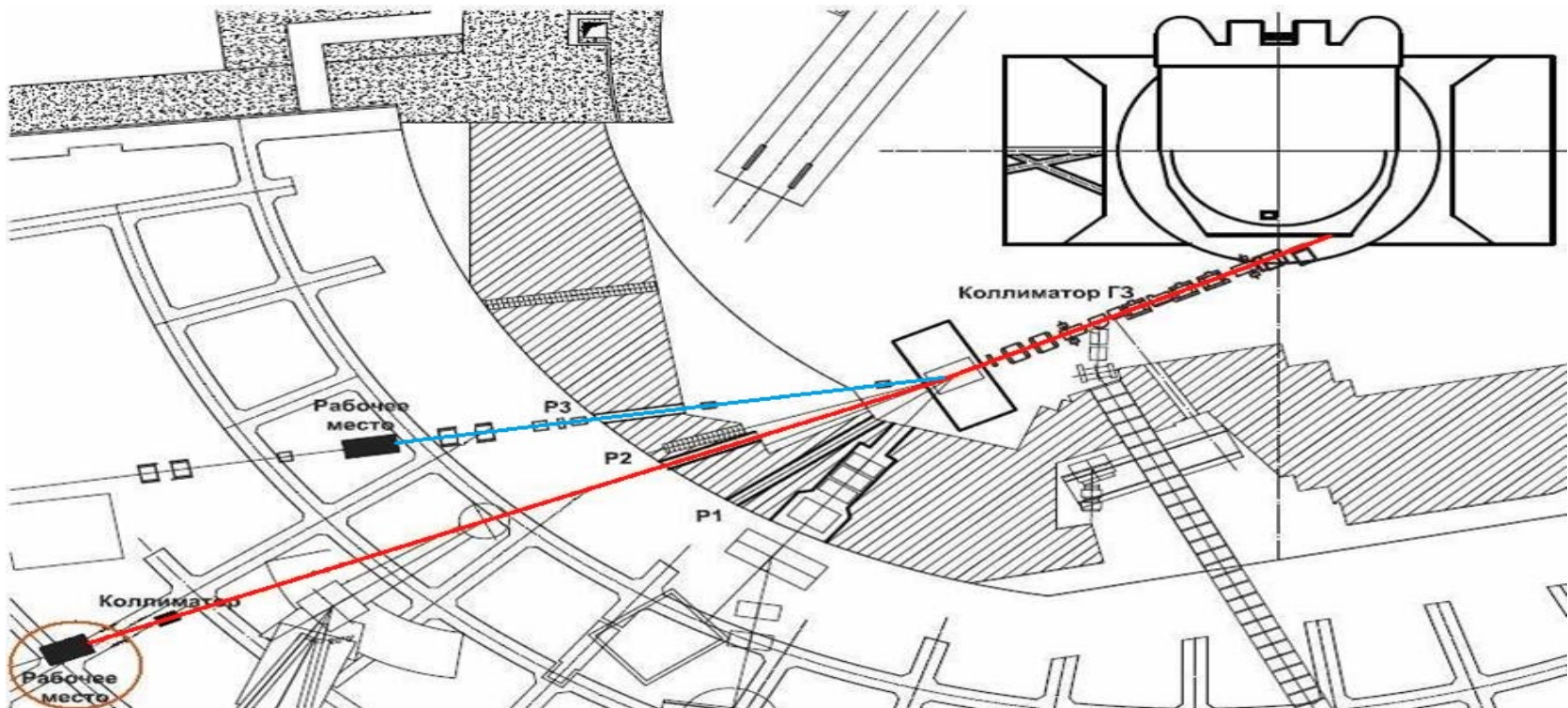


4.0 Моделирование пучков переменной энергии в тракте транспортировки РЗ

- Одной из целей настоящей работы являются расчёты и оптимизация параметров пучка переменной энергии для испытания радиационной стойкости ЭКБ, а также определение оптимальных режимов работы магнитных элементов используемого тракта для всех требуемых значений энергии.
- Поглотитель является источником частиц, полученных с помощью пакета GEANT4, которые являются входными данными для программ MESON и OPTIMUM.
- Канал транспортировки пучка РЗ состоит из свободных промежутков, двух дублетов линз, отклоняющего магнита и коллиматора в стене между главным и экспериментальными залами.
(Всего 26 элементов тракта.)
- При оптимизации варьировались ТОЛЬКО! градиенты магнитных полей в линзах и СП-40 для получения пучка с максимальной интенсивностью и с минимальной шириной импульсного распределения на мишени.

4.1 Программа MESON

- Программа MESON позволяет рассчитывать параметры первичных и вторичных пучков частиц методом Монте-Карло, который состоит в розыгрыше большого числа траекторий частиц, проходящих заданную магнитно-оптическую систему.
- Расчеты проводятся в системе координат, связанной с осевой траекторией x, z, s . Ось s направлена по касательной к осевой траектории, ось x расположена в плоскости траектории справа по ходу траектории, а ось z перпендикулярна плоскости xs .



4.2 Программа MESON

- Расчет траекторий в свободном промежутке и магнитных линзах реализуется по обычным формулам перехода:

$$M_{x,z} = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{Здесь } l - \text{длина свободного промежутка;}$$

$$M = \begin{pmatrix} \cos(l \cdot \sqrt{k}) & 1/\sqrt{k} \sin(l \cdot \sqrt{k}) \\ -\sqrt{k} \sin(l \cdot \sqrt{k}) & \cos(l \cdot \sqrt{k}) \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{- для фокусирующей} \\ \text{плоскости квадрупольной} \\ \text{линзы,} \\ \text{но здесь } l \text{ уже эффективная} \\ \text{длина линзы} \end{array}$$

$$M = \begin{pmatrix} ch(l \cdot \sqrt{k}) & 1/\sqrt{k} sh(l \cdot \sqrt{k}) \\ \sqrt{k} sh(l \cdot \sqrt{k}) & ch(l \cdot \sqrt{k}) \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{- для дефокусирующей} \\ \text{плоскости квадрупольной линзы} \\ k = G / (3335,6 \cdot P) \\ \text{- жесткость линзы,} \\ \text{- } P \text{ - импульс частицы;} \\ \text{- } G \text{ - градиент магнитного поля линзы} \end{array}$$

Для расчета траекторий частиц в поворотном магните СП-40

используется численное интегрирование

4.3 Программа MESON

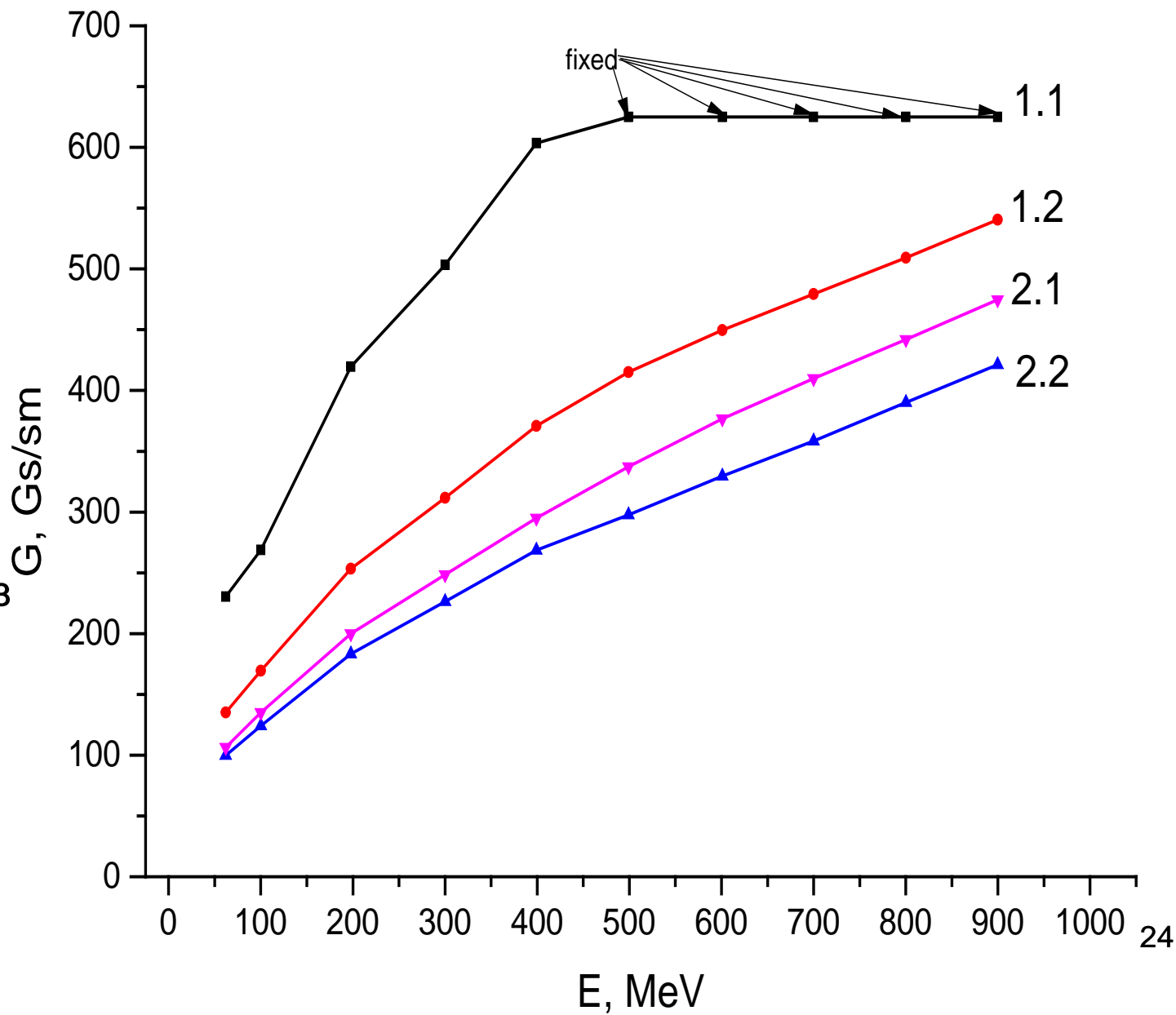
- Программа **MESON** позволяет получить такие характеристики пучка как:
 - абсолютную интенсивность,
 - потери частиц на отдельных элементах тракта,
 - пространственное распределение плотности пучка,
 - импульсный спектр и состав пучка.Другие характеристики.
- Моделирование позволяет учесть геометрию мишени. В программе отсутствуют ограничения на импульсный диапазон частиц.
- Если отклонение траектории частицы от оси тракта превышает наперед заданную амплитуду, то такая частица считается вышедшей из потока.

4.4 Программа OPTIMUM

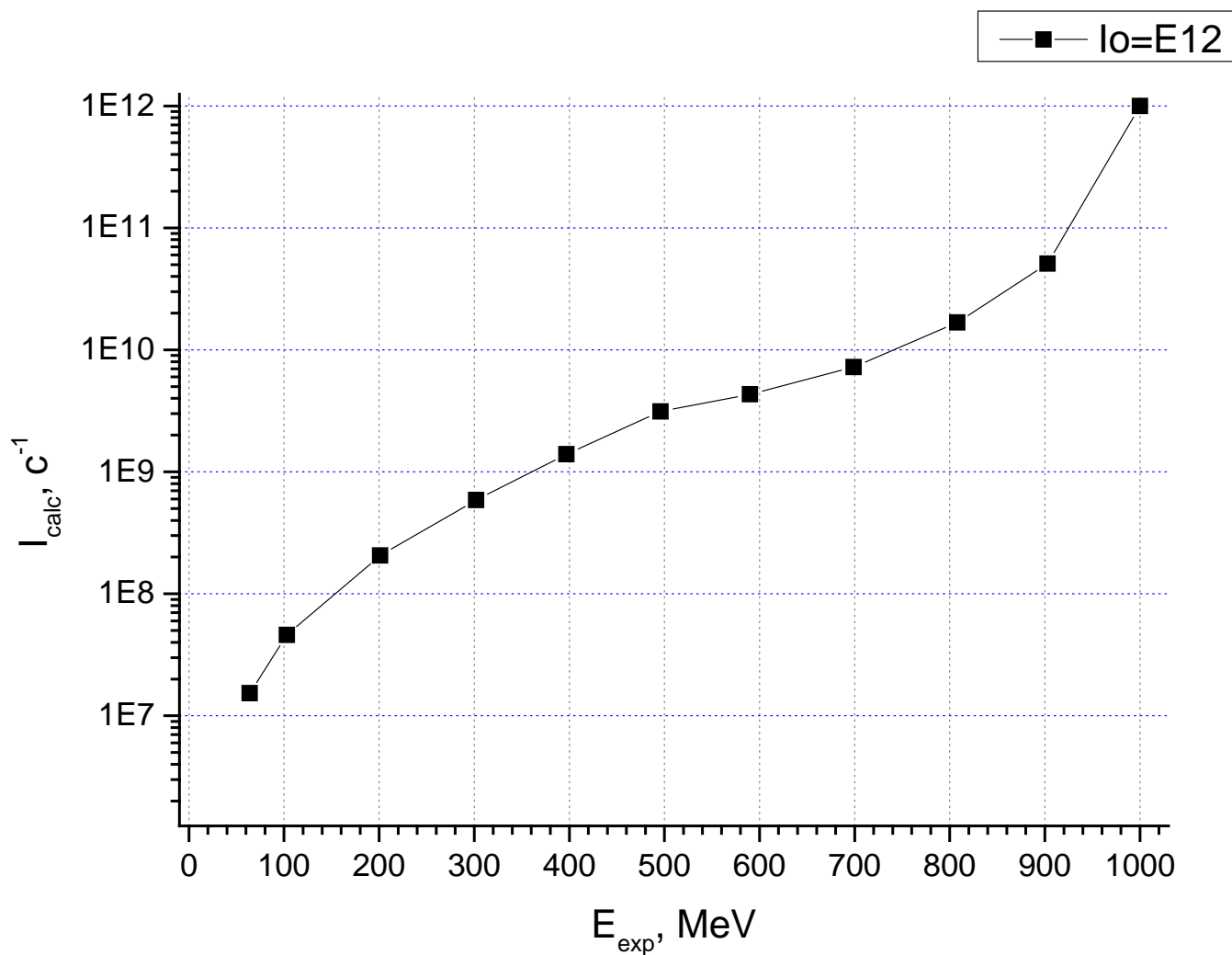
- Наряду с задачей траекторных расчетов **в заданной структуре тракта** возникает **проблема оптимизации его параметров**.
- Она, обычно, сводится к **определению**:
 - 1) **расположения магнитных элементов тракта**, (и\или)
 - 2) **величин их магнитных полей**,задав в качестве критерия оптимизации, например, максимальность интенсивности пучка на мишени.
(Здесь решается только задача 2)!
- Т.О., задача оптимизации объединяет в себе две части: 1) расчет параметров пучка (Meson), 2) алгоритм поиска оптимума (Optimum).
А именно:
 1. По алгоритму модифицированной программы MESON рассчитываем параметры пучка и строим функцию этих параметров, так называемую функцию качества. **Таким образом, задача оптимума в математическом плане сводится к поиску глобального максимума функции многих переменных.**
 2. Для его поиска реализован алгоритм, являющийся комбинацией методов Монте-Карло и статистического градиента. А именно, после выяснения при помощи метода Монте-Карло возможных мест локализации экстремумов, методом статистического градиента отыскивается глобальный экстремум.

5.1 Результаты оптимизации (РО): градиенты дублетов линз для разных энергий пучков

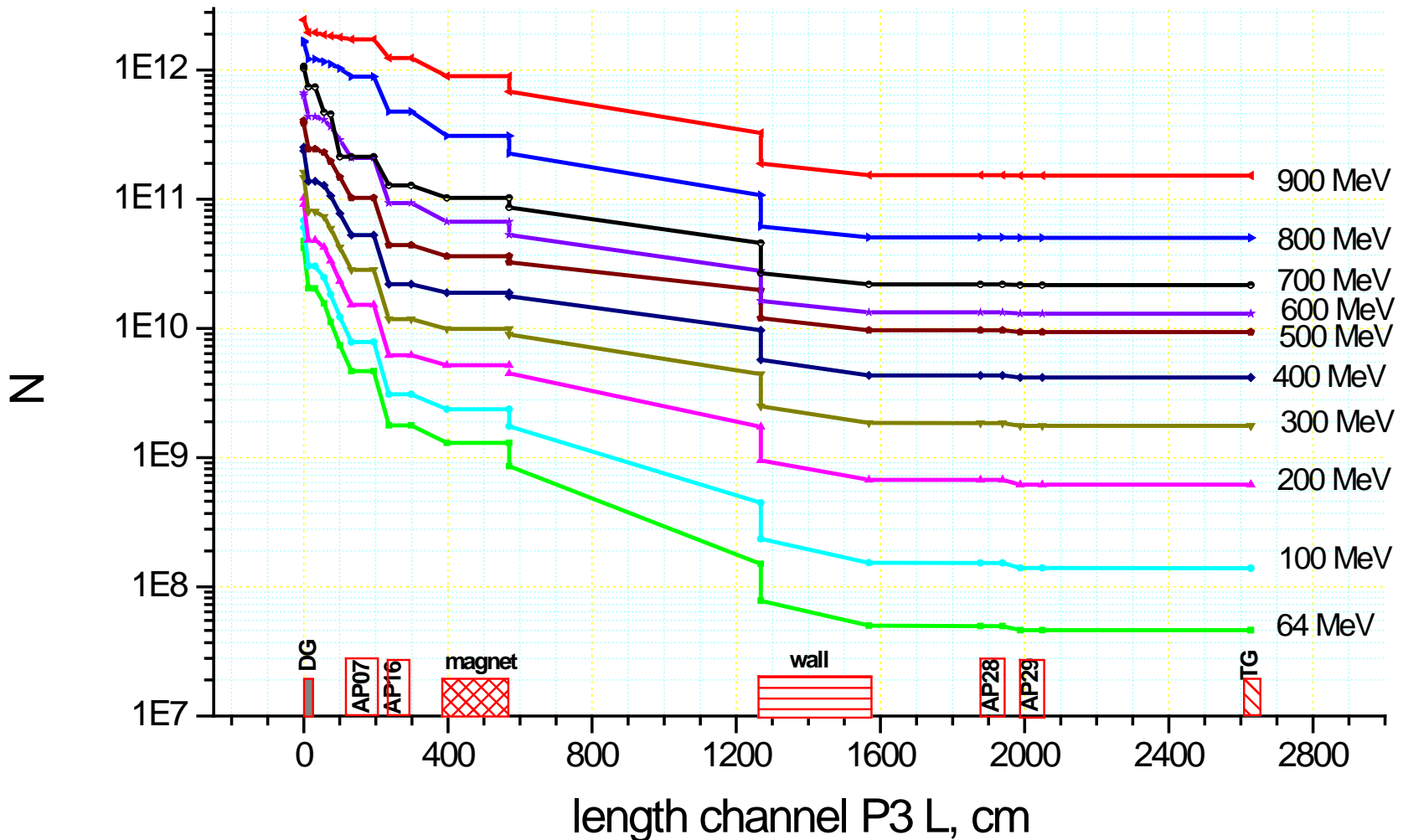
Оптимальные градиенты первого (1.1-ГФ, 1.2-ГД) и второго (2.1-ГФ, 2.2-ГД) дублетов линз при диаметре мишени 5 см для всех энергий.



5.2 РО: РАСЧЁТНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ПУЧКОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЭНЕРГИИ В КАНАЛЕ РЗ



5.3 РО: Изменение интенсивности пучков вдоль тракта транспортировки РЗ



5.4 РО: Расчетные параметры пучков разных энергий в конце тракта при одном и том же диаметре мишени $d=5$ см

E_i МэВ, теор.	E_i МэВ, расчет	I с ⁻¹	$\Delta P / P$ %	σ_x см	σ_z см	однородность 10%	
						X, мм	Z, мм
60	62,1	$1,533 \cdot 10^7$	14,93	2,996	1,407	25,9	14,5
100	100,09	$4,600 \cdot 10^7$	12,27	3,627	1,368	35,2	14,7
200	197,93	$2,063 \cdot 10^8$	7,93	2,462	1,374	25,3	17,2
300	300,21	$5,866 \cdot 10^8$	4,70	2,481	1,442	24,0	19,0
400	399,12	$1,393 \cdot 10^9$	3,29	2,265	1,442	24,4	21,0
500	499,24	$3,127 \cdot 10^9$	2,49	2,270	1,376	23,3	21,5
600	601,03	$4,333 \cdot 10^9$	1,96	1,265	1,406	13,6	16,3
700	699,88	$7,233 \cdot 10^9$	1,51	0,856	1,511	12,0	27,0
800	800,18	$1,675 \cdot 10^{10}$	1,27	0,690	1,547	11,3	27,0
900	899,85	$5,100 \cdot 10^{10}$	0,985	0,570	1,485	11,7	19,7

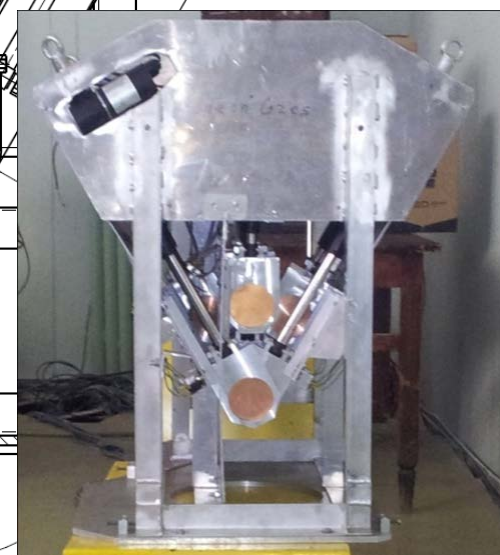
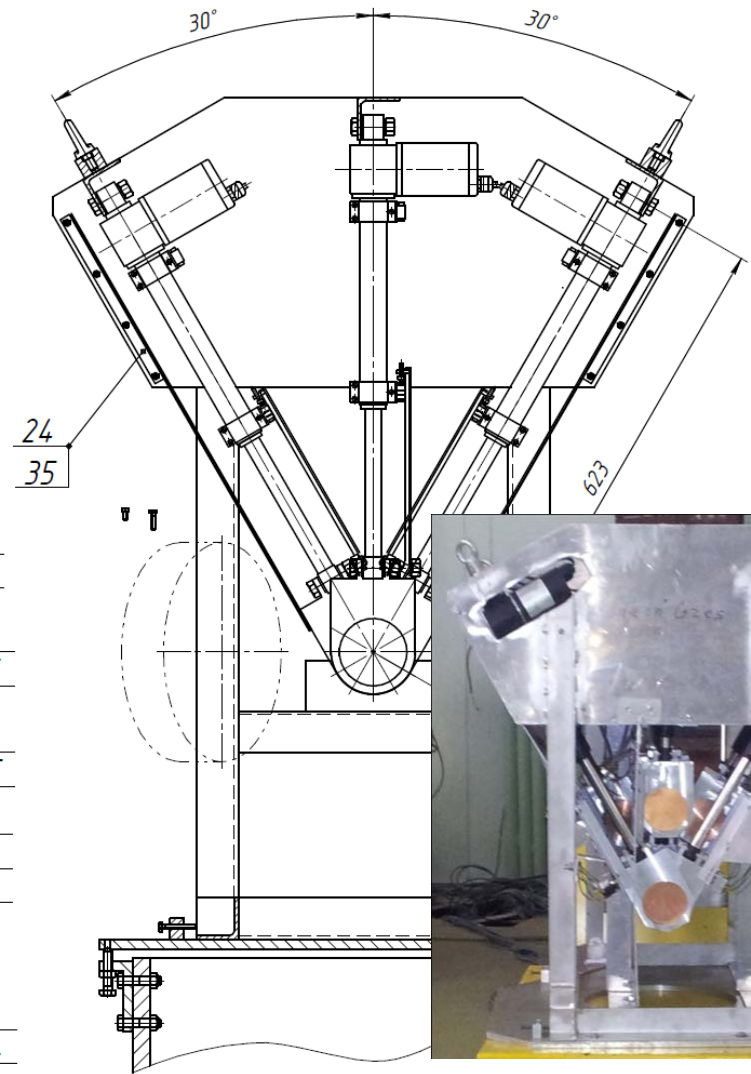
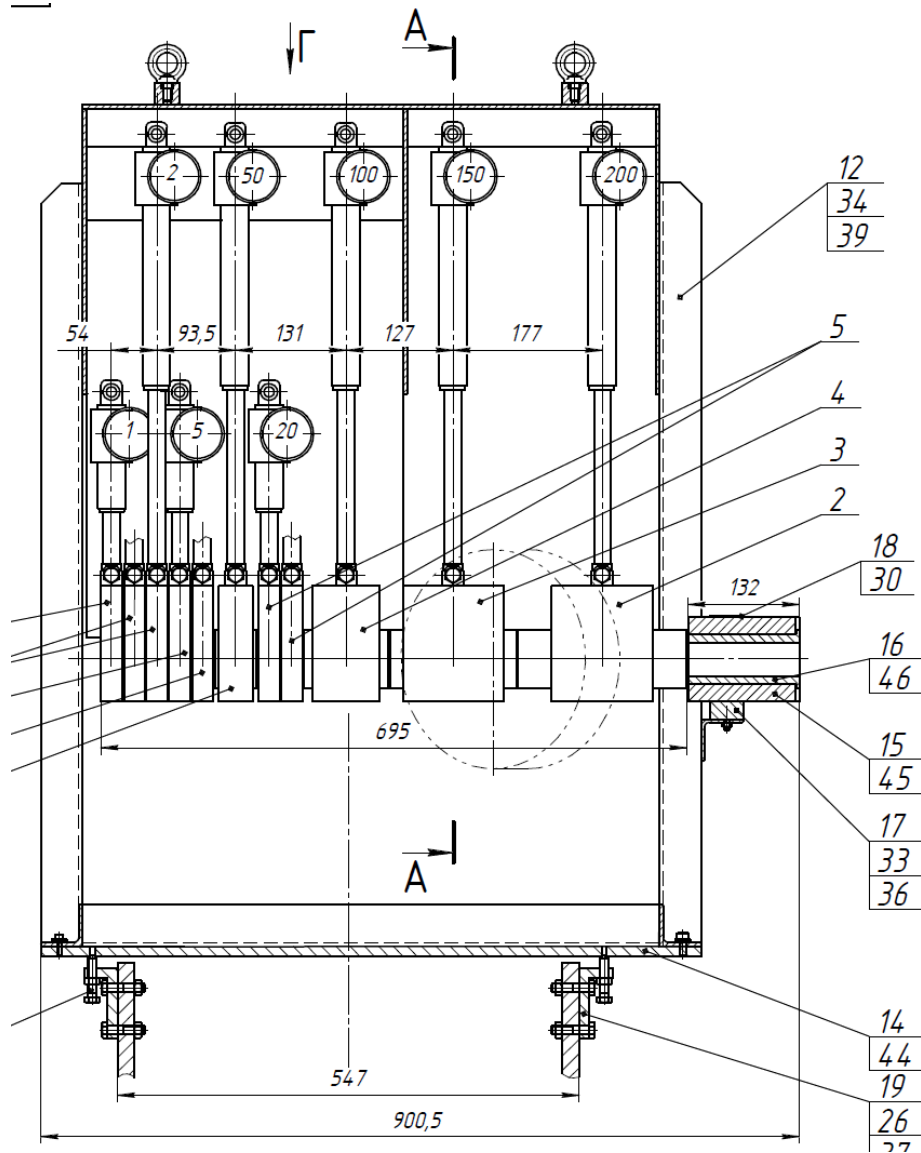
Здесь ΔP - есть ширина импульсного распределения пучка на его полувысоте (FWHM). **ПУЧКИ НЕ КРУГЛЫЕ!**

5.5 РО: Расчетные параметры пучков разных энергий в конце тракта при оптимальных диаметрах мишени

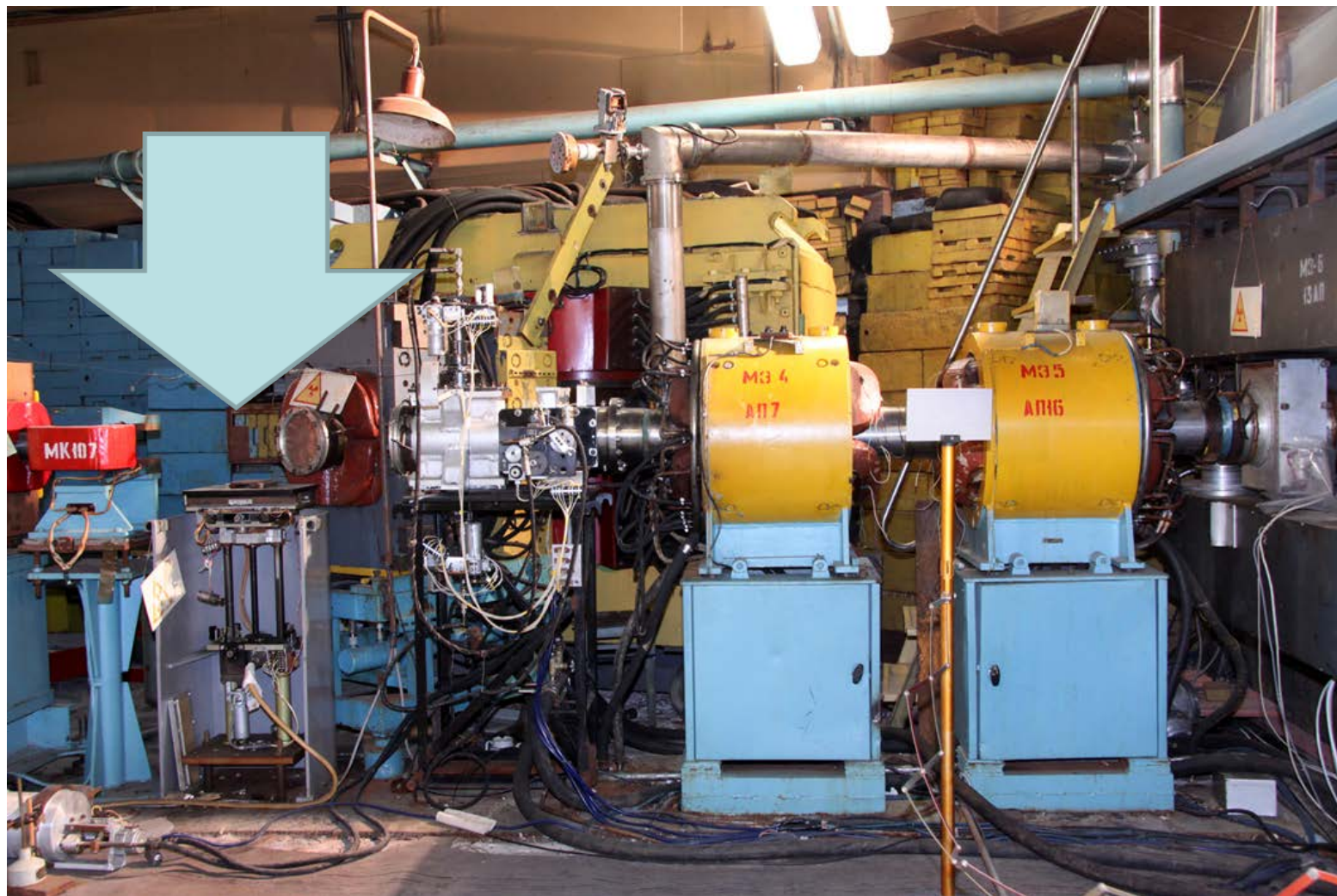
При условии сохранения числа частиц, достигших мишени

d , см,	E_i , МэВ, расчет	σ_x , см	σ_z , см	однородность 10%	
				X, мм	Z, мм
15	62,1	2,884	2,844	27,8	27,0
18	100,09	3,398	3,535	31,5	33,9
15	197,93	2,623	3,145	28,1	28,1
18	300,21	3,185	3,410	30,8	30,5
15	399,12	3,014	2,444	35,7	34,0
13	499,24	2,464	2,638	27,3	32,9
15	601,03	2,820	2,706	30,5	34,9
13	699,88	2,494	2,433	31,2	34,0
9	800,18	1,453	1,81	27,1	29,8
11	899,85	2,713	1,778	34,9	30,8

6.0 ДЕГРАДЕР ИЗ МЕДИ С ДИСТАНЦИОННЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЕГО ДЛИНЫ

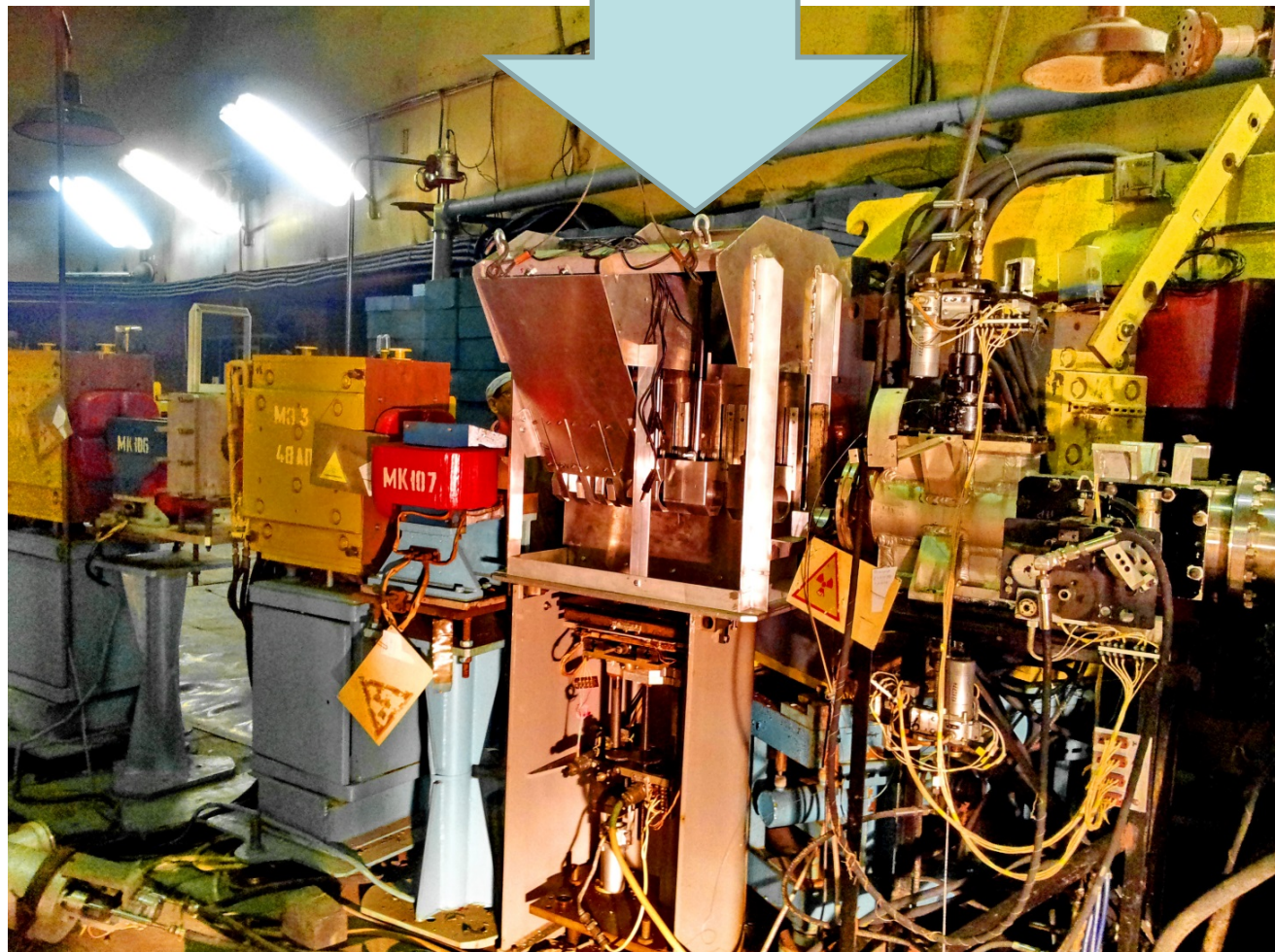


6.1 Место для поглотителя с $L \sim 90$ см на РЗ



6.2 Установка поглотителя в главном зале ускорителя СЦ-1000

- ❖ долгоживущие нуклиды: **кобальт-60** с энергией гамма квантов при распаде 1.17 и 1.33 МэВ с периодом полураспада 5.2 года, а также **цинк-65** с энергией гамма квантов 1.11 МэВ с периодом полураспада 245 дней.



- В «пещеру» с толщиной защитных стен около 50 мм свинца

6.3 ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ ДЛИНОЙ ПОГЛОТИТЕЛЯ ИЗ МЕДИ ДЛЯ РАЗНЫХ ЭНЕРГИЙ (ЛЕВИЗ)



№	Набор болвано К, мм	900	800	700	600	500	400	300	200	100	50
11	200,00				200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
10	150,00			150,00				150,00	150,00	150,00	150,00
9	100,00		100,00			100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
8	20,00	20,00	20,00		20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
7	20,00		20,00			20,00	20,00	20,00	20,00		20,00
6	50,00	50,00		50,00	50,00		50,00	50,00		50,00	50,00
5	10,00			10,00	5,00		5,00				10,00
4	5,00										
3	2,00	2,00	2,00					5,00			
2	2,00		2,00	2,00	2,00		2,00	2,00			
1	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	24,98 кг.										

Длина поглотителя(реал.), мм	73,00	144,00	213,00	278,00	341,00	398,00	448,00	491,00	521,00	530,00
Энергия, МэВ, f(x)	892,60	806,86	706,10	598,06	493,07	400,13	308,10	199,96	92,54	52,85
Длина поглотителя, расчет, мм	73,11	144,31	213,11	278,95	340,94	398,00	448,65	490,75	521,16	530,48

дистанционно из измерительного зала с помощью электропривода

6.4 Деградер и патент на него

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 181147

**Автоматизированный замедлитель протонного пучка
синхроциклотрона - деградер**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение "Петербургский институт ядерной физики им.
Б.П. Константинова Национального исследовательского
центра "Курчатовский институт" (RU)*

Авторы: *Иванов Евгений Михайлович (RU), Михеев Гелий
Федорович (RU), Анашин Василий Сергеевич (RU)*

Заявка № 2018111542

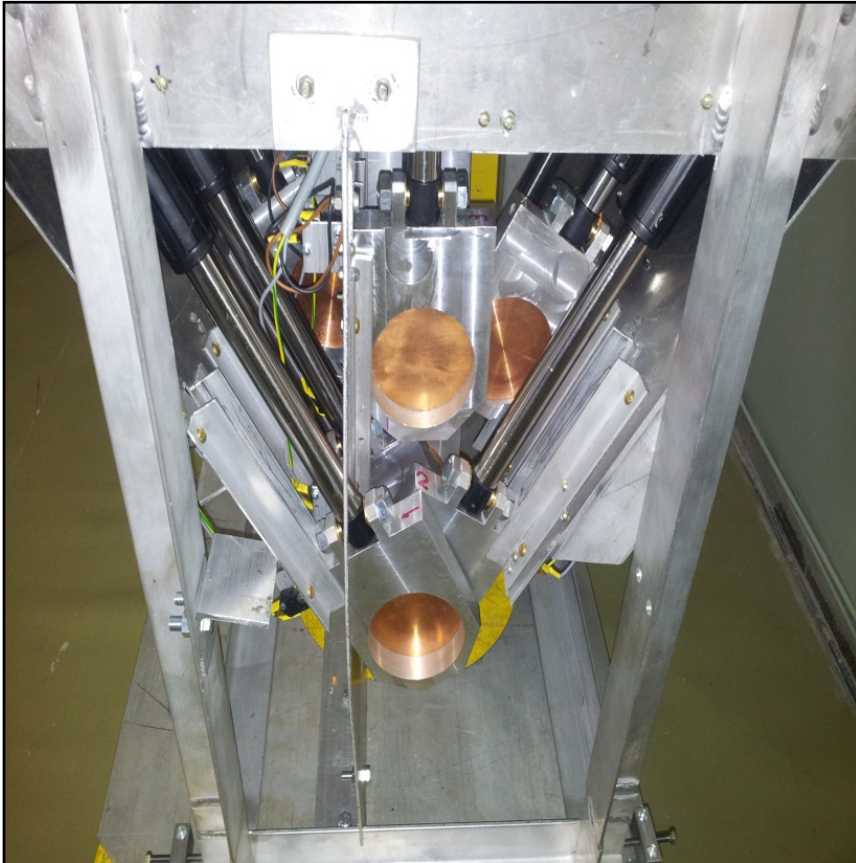
Приоритет полезной модели 30 марта 2018 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 05 июля 2018 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 30 марта 2028 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

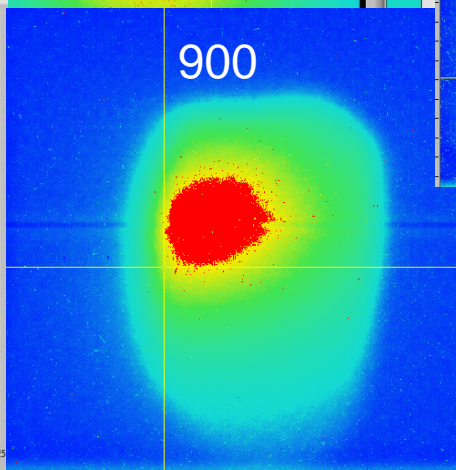
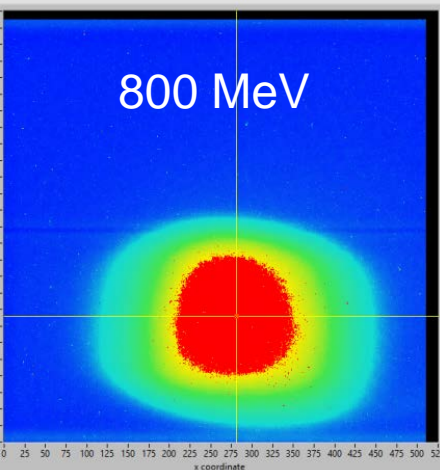
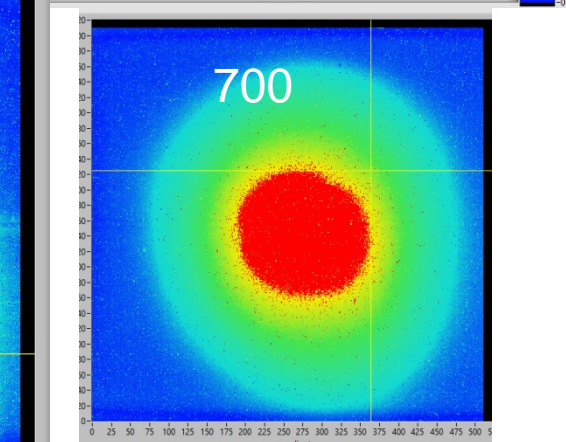
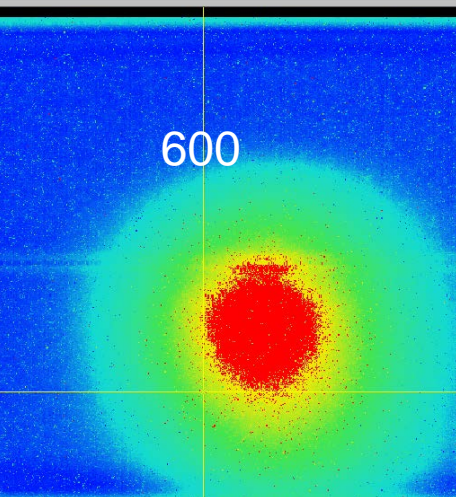
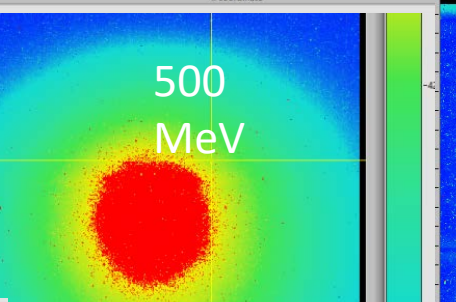
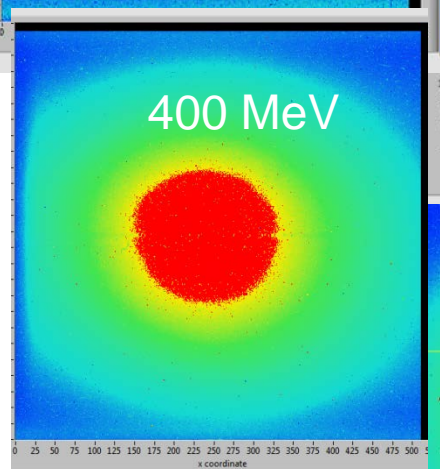
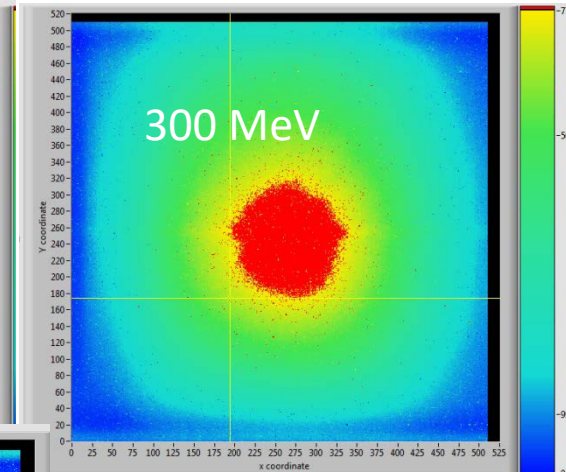
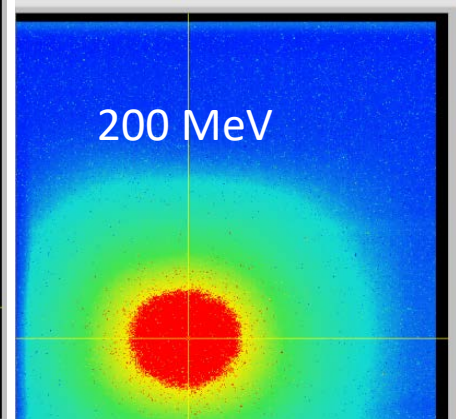
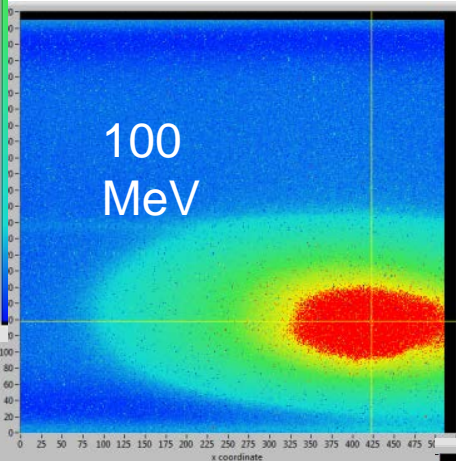
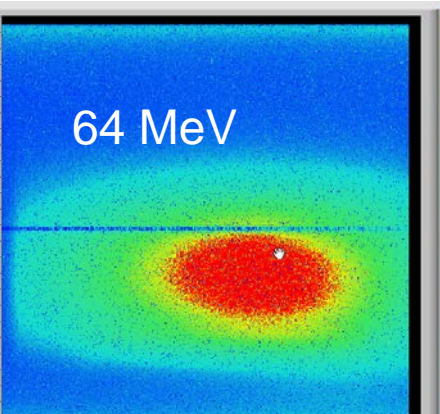


7.0 THE CALCULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS FOR VARIABLE PROTON ENERGY 60-900 MEV (IS OP – 1000)

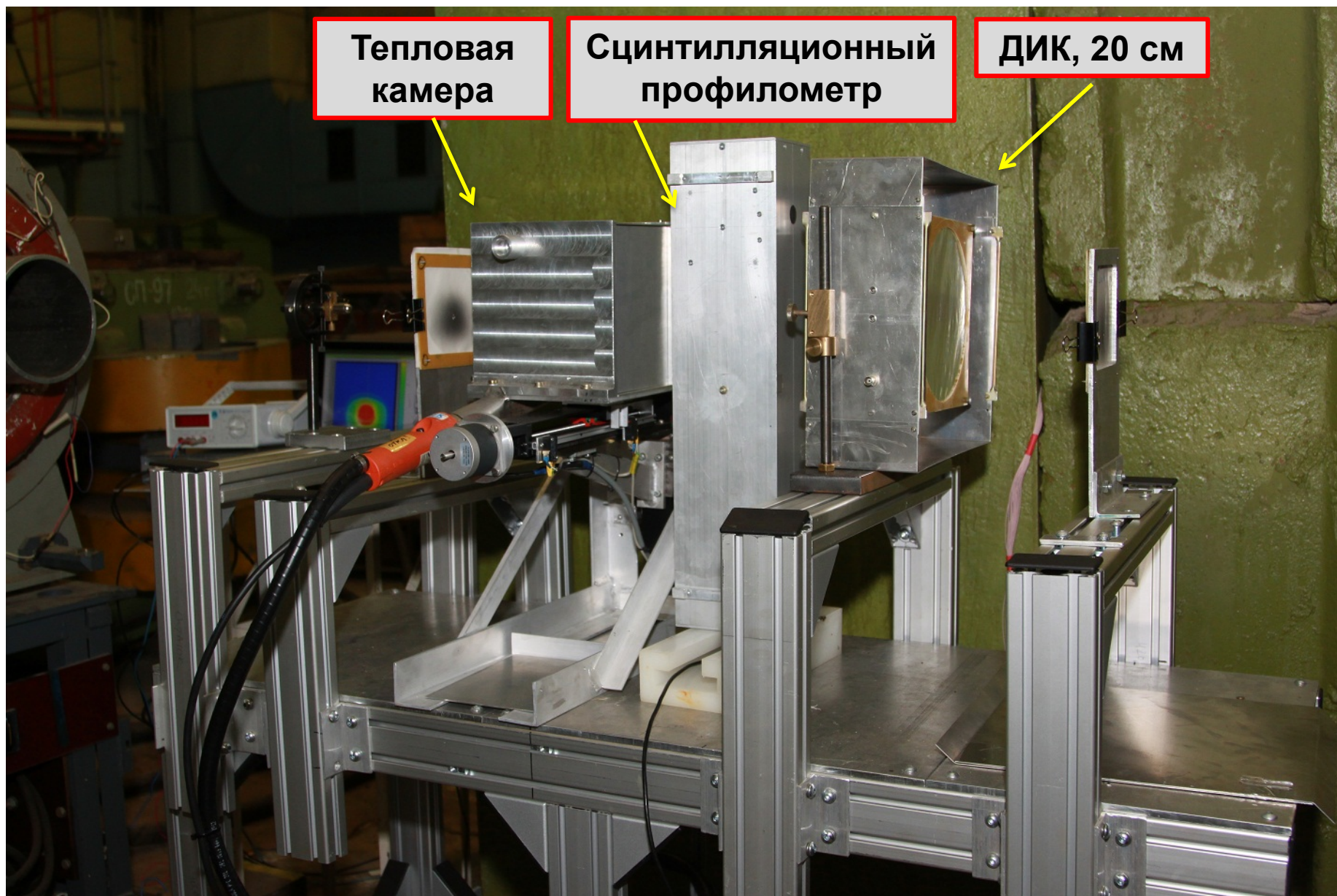
Proton energy, MeV	Standard deviation, MeV	Absorber thickness, mm	Absorber transmission, %	Proton energy (Exp.), MeV	Beam dimension, 10%	
					X, mm	Y, mm
62.1	28.20	530.5	1.6	64	38	35
100.09	24.63	521.2	2.3	103	37	21,6
197.93	15.77	490.8	3.4	201	26	24
300.21	12.12	448.7	5.4	302	27	28
399.12	10.24	398.0	8.4	397	24	27
499.24	8.92	340.9	13.5	496	25	26
601.03	7.89	279	22.0	590	25	27
699.88	7.01	213.1	35.6	699	29	27
800.18	6.13	144.3	56	808	25	24
899.85	5.13	73.11	82.1	903	29	26

Отдельное спасибо за времяпролетный эксперимент по экспериментальному определению энергии протонов лаборатории МФКС ОФВЭ (зав. Воробьев С.И.)

7.1 Exp. PROFILES OF VARIABLE ENERGY PROTON BEAMS IS OP - 1000



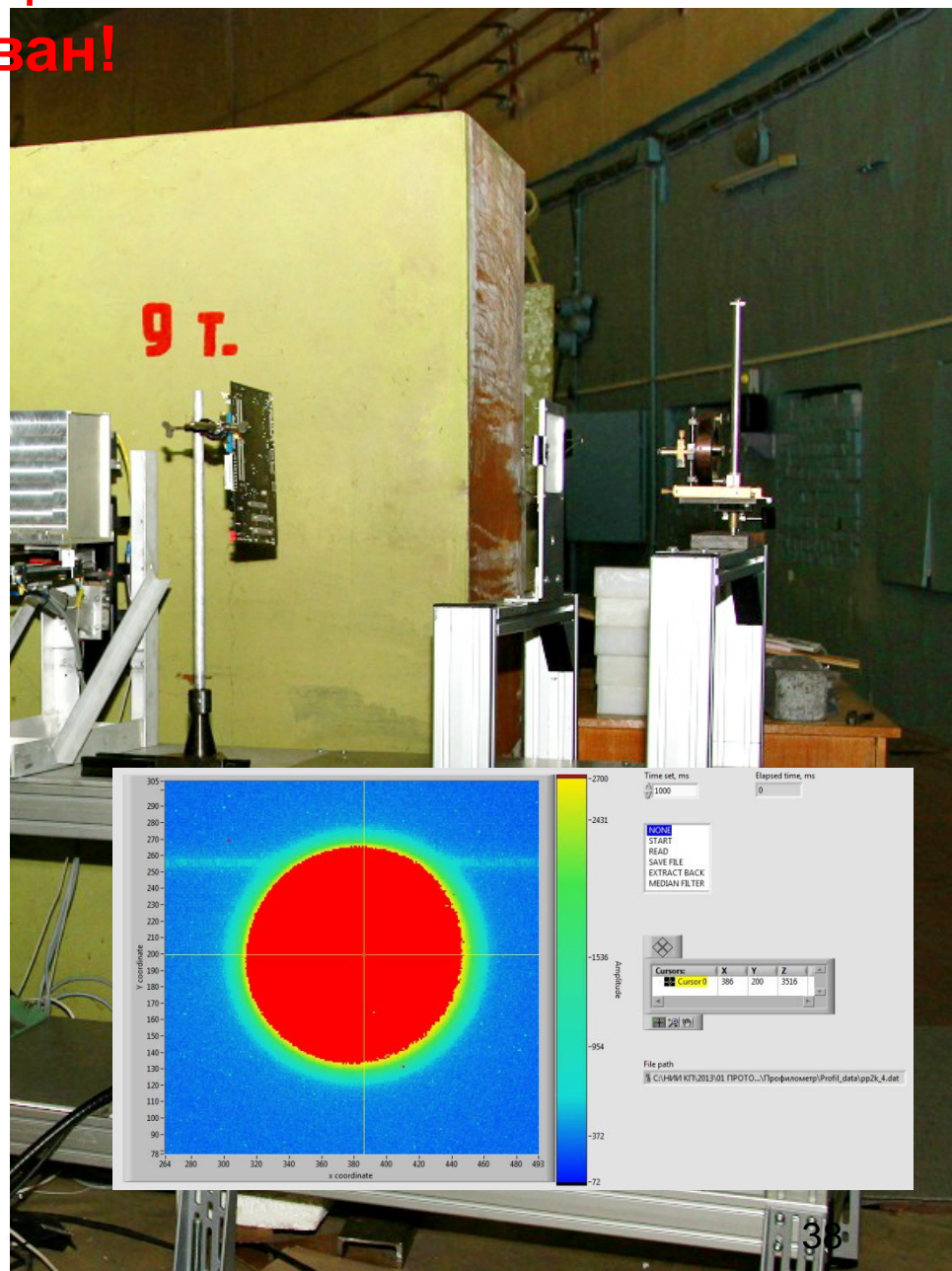
7.2 Экспериментальный стенд тракта РЗ для испытаний ЭКБ и РЭА на пучках протонов 64-900 МэВ (IS OP - 1000)



7.3 Exp. IS OP – Переменная энергия 60 – 1000 MeV – аттестован!



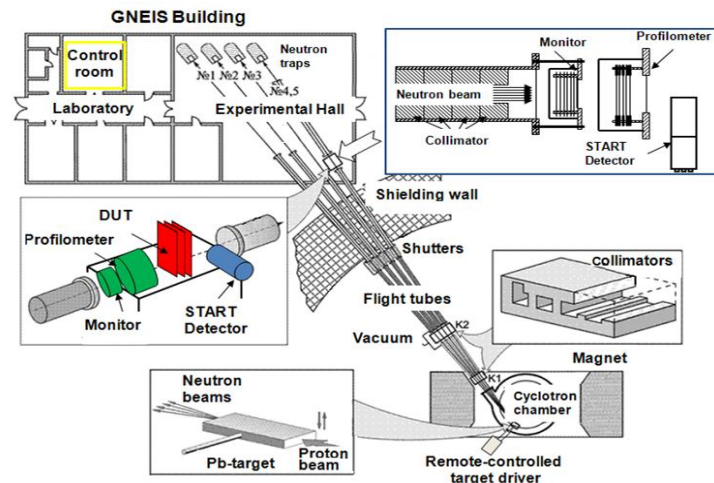
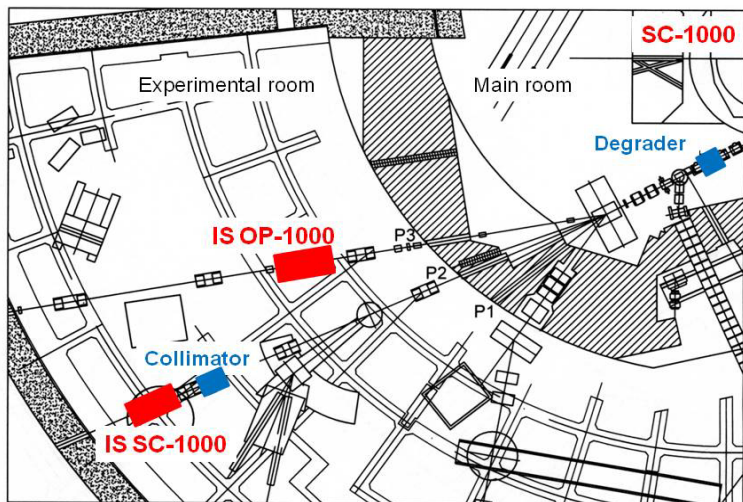
7.4 Exp. IS SC – 1000 Энергия не меняется – аттестован!



Подведем итоги

- Опираясь, на программы Geant4, Meson и Optimum были получены основные параметры для каждого пучка переменной энергии (сначала теоретически, затем экспериментально), такие как: интенсивность, энергетическая неоднородность, размеры пучка, однородность его пространственного распределения и т.д.
- На СЦ-1000 ПИЯФ НИЦ КИ созданы два протонных стенда для проведения радиационных испытаний ЭКБ:
 - ❖ в пучках переменной энергии 64 - 900 МэВ на тракте Р3,
 - ❖ В пучке на энергию 1000 МэВ на тракте Р2.
- Здесь же на СЦ-1000 успешно функционирует и комплекс для испытаний ЭКБ в нейтронном пучке атмосфероподобного спектра с энергией $1 \div 1000$ МэВ (ГНЕЙС).
- Таким образом, синхроциклотрон ПИЯФ НИЦ КИ является единственным ускорителем в России, на котором сосредоточены все средства для проведения комплексных радиационных испытаний ЭКБ и РЭА.

Параметры стандов



	IS SC - 1000	IS OP - 1000	ISNP/GNEIS
Условия	Атмосфера	Атмосфера	Атмосфера
Частицы	Протоны	Протоны	Нейтроны
Энергия, МэВ	1000	60 - 900	1 - 1000
Поток, частиц/см ² ·сек	10 ⁵ - 10 ⁸	10 ⁵ - 10 ⁸	≤ 4 · 10 ⁵
Область облучения, мм	Ø ≥ 25	Ø ≥ 25	Ø 50 – 100
Неоднородность, %	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Статус	Действует (1998)	Действует (2015)	Действует (2010) ⁴⁰

В создании стендов принимали участие:

Ускорительный отдел +

1. Американов Д.А.
2. Артамонов С.А.
3. Горбаткова О.Г.
4. Горкин Г.И.
5. Гресь В.П.
6. Иванов Е.М.
7. Михеев Г.Ф.
8. Новиков В.С.
9. Рябов Г.А.
10. Тонких В.А.
11. Илатовский А.

ОФВЭ

1. Вайшнене Л.А.
2. Воробьев С.И.
3. Геталов А.
4. Котов С.А.
5. Мороз Ф.В.
6. Щербаков Г.В.

ЛРФ

1. Андреев А.З.
2. Иванов Н.А.
3. Котиков Е.А.
4. Лебедева Ж.С.
5. Лобанов О.В.
6. Пашук В.В.

ЦЭТО

1. Волков Е.П.

ОНИ

1. Воробьев А.С.
2. Гагарский А.М.
3. Калинин С.И.
4. Косьяненко С.В.
5. Кузнецов И.Н.
6. Муратов В.Г.
7. Соловей В.А.
8. Суворов В.М.
9. Хахалин С.И.
10. Щербаков О.А.

Создан в 2018 г. Центр Коллективного Пользования: Гатчинский Протонный Комплекс

<http://gpc.pnpi.nrcki.ru>

Наши партнеры



L'OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES
(ONERA), TOULOUSE, FRANCE



АО «ЭНПО СПЭЛС»



Филиал АО «ОРКК» - «НИИ КП»



АО «РНИИ «Электронстандарт»



НПО ИМПУЛЬС



ОАО «Российские
космические системы»



ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ»



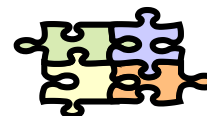
АО «НПЦ ЭлТест»



ООО "НПЦ "Гранат"



ОМРБ
ПИЯФ



ЗАО «НПО «Лептон»



ЗАО «ЦФТП
«Атомэнергомаш»



государственный
университет



АО НПП «САИТ»



ООО «НПП
«Цифровые решения»



10 Научных лаб.
+ 4 НТ лаб.

18 февраля 2019 г. Получен патент на изобретение:

Авторы:

Иванов Евгений Михайлович
Михеев Гелий Федорович
Артамонов Станислав Александрович

Анашин Василий Сергеевич
Козюков Александр Евгеньевич
Бакиров Линарис Раушатович

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2680151

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
ЭЛЕКТРОНИКИ АВИАКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ПРОТОНАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СИНХРОЦИКЛОТРОНА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение "Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (НИЦ "Курчатовский институт-ПИЯФ) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2018105230

Приоритет изобретения 12 февраля 2018 г.

Дата государственной регистрации в


Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 февраля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 12 февраля 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Иlichev



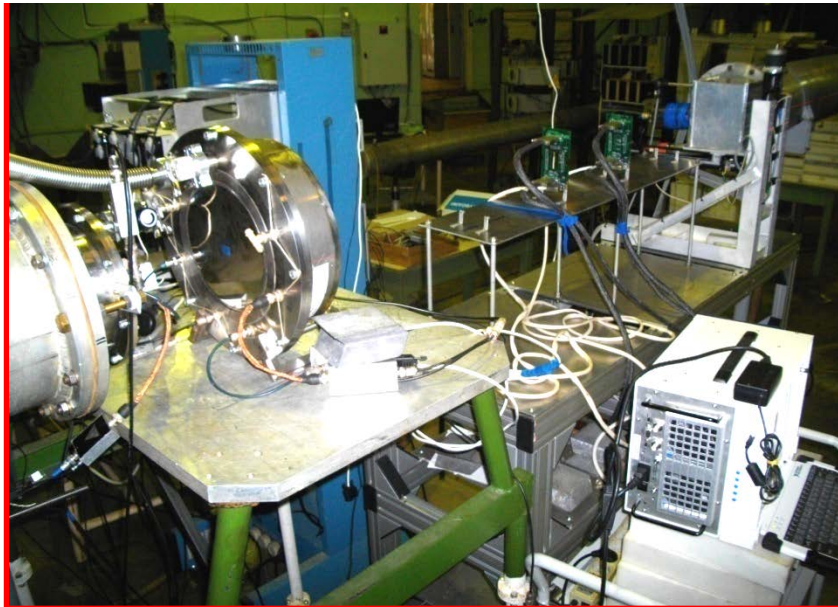
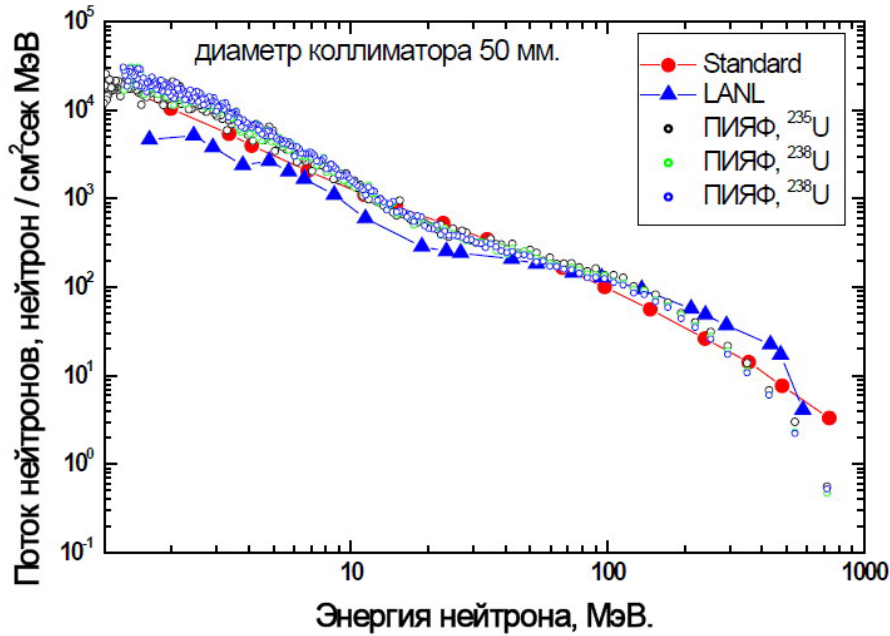
Планы и перспективы

- **Продолжить** поисковые работы по повышению интенсивности пучков при низких энергиях 60-300 МэВ
- **Расширить** аттестованный диапазон энергий IS OP-1000 по возможности **с шагом 50 МэВ** на имеющемся деградере. **Провести** для этой цели полный цикл вычислительных и экспериментальных работ
- **Расширить** необходимые вычислительные и экспериментальные работы по оптимизации проводки остаточных пучков (еще 4 линзы) после стендов по тракту РЗ (ИРИС)
- **Усовершенствовать** испытательные стенды для размещения на них большего количества образцов (до 10 плат на отдельных крепежах, перемещения по 3 осям и т.д.)
- **другое**

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ



СТЕНД ISNP – Нейтронный пучок атмосфероподобного спектра




 Закрытое Акционерное Общество
 «Иновационные технологии «Тест-Прибор»
 ЗАО «ИТ «Тест-Прибор»

АТТЕСТАТ

№ 177/15-1

Дата выдачи 21 сентября 2015 года

Удостоверяется, что Испытательный стенд ИС НП, ЦДКТ.412110.010,
наименование и обозначение испытательного оборудования

зав. № 75252247,
заводской или инвентарный номер

принадлежащий Филиалу ОАО «ОРКК» – «НИИ КП»,
наименование предприятия (организации), подразделения, центра

по результатам первичной аттестации признан пригодным для использования при испытаниях продукции, в соответствии с характеристиками, указанными в протоколе № НПК-1/4917 от 21 сентября 2015 года.

Периодичность аттестации 24 месяца
(месяц, лет)

Аттестат выдан ЗАО «ИТ «Тест-Прибор»

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР
 ЗАО «ИТ «Тест-Прибор»


 В. А. Подосинников



Экспертное заключение ФГУП «ВНИИФТРИ»,
 подтверждающее возможность ЗАО «ИТ «Тест-Прибор» проводить аттестацию испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции №10.003-2014

АТ N004515

5.7 Программа ОПТИМУМ-алгоритм

В N – мерном пространстве задаются исходные значения искомых величин x_i^0 ($i = 1, 2, \dots, n$) которые образуют начальное решение $\mathbf{X}^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$

Затем определяется последовательность случайных векторов

$$\mathbf{X}^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

компоненты которых имеют нормальный закон распределения с математическим ожиданием x_i^0 и среднеквадратическим отклонением σ_i

Для каждого \mathbf{X}^k вычисляется значение функции качества $\Phi^k = \Phi(\mathbf{X}^k)$, находится максимальное значение Φ^m , полученное при случайном поиске, и соответствующий ему вектор \mathbf{X}^m . Затем вычисляются компоненты градиента функции $\Phi(\mathbf{X})$ относительно вектора \mathbf{X}^0 :

5.8 Программа OPTIMUM-алгоритм

$$y_i = \frac{g_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n g_i^2}} \quad (7)$$

где

$$g_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\Delta\Phi^k \cdot \Delta x_i^k}{\sigma_i^2} \quad (8)$$

а

$$\Delta\Phi^k = \Phi^k - \Phi^0$$

$$\Delta x_i^k = x_i^k - x_i^0$$

На основании серии вычислений (6-8) производится уточнение решения, полученного случайным образом, по формуле

$$x_i^r = x_i^m + \varepsilon \cdot y_i \quad (9)$$

где ε - шаг градиента, который задается заранее.

(
9
)

5.9 Программа ОПТИМУМ

Затем вычисляется функция качества $\Phi^r = \Phi(\mathbf{X}^r)$, которая сравнивается с Φ^m

Если $\Phi^m < \Phi^r$, то снова выполняются операция (9), при этом вместо \mathbf{X}^m и Φ^m используются улучшенные значения \mathbf{X}^r и Φ^r

Если же $\Phi^m \geq \Phi^r$ то Φ^m , \mathbf{X}^m принимаются за исходные значения Φ^0 , \mathbf{X}^0

и выполняется новый цикл вычислений (6-9).

В процессе уточнения решения предусмотрено уменьшения области выбора случайных векторов, σ_i и масштабного множителя ε

Процедура выполняется до тех пор, пока изменение Φ или всех параметров x_i не будет меньше наперед заданной величины.

4.4.1 Оптимальное чередование полярностей линз в канале транспортировки РЗ

- Оптимизационные расчеты параметров исследуемого канала РЗ выявили, что чередование полярностей

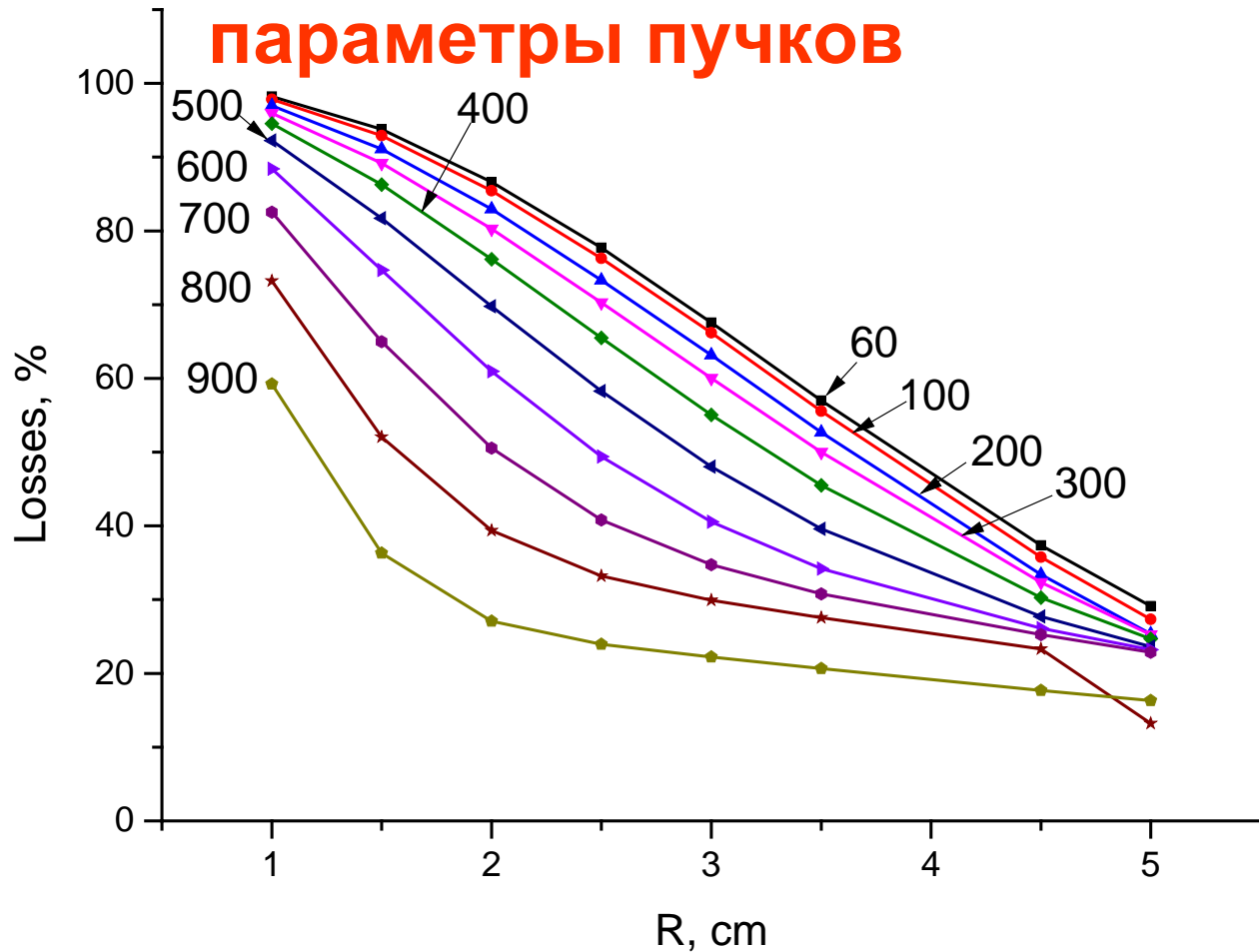
ГФ – ГД, ГФ - ГД для двух дублетов линз 20-К-50 дает (для конкретной геометрии канала РЗ) более высокую интенсивность в конце тракта, чем обратная (общепринятая), т.е.

ГД –ГФ, ГД - ГФ:

- для энергии пучка 500 МэВ выигрыш в ~20% по интенсивности пучка на мишени
- для энергии ~60 МэВ на мишень приходит больше частиц уже на ~66 %.

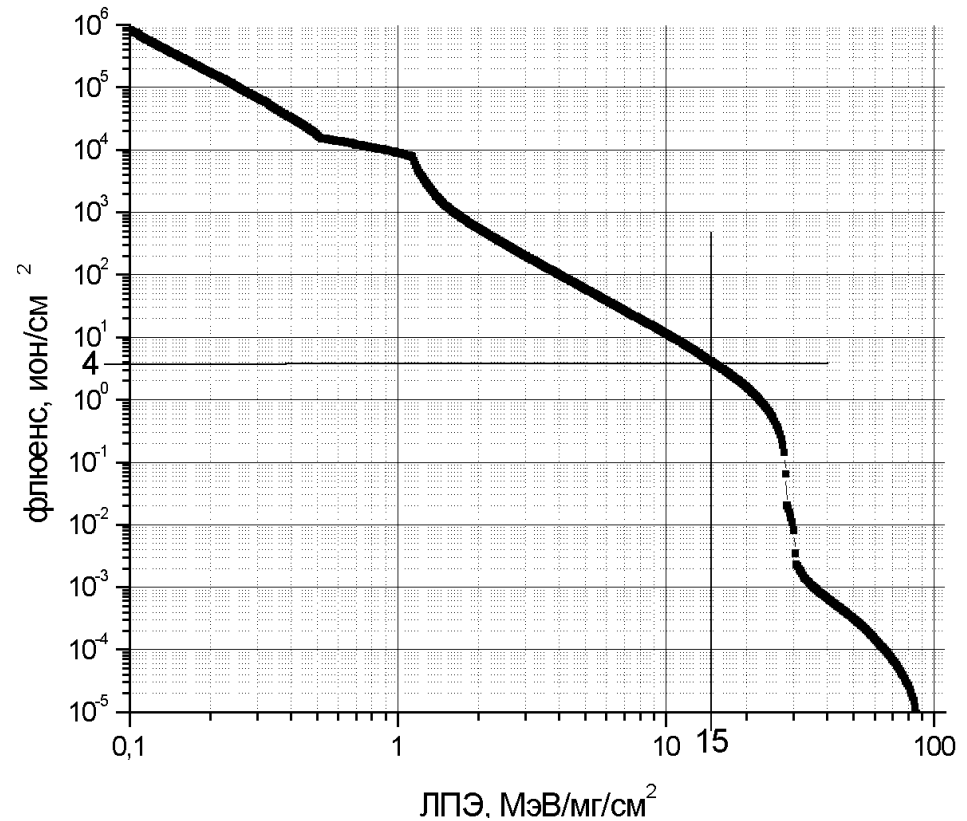
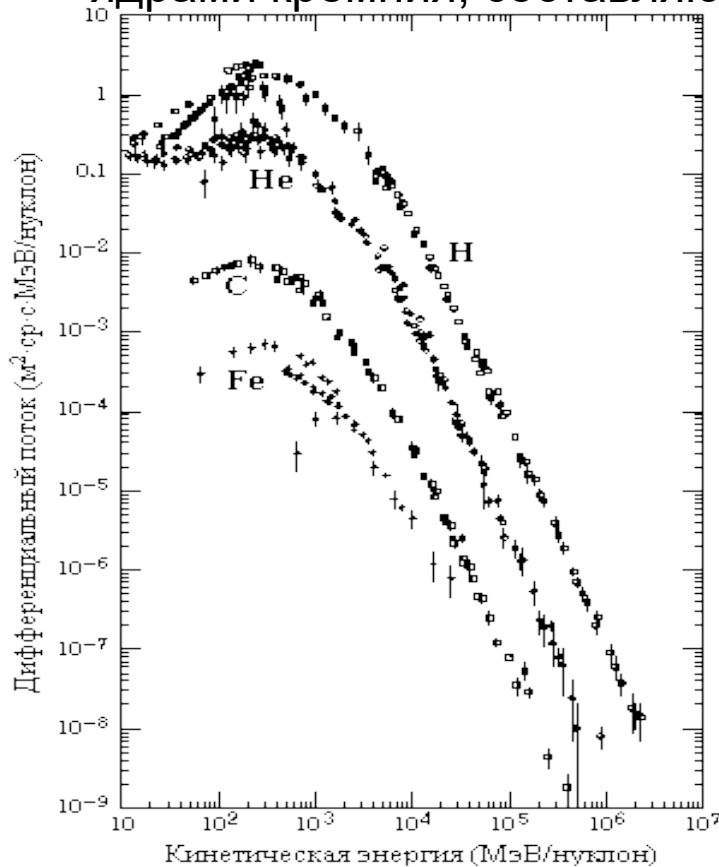
4.4.2 Влияние коллиматора деградера на параметры пучков

L=132 mm



Эффективность прохождения пучков переменной энергии 60 - 900 МэВ через новый коллиматор ДГ в зависимости от радиуса его отверстия. (В процентах от числа частиц, прошедших поглотитель.)
R(optim.)=3.5 cm

Максимальные величины ЛПЭ у ионов, образующихся в результате ядерных реакций из-за упругих столкновений протонов $E=1000$ МэВ с ядрами кремния, составляют величину на уровне 15 МэВ/мг/см²



Космическое излучение:

97% протоны, 2% He, 1% ионы.

Годовой интегральный спектр ЛПЭ тяжелых ионов на орбите МКС за защитой 5 г/см² (расчет по программе CREME96).