



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова



Моделирование системы транспортировки и фокусировки сильноточных ионных пучков установки SPI

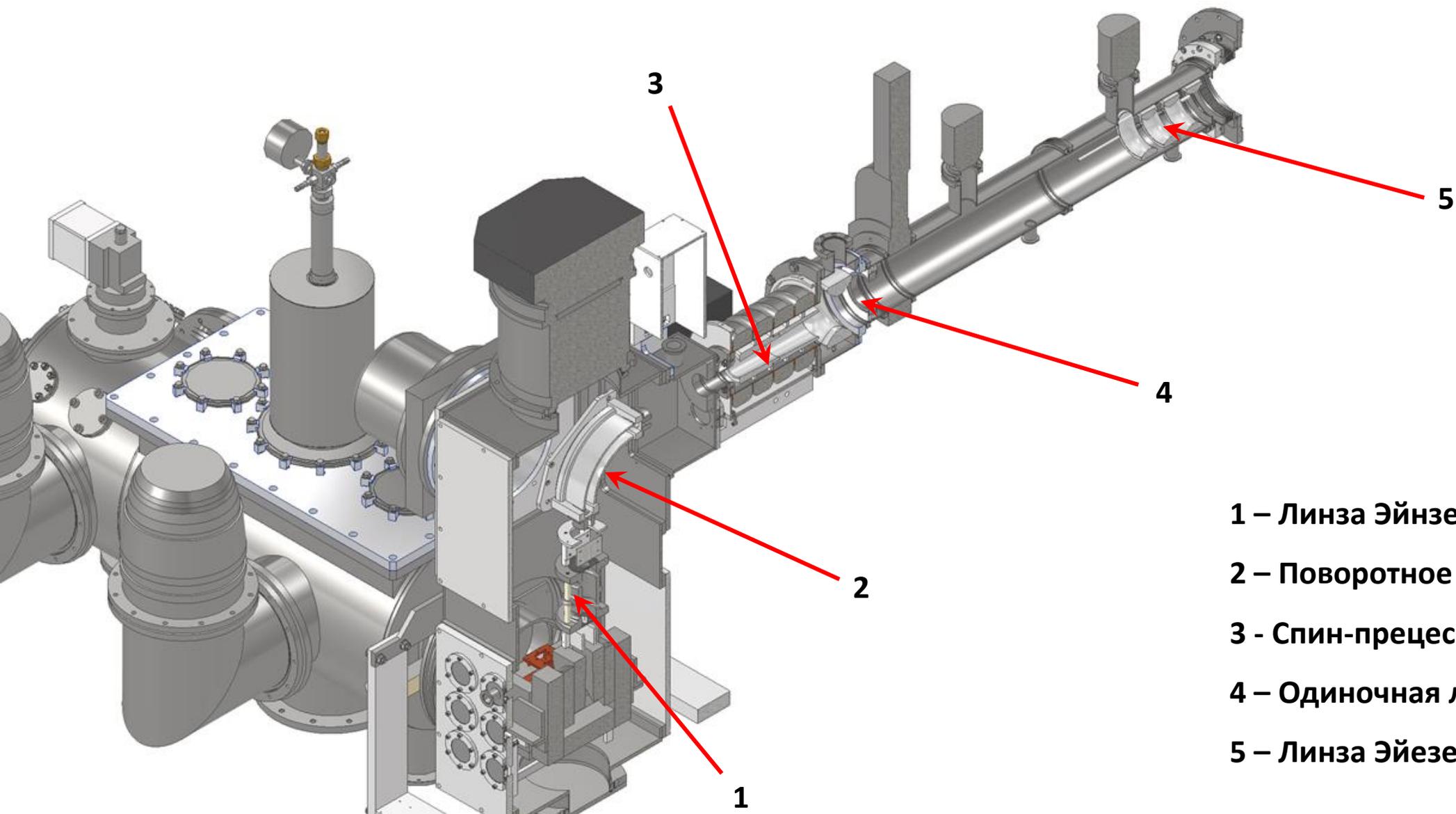
Антон Рождественский
ПИЯФ, ОФВЭ, ЛКСТ



- ❑ Разработка принципиальной схемы работы системы транспортировки ионного пучка. Моделирование устройств, входящих в состав системы диагностики, транспортировки и фокусировки ионного пучка (электростатические одиночные линзы, линзы Эйнзеля, соленоид)
- ❑ Моделирование устройств, входящих в состав системы транспортировки и фокусировки ионного пучка (сферическое зеркало, поворотный магнит). Отладка модели системы транспортировки и фокусировки ионного пучка.
- ❑ Сопряжение смоделированных устройств и создание общей модели системы. Поиск оптимальных параметров и режимов работы модели. Анализ полученных результатов.
- ❑ Проектирование системы транспортировки и фокусировки ионного пучка на основании результатов моделирования.



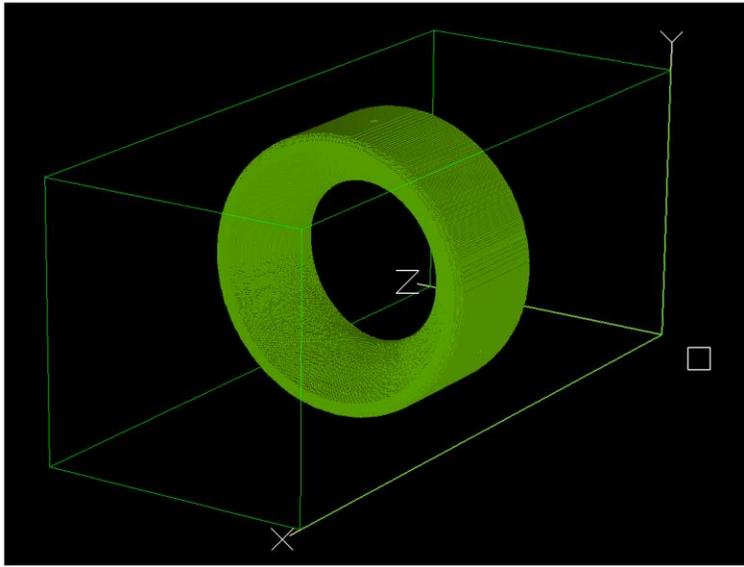
1. Пучок частиц после поворотного магнита, фокусируется посредством линз Эйнзеля в электростатическое зеркало
2. В электростатическом зеркале пучок поворачивается на 90 градусов
3. После зеркала пучок попадает в спин-прецессор и систему электродов, необходимых для доворота спина и уменьшения разлета пучка
4. После прохождения спин-прецессора пучок попадает в линзу Эйнзеля для последующей фокусировки во входные линзы ускорителя



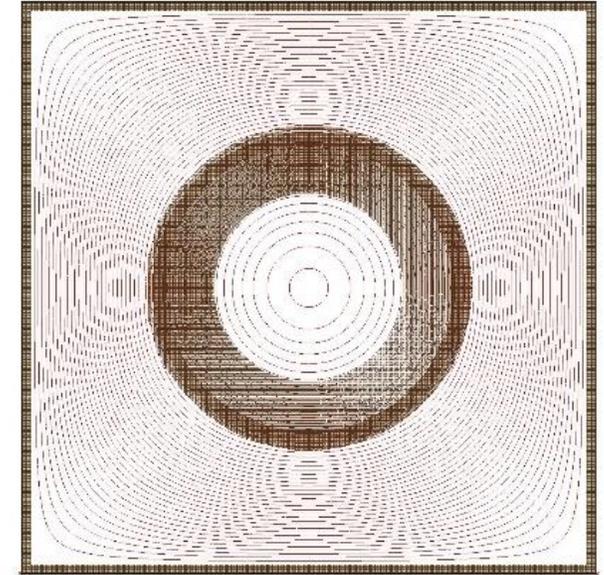
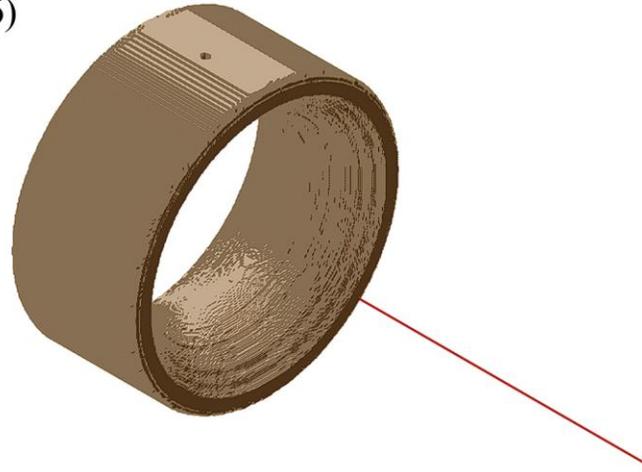
- 1 – Линза Эйнзеля
- 2 – Поворотное зеркало
- 3 – Спин-прецессор
- 4 – Одиночная линза
- 5 – Линза Эйзеля



а)



б)

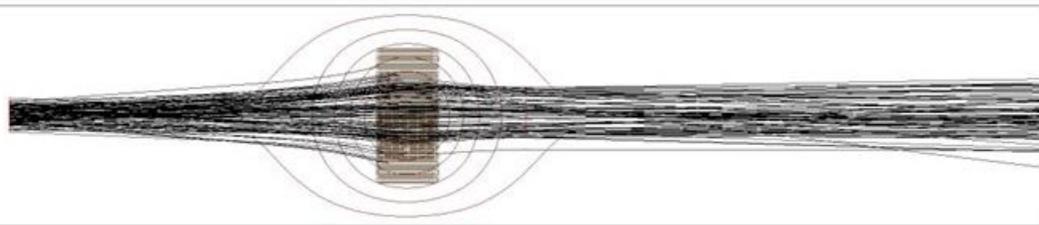
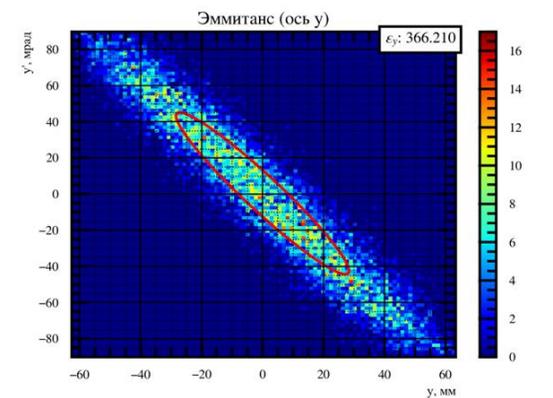
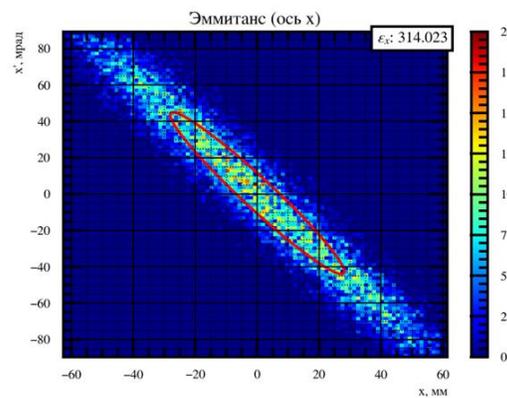
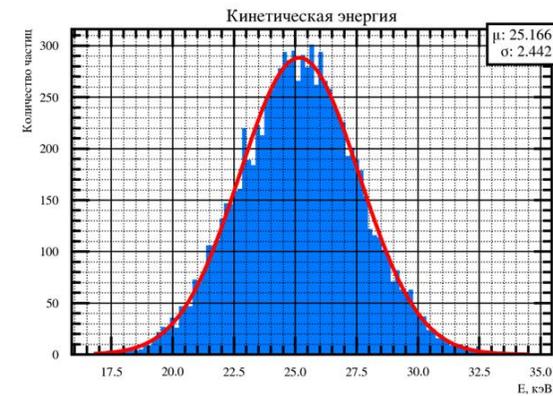
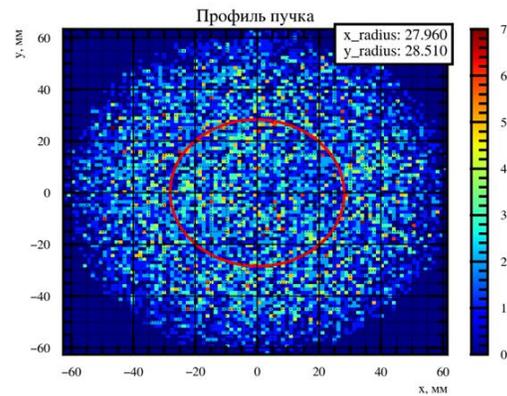
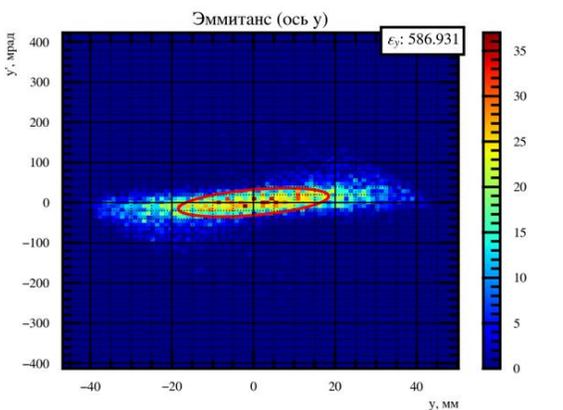
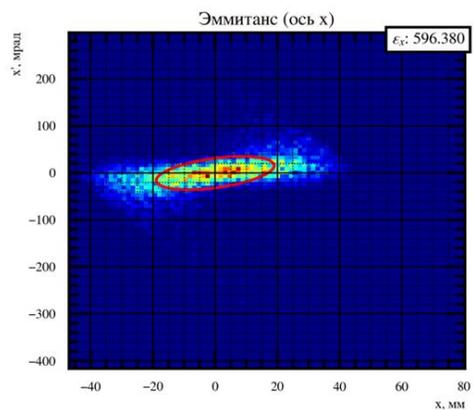
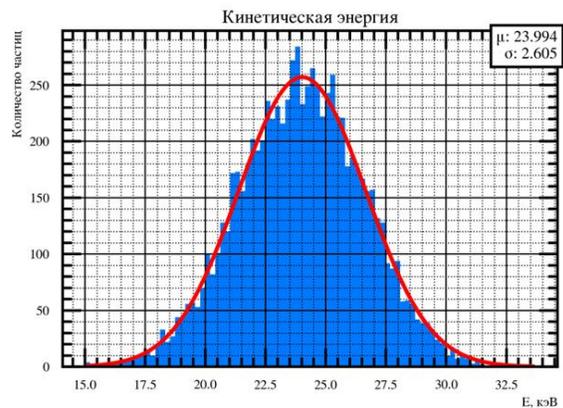
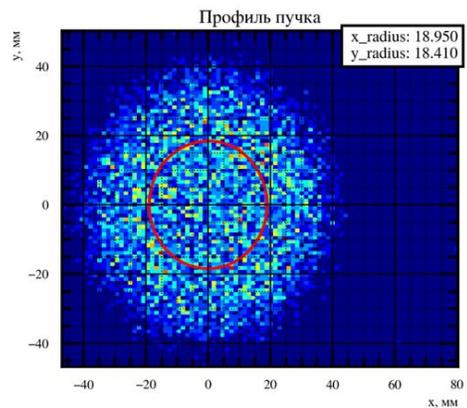


Начальный генератор частиц задавался следующим образом:

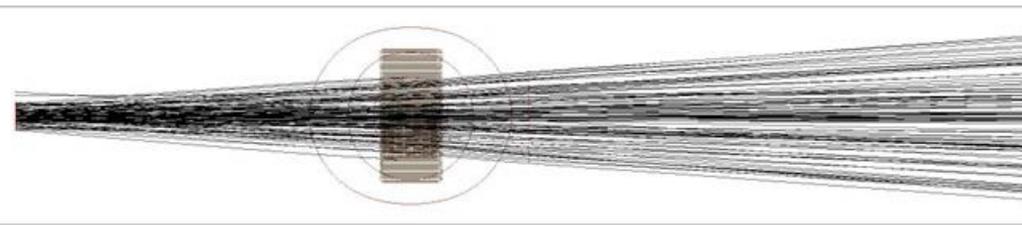
- профиль пучка представляет собой круг радиусом 12 мм
- угол разлета частиц задается конусом с углом 5 градусов
- энергия пучка равна 25 кэВ и разыгрывается по гауссу (стандартное отклонение = 2.5 кэВ)
- моделирование проводилось для протонов, N частиц = 1000



Одиночная линза с потенциалом



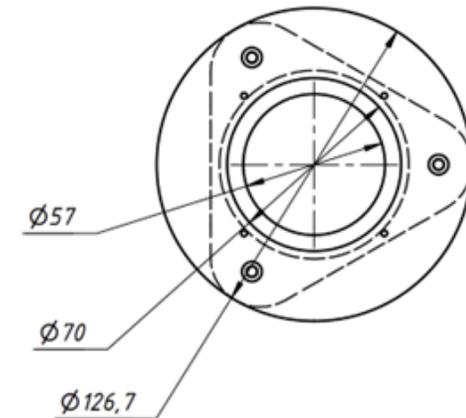
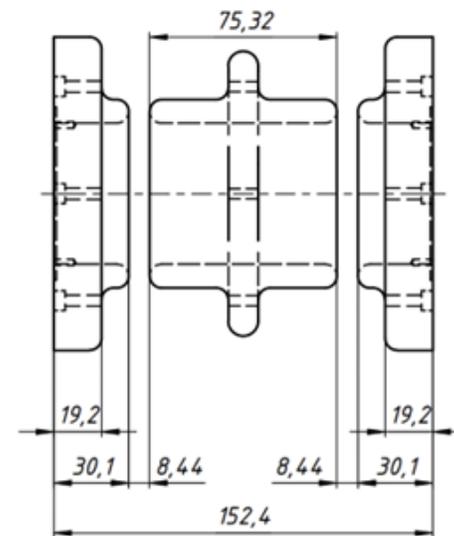
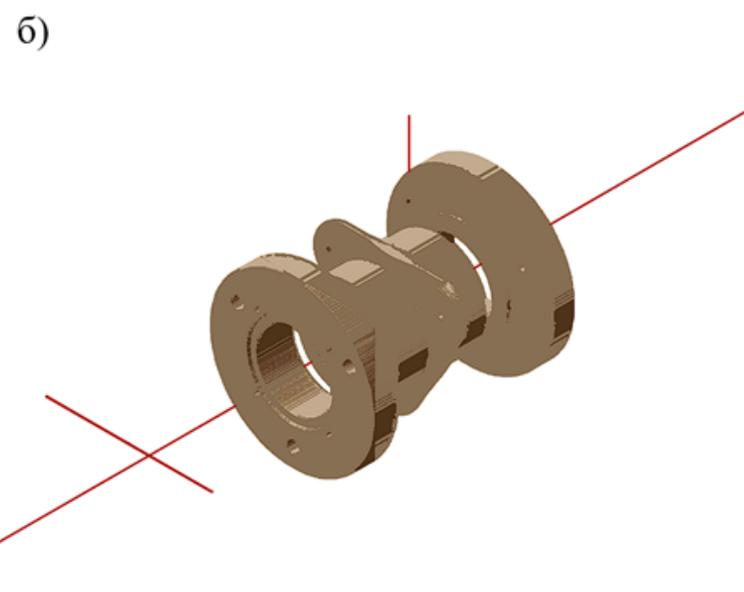
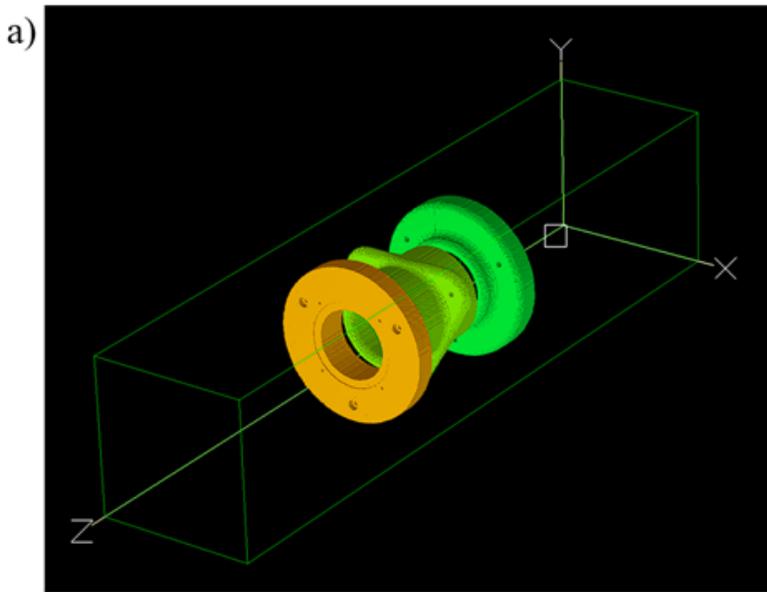
+20 кВ



-5 кВ

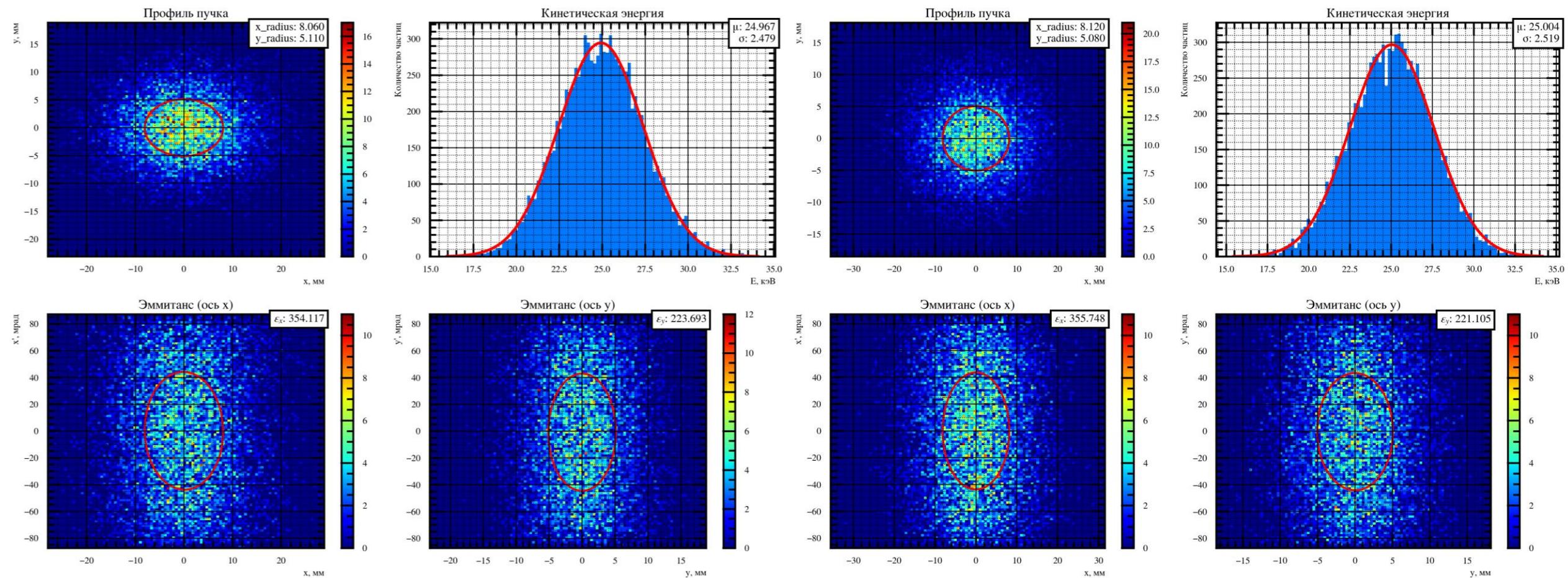


	0 кВ	5 кВ	10 кВ	20 кВ	-5 кВ	-10 кВ	-20 кВ
х, мм	28.25	27.68	25.93	18.95	27.96	28.12	27.23
у, мм	28.080	27.69	26.16	18.41	28.51	28.13	27.27
ϵ_x , π мм * мрад	315.291	316.953	311.379	596.380	314.023	322.655	328.581
ϵ_y , π мм * мрад	360.544	354.832	351.386	586.931	366.210	362.940	377.114



Начальный генератор частиц задавался следующим образом:

- профиль пучка представляет собой трехмерное распределение Гаусса со стандартными отклонениями по осям: $x = 7.6$ мм, $y = 8.8$ мм, $z = 0$ мм
- угол разлета частиц задается конусом с углом 5 градусов
- энергия пучка равна 25 кэВ и разыгрывается по гауссу (стандартное отклонение = 2.5 кэВ)
- моделирование проводилось для протонов и дейтронов, N частиц = 1000
- запись параметров пучка производилась на расстоянии 137,6 мм после прохождения линзы

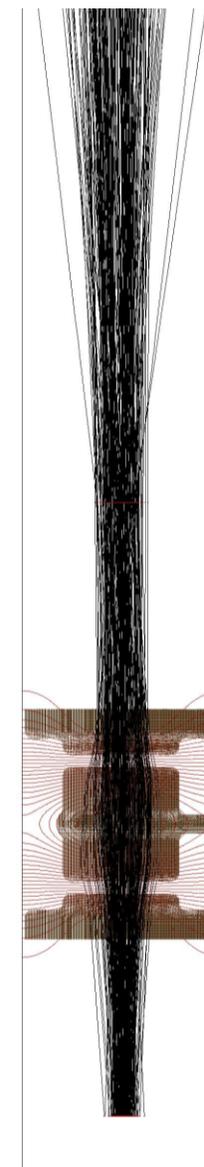
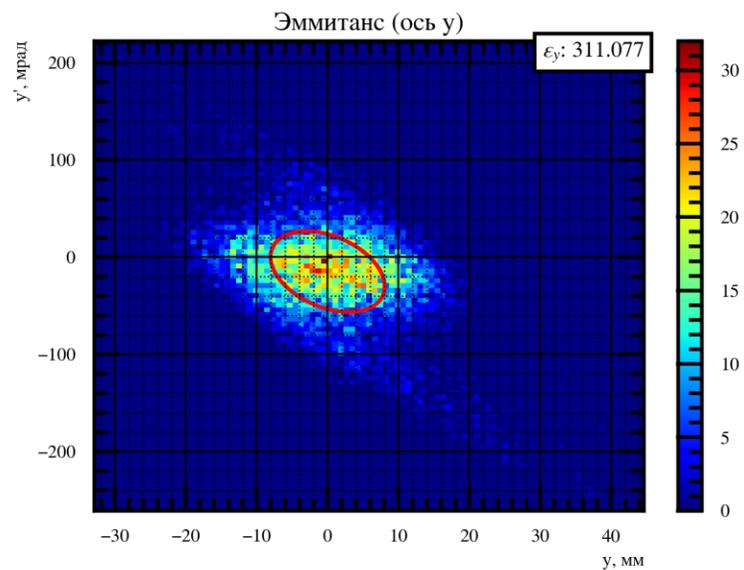
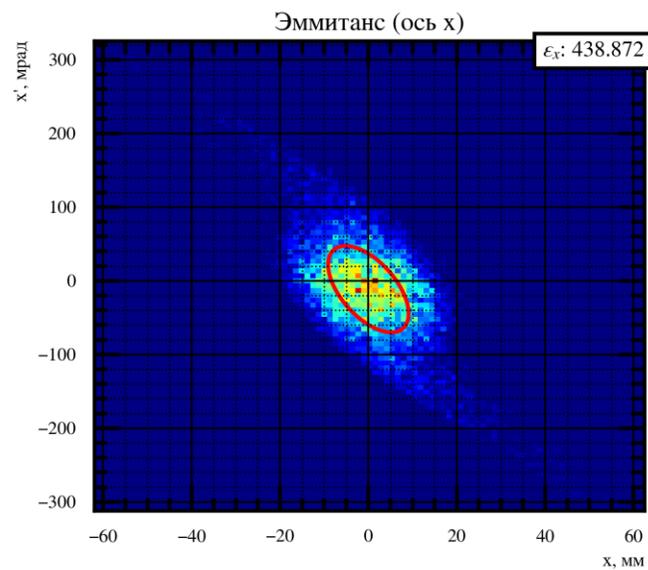
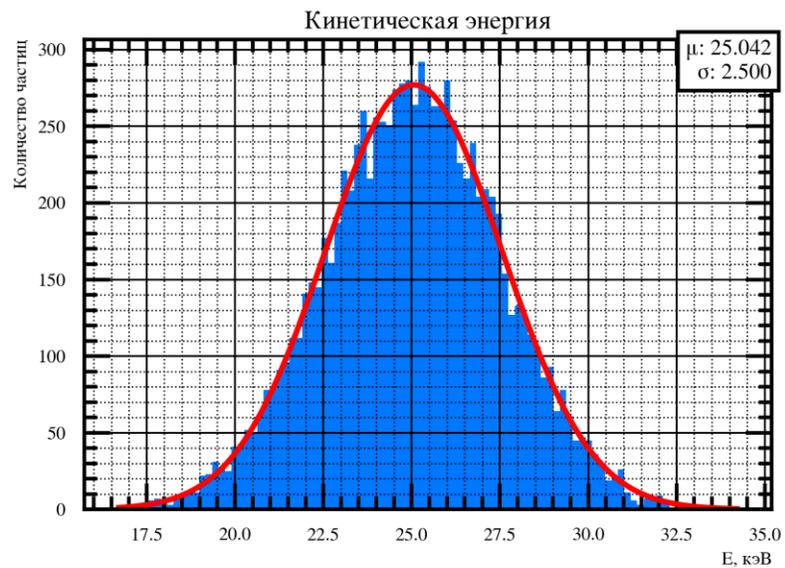
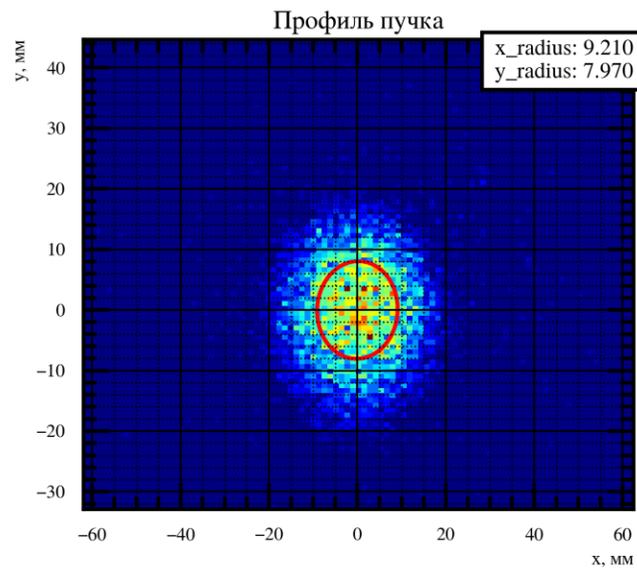


Протоны

Дейтроны



Линза Эйнзеля с напряжением +16 кВ (р)



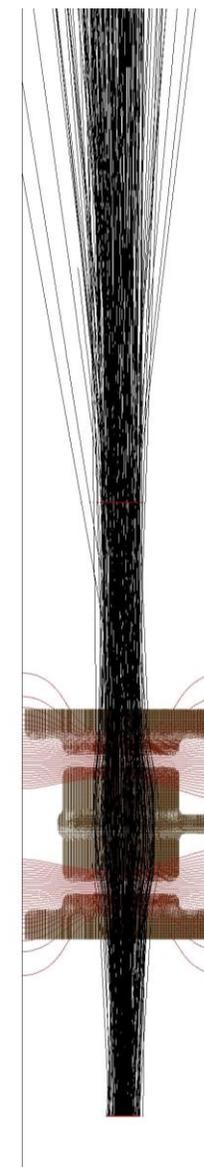
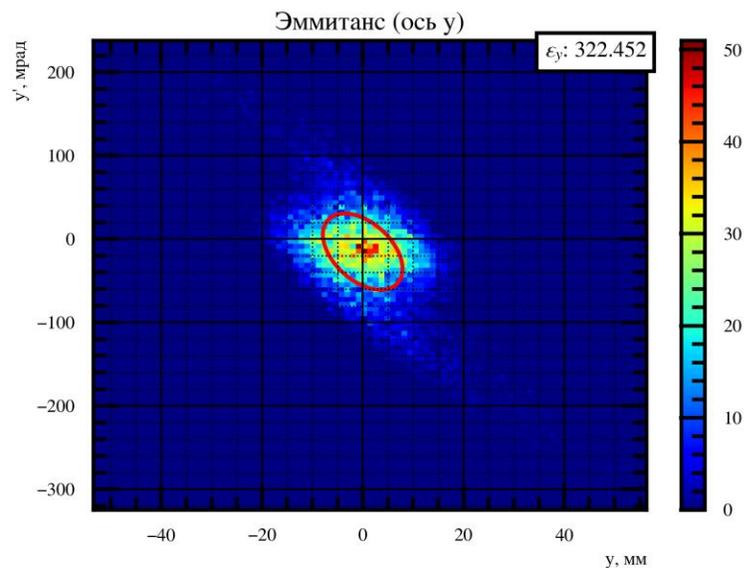
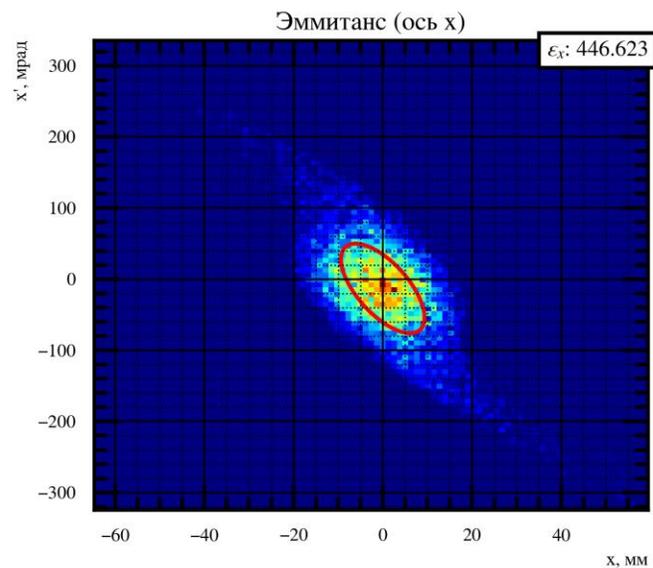
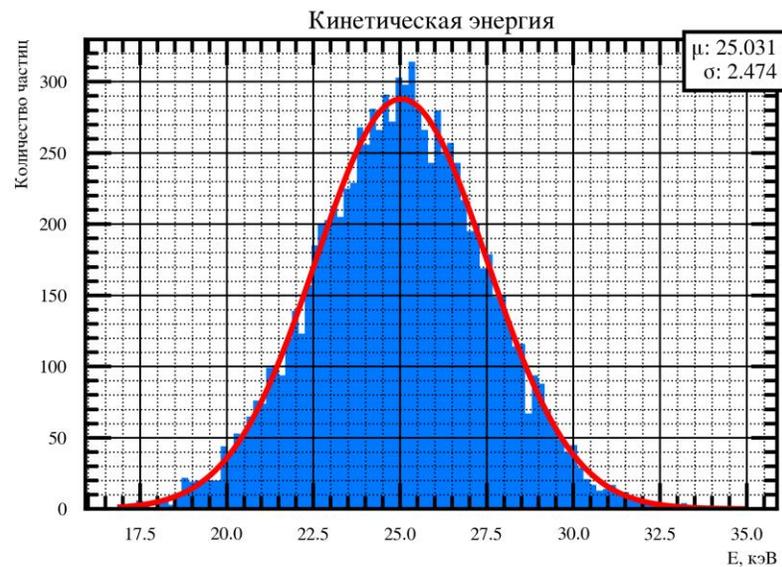
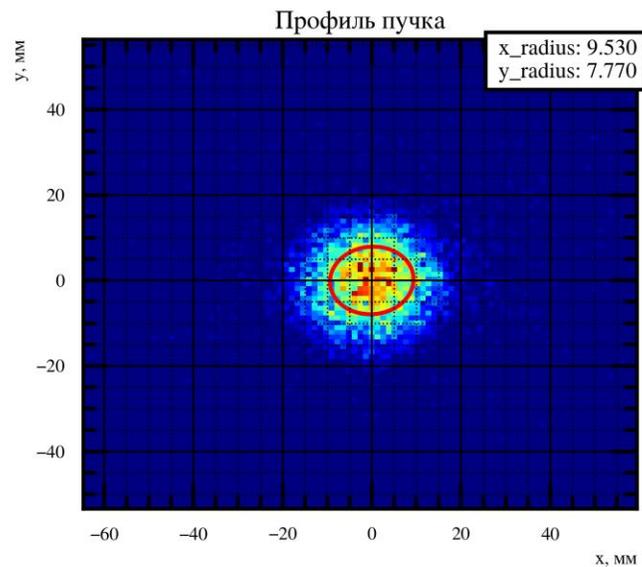


Значения профиля пучка протонов

	Начальное значение	0 кВ	10 кВ	16 кВ	20 кВ
x, мм	8.060	17.570	14.180	9.210	16.330
y, мм	5.110	17.890	14.470	7.970	13.240



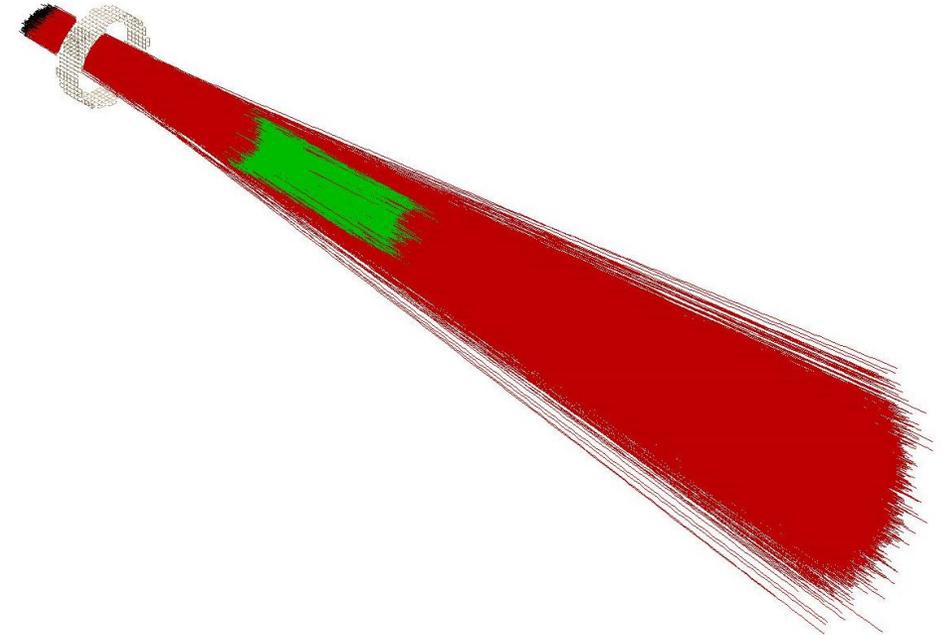
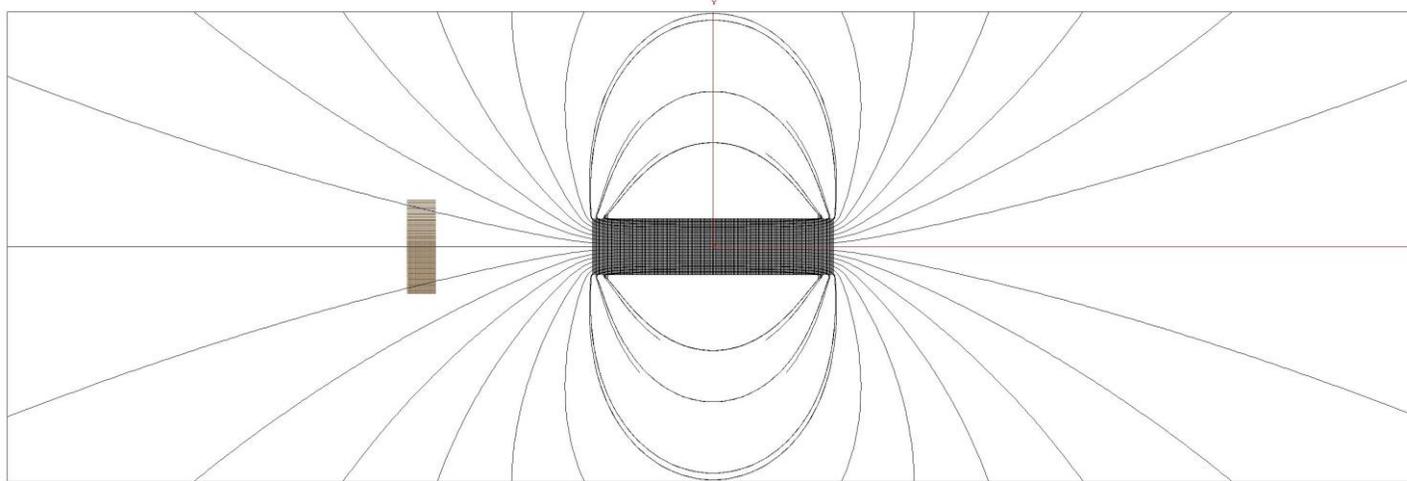
Линза Эйнзеля с напряжением +16.5 кВ (d)





Значения профиля пучка дейтронов

	Начальное значение	0 кВ	10 кВ	16.5 кВ	20 кВ
х, мм	8.12	17.570	14.120	9.53	16.61
у, мм	5.080	17.850	14.480	7.77	12.84



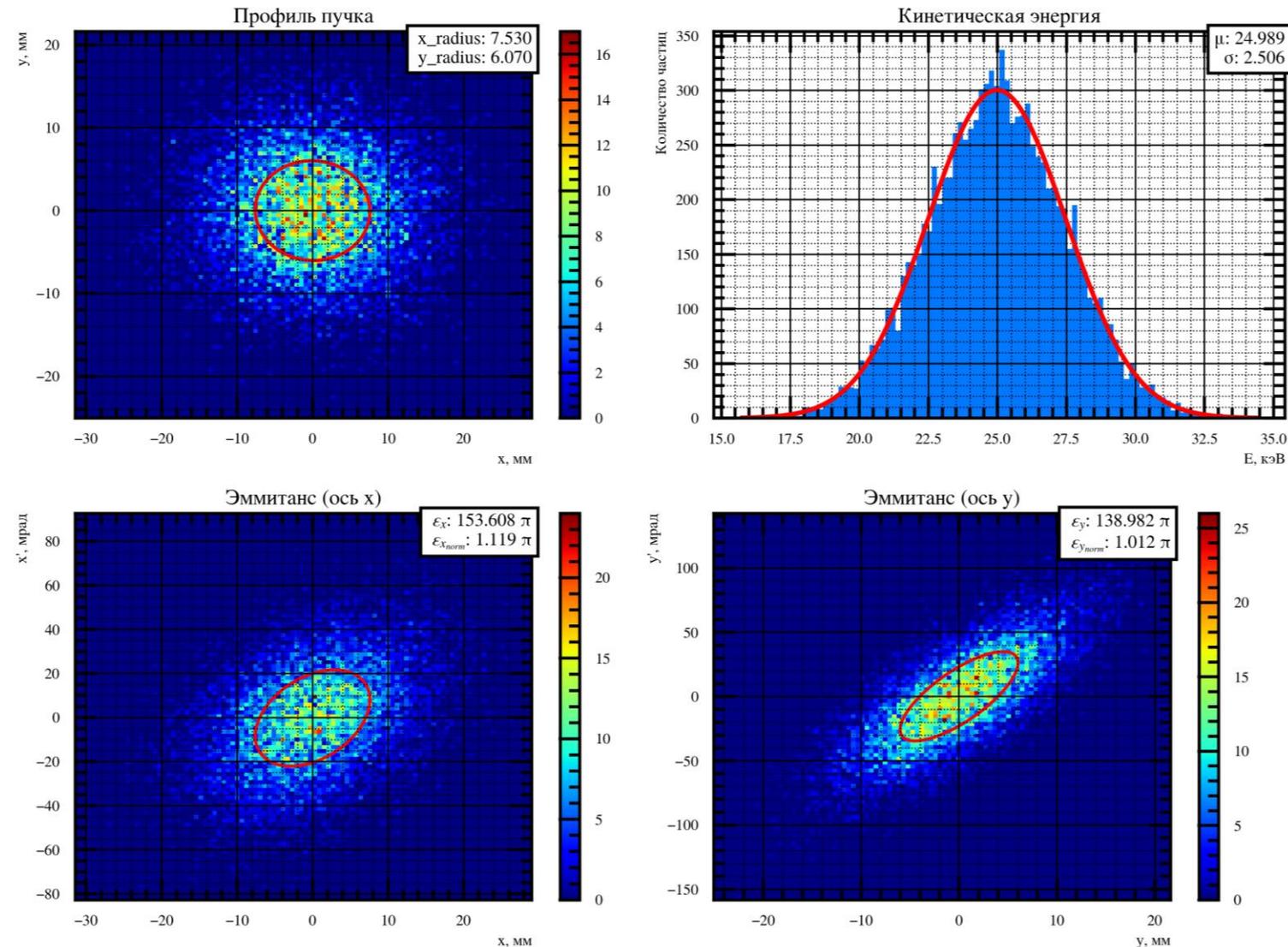
Параметры соленоида:

- максимально возможное магнитное поле 1000 Гс
- длина соленоида 257 мм
- внутренний диаметр 60 мм
- профиль пучка на расстоянии 142 мм до входа в соленоид, соответствует экспериментальным данным
- нормализованный эмиттанс составляет примерно 1π
- запись параметров пучка производилась на расстоянии 976 мм после прохождения соленоида для значений магнитного поля 0, 100, 200, 400, 600, 800, 1000 Гс



Начальный генератор частиц задавался следующим образом:

- профиль пучка на расстоянии 142 мм до входа в соленоид, выбирался в соответствии с экспериментальными данными, а нормализованный эмиттанс составляет примерно 1π добавлен один кольцевой электрод с потенциалом -5 кВ, для имитации прохождения пучком сферического зеркала
- начальный профиль пучка до электрода представляет собой трехмерное распределение Гаусса со стандартными отклонениями по осям: $x = 7$ мм, $y = 4$ мм, $z = 0$ мм
- угол разлета частиц задается распределением гаусса по азимутальному и зенитному углу со средним значением 0 градусов (параллельно оси пучка) и стандартными отклонениями 1.25 и 2 градуса соответственно
- энергия пучка равна 25 кэВ и разыгрывается по гауссу (стандартное отклонение = 2.5 кэВ);
- моделирование проводилось для протонов, N частиц = 10000



Расчет эммитанса производился путем наложения эллипса методом максимального правдоподобия и получения параметров эллипса:

$$\epsilon_x = r_x r_{x'} \quad \epsilon_y = r_y r_{y'}$$

где r_x и $r_{x'}$ – соответствующие полуоси эллипса.

Нормализованный эммитанс (в отличие от геометрического эммитанса, основанного на доли фазовой площади или объема) равен:

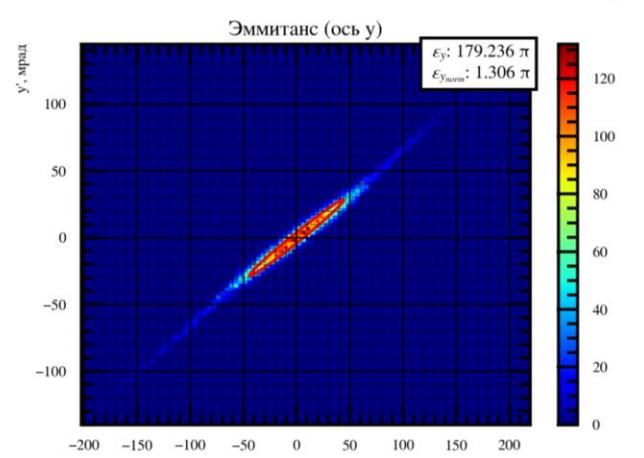
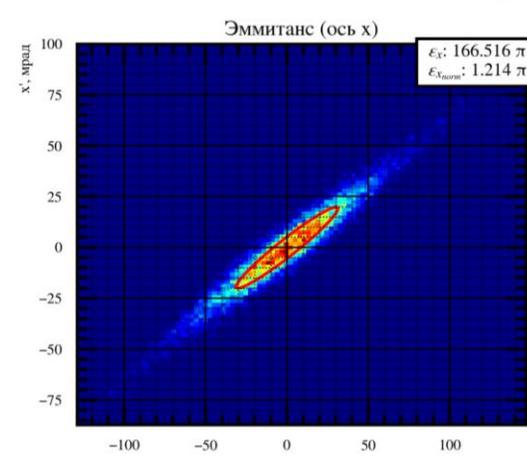
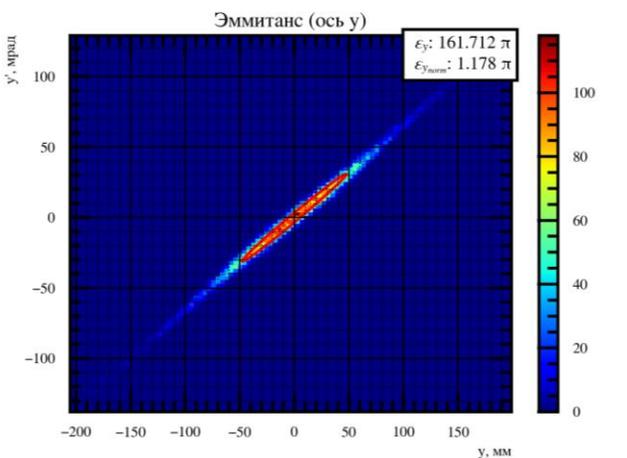
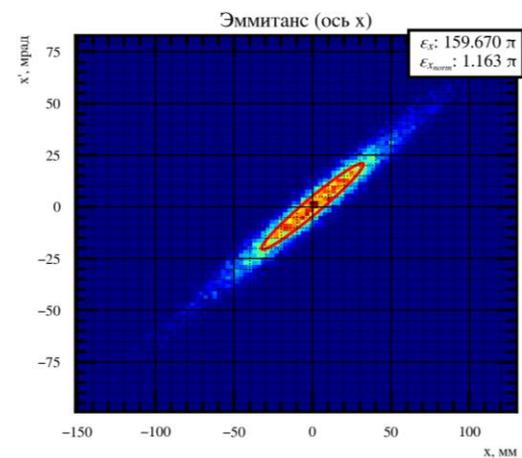
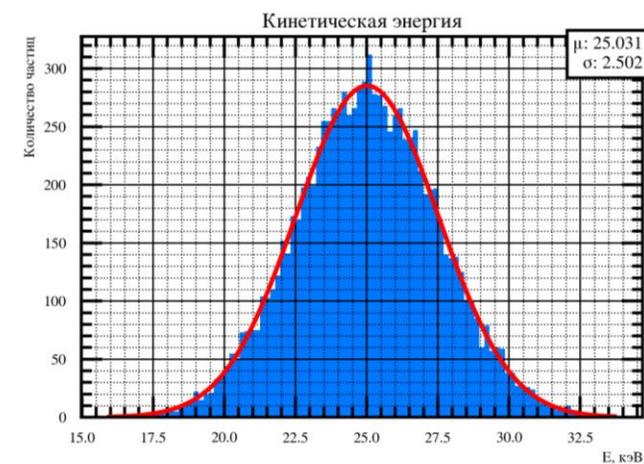
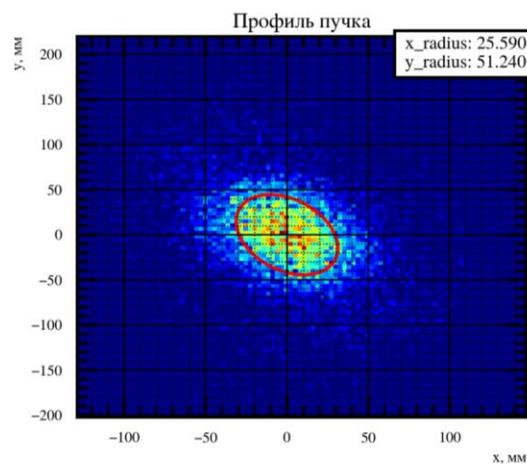
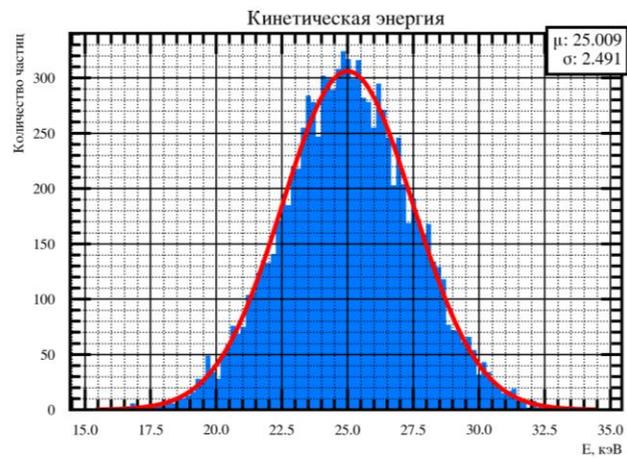
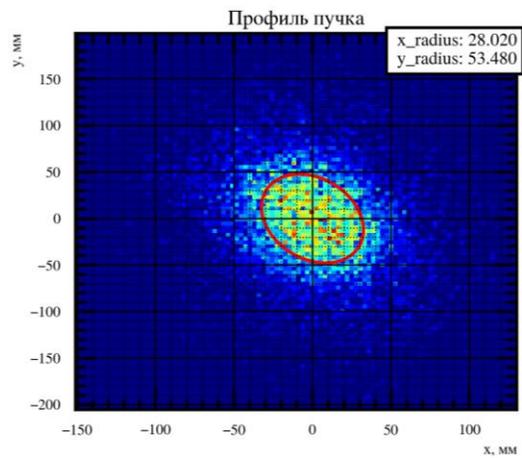
$$\epsilon_{n_x} = \beta \gamma \epsilon_x$$

где β и γ — релятивистские параметры.

$$\beta = \frac{\bar{v}}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2}$$

Начальные параметры пучка



600 Гаусс

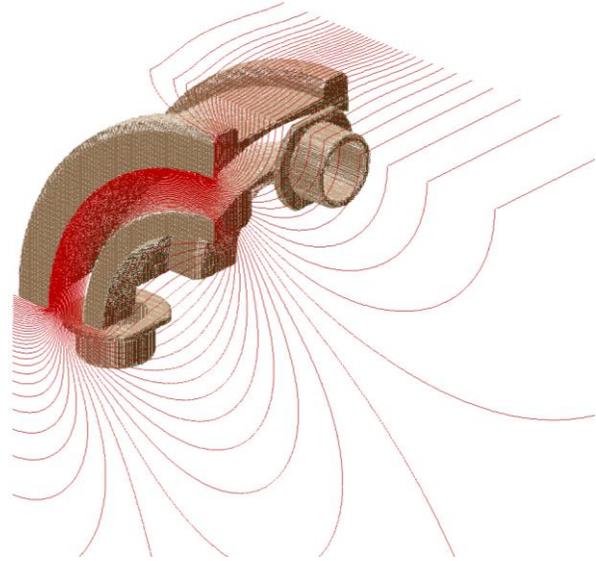
800 Гаусс



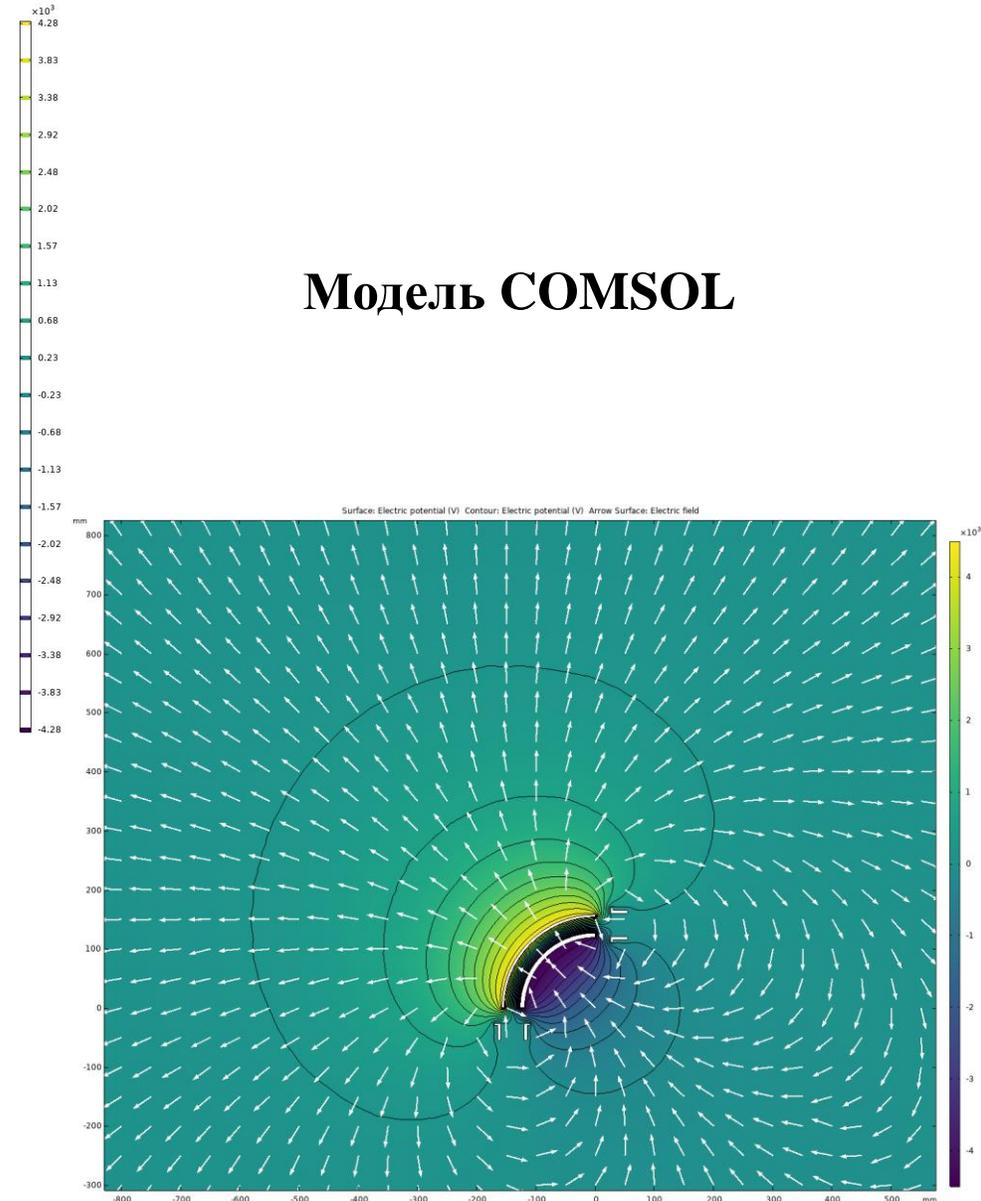
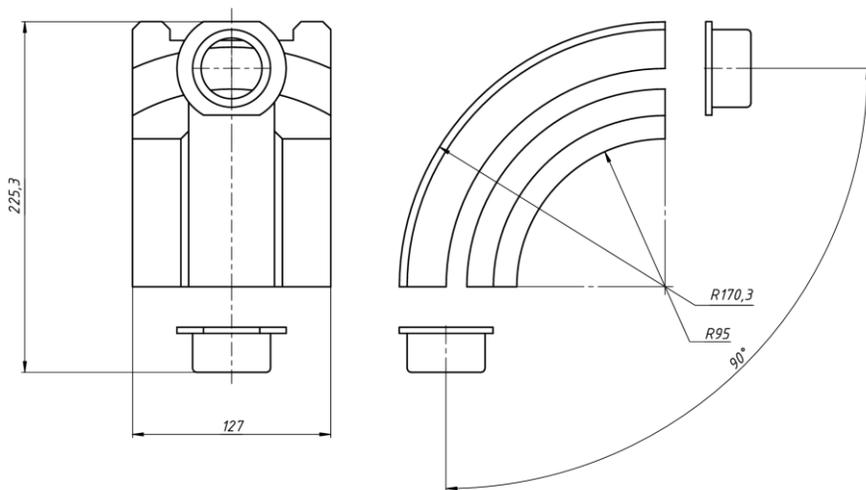
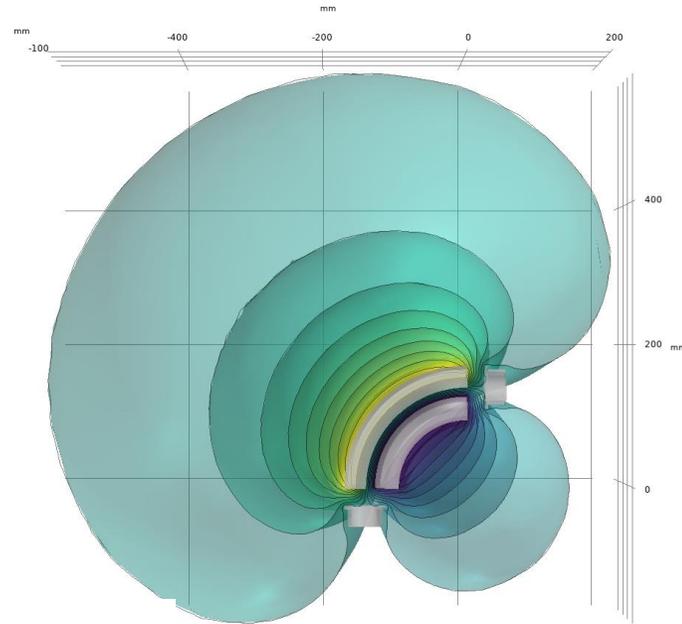
	Нач. параметры	0 Гс	100 Гс	200 Гс	400 Гс	600 Гс	800 Гс	1 к Гс
x, мм	7.53	33.52	33.14	32	30.030	28.020	25.59	23.64
y, мм	6.070	52.67	53.8	54.83	54.640	53.480	51.24	48
ϵ_x, π мм * мрад	153.608	152.782	153.576	154.933	156.345	159.67	166.516	182.750
ϵ_y, π мм * мрад	138.982	140.304	143.635	141.965	145.571	161.712	179.236	213.207
ϵ_{n_x}, π мм * мрад	1.119	1.113	1.119	1.128	1.139	1.163	1.214	1.332
ϵ_{n_y}, π мм * мрад	1.012	1.022	1.046	1.034	1.061	1.178	1.306	1.554



- ✓ **Разработка принципиальной схемы работы системы транспортировки ионного пучка. Моделирование устройств, входящих в состав системы диагностики, транспортировки и фокусировки ионного пучка (электростатические одиночные линзы, линзы Эйнзеля, соленоид)**
- **Моделирование устройств, входящих в состав системы транспортировки и фокусировки ионного пучка (сферическое зеркало, поворотный магнит). Отладка модели системы транспортировки и фокусировки ионного пучка.**
- **Сопряжение смоделированных устройств и создание общей модели системы. Поиск оптимальных параметров и режимов работы модели. Анализ полученных результатов.**
- **Проектирование системы транспортировки и фокусировки ионного пучка на основании результатов моделирования.**

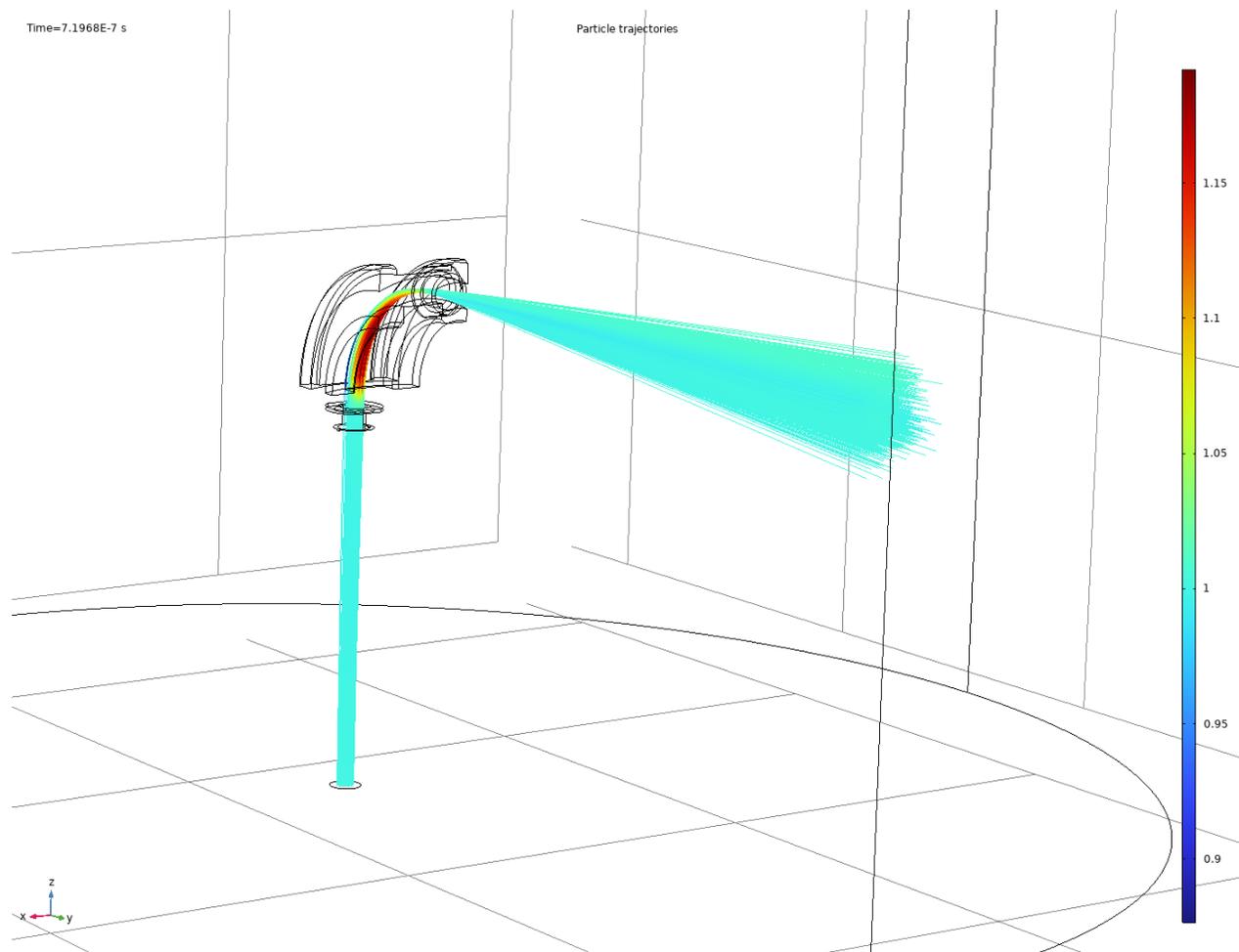
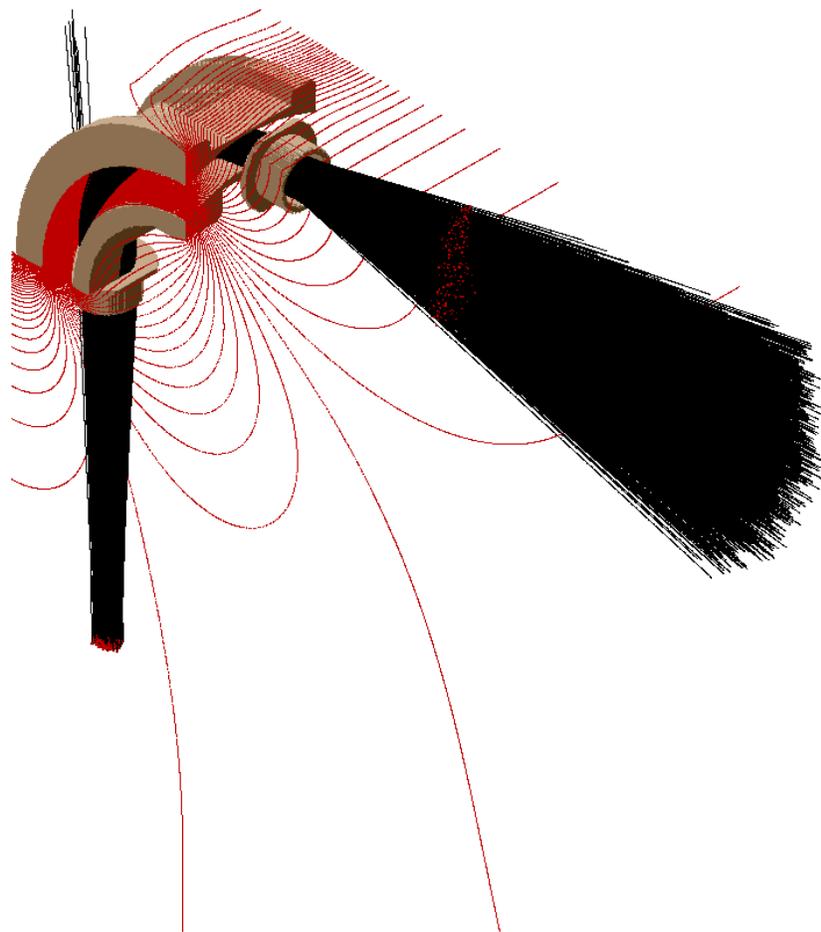


Модель SimIon



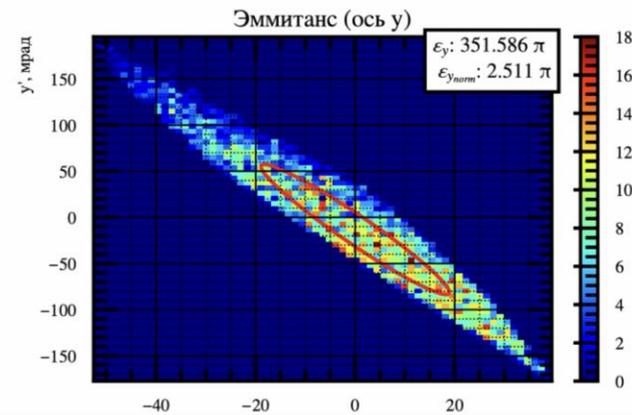
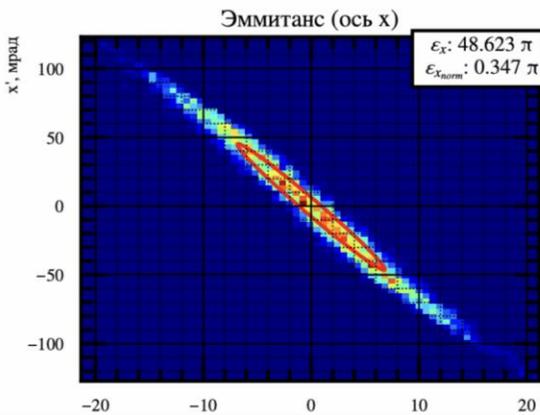
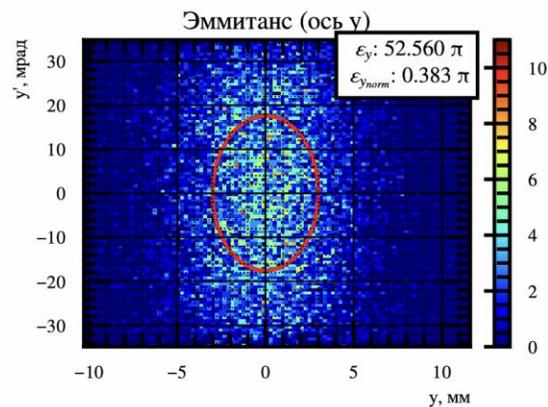
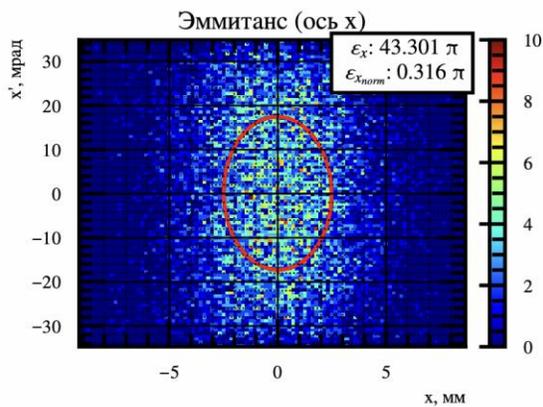
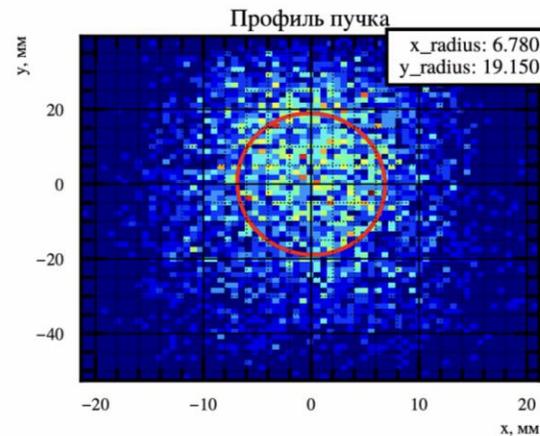
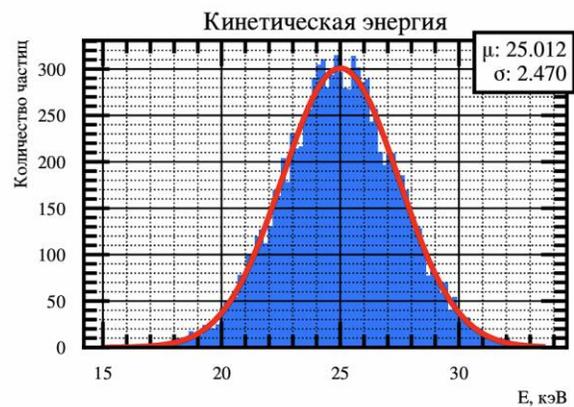
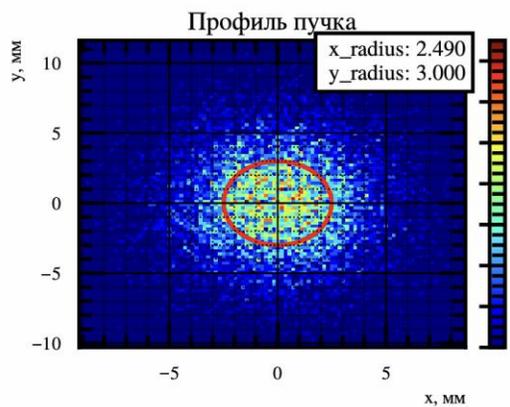


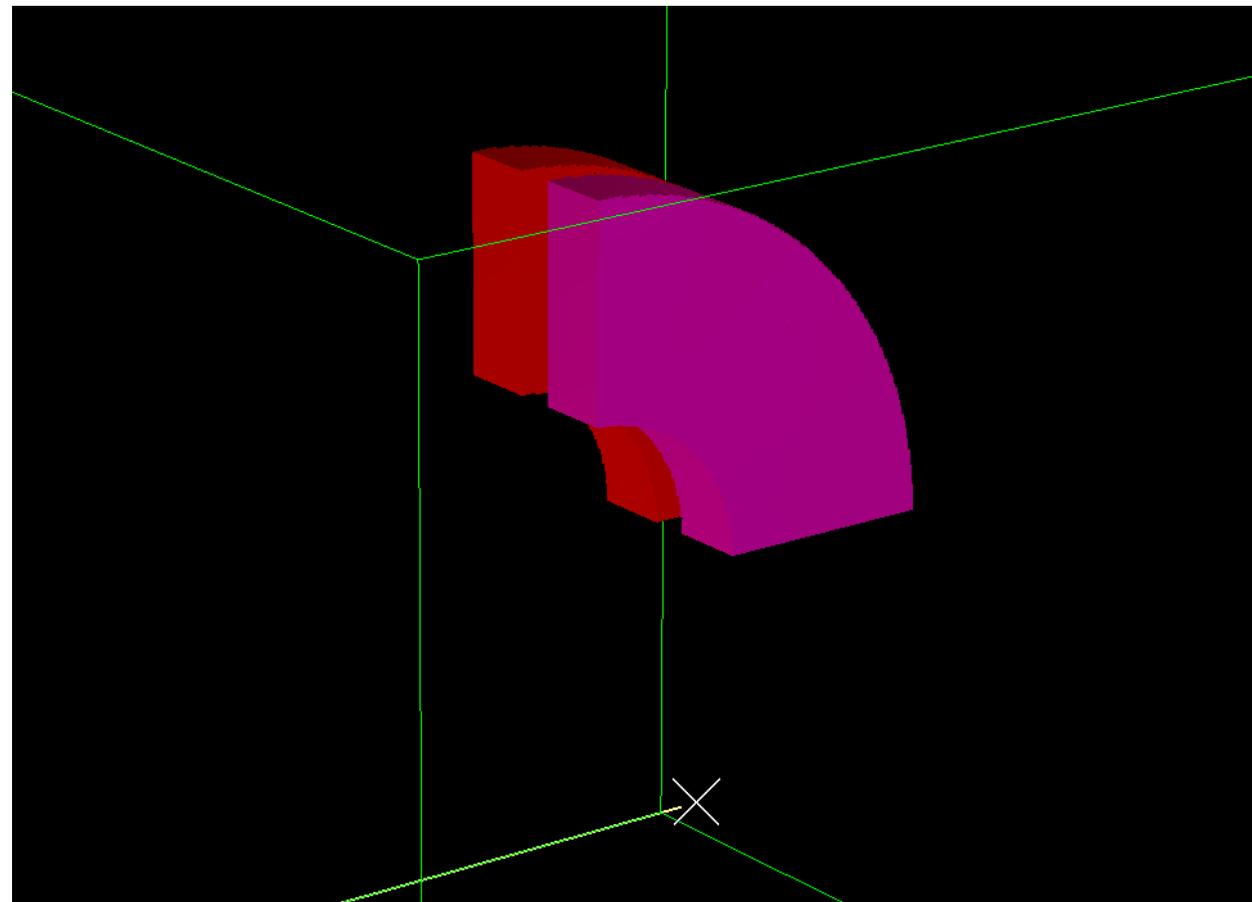
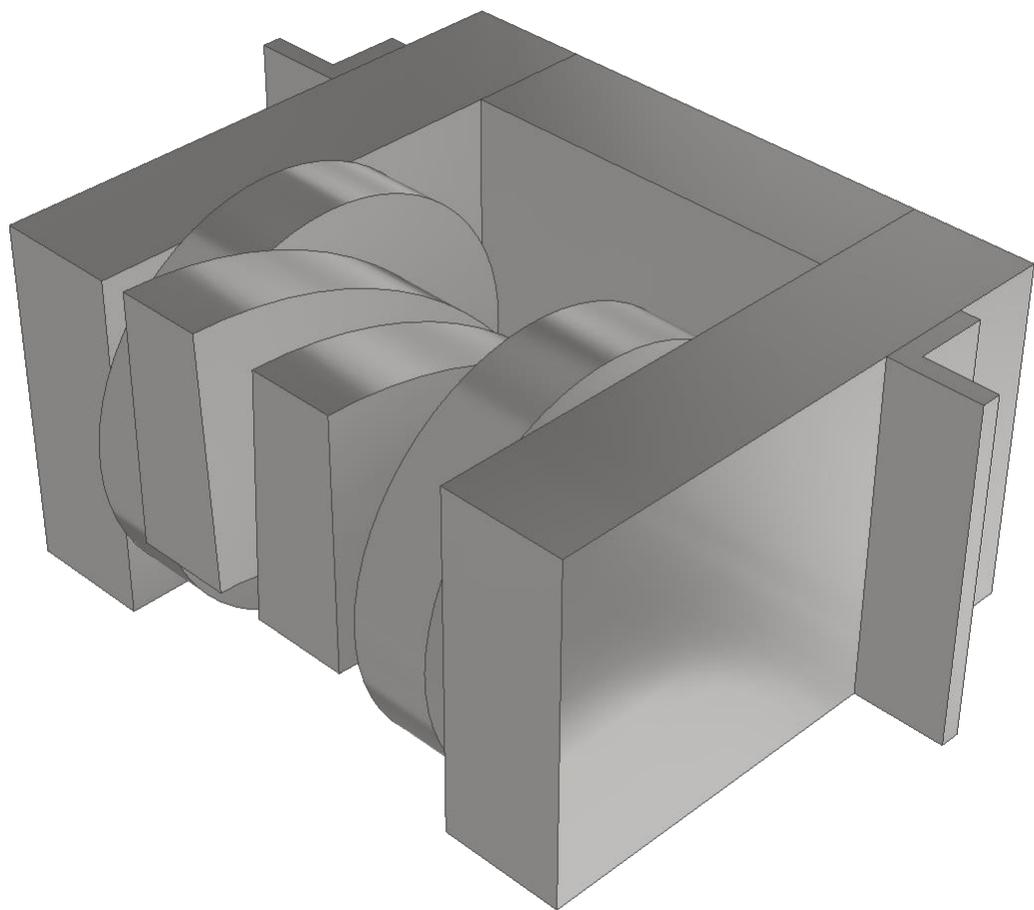
Электростатическое зеркало 5 кВ





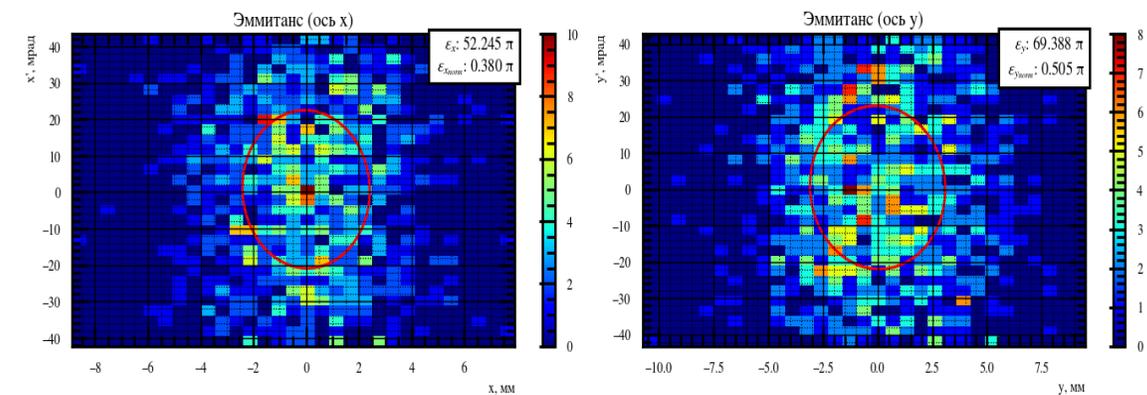
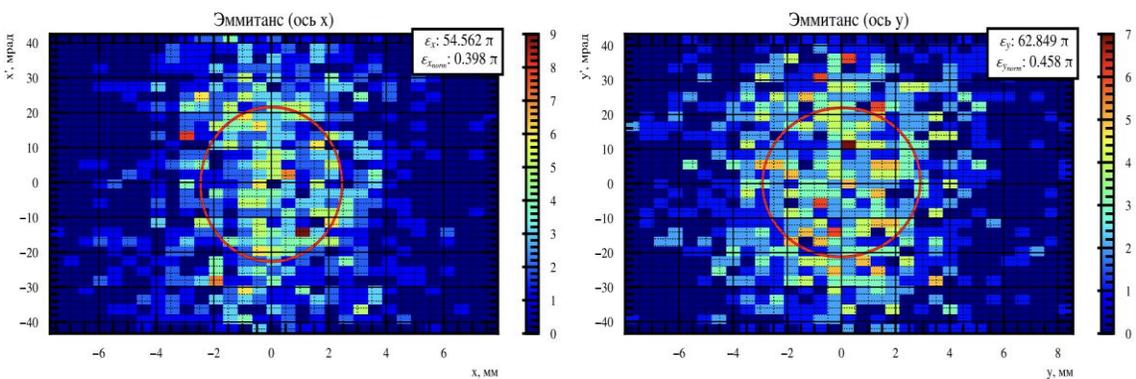
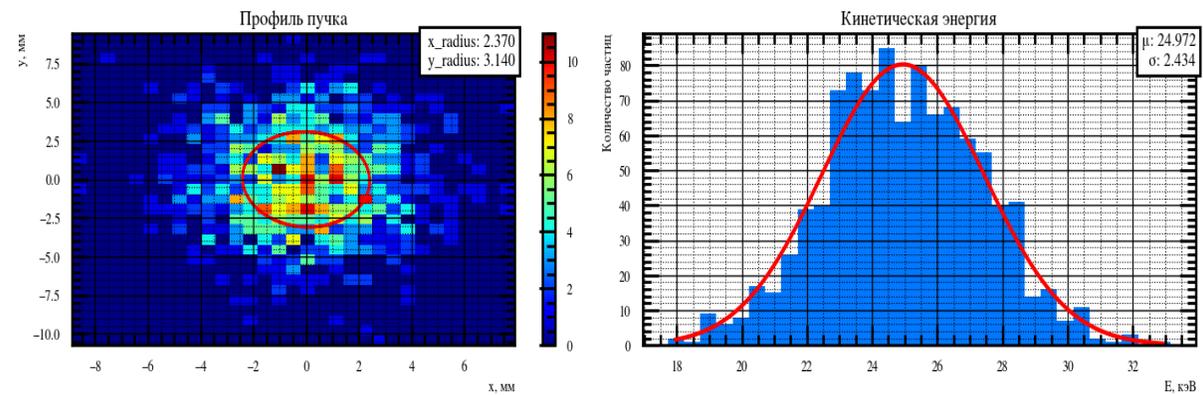
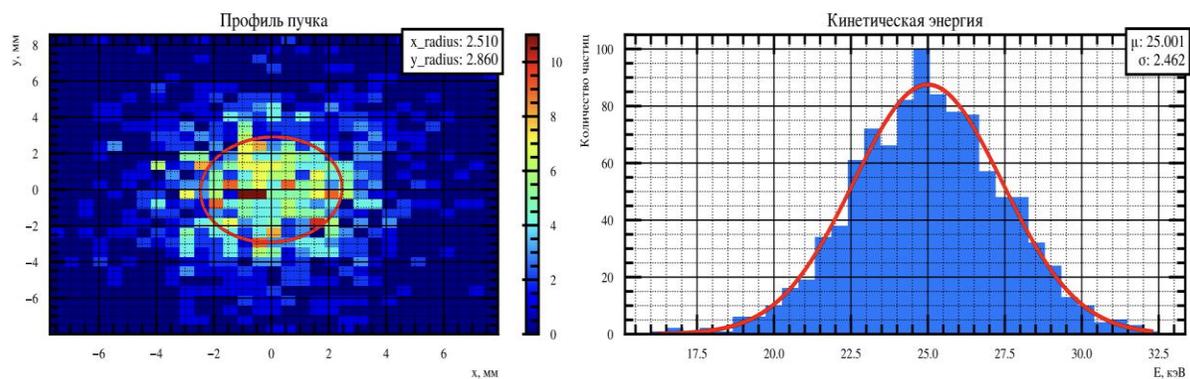
Электростатическое зеркало 5 кВ





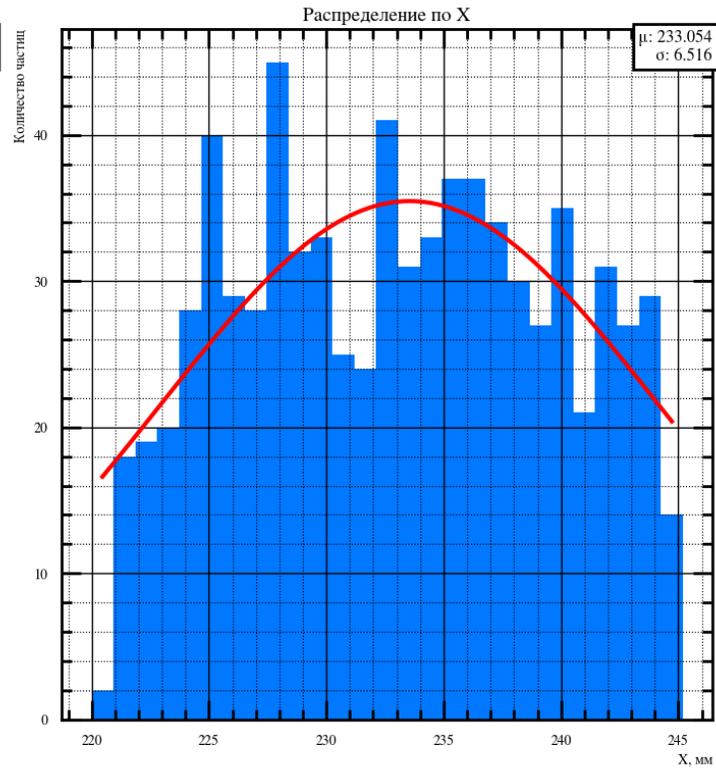
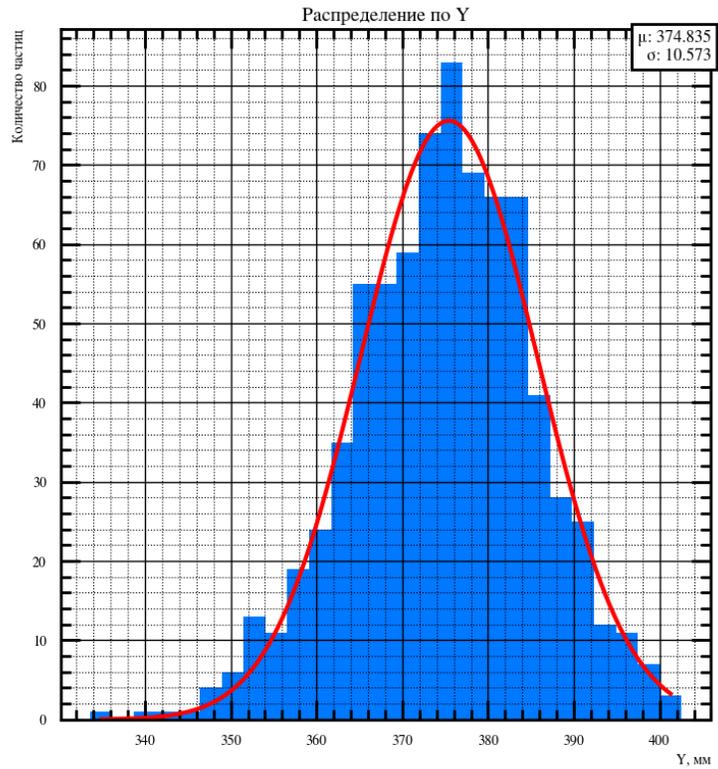


Начальные параметры

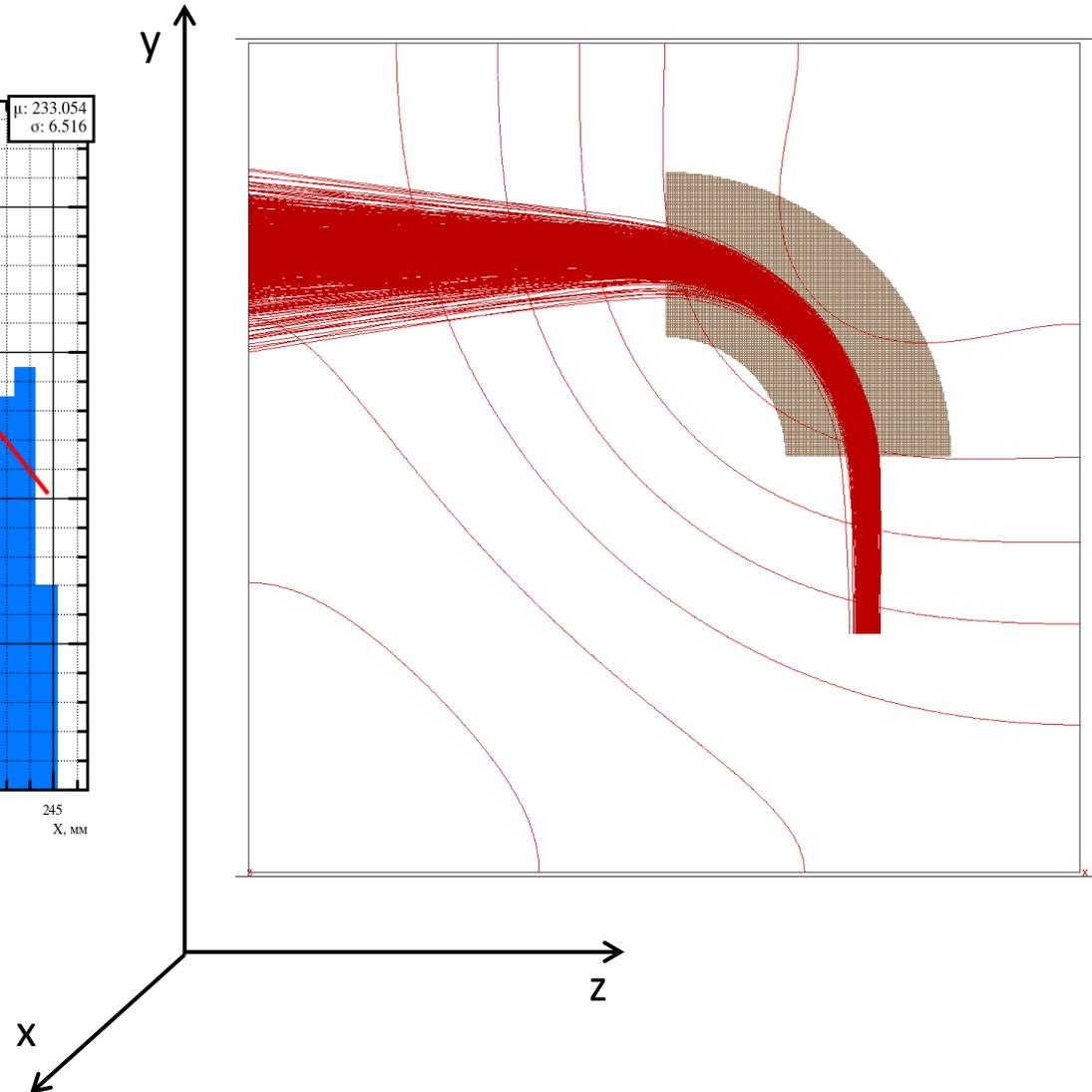


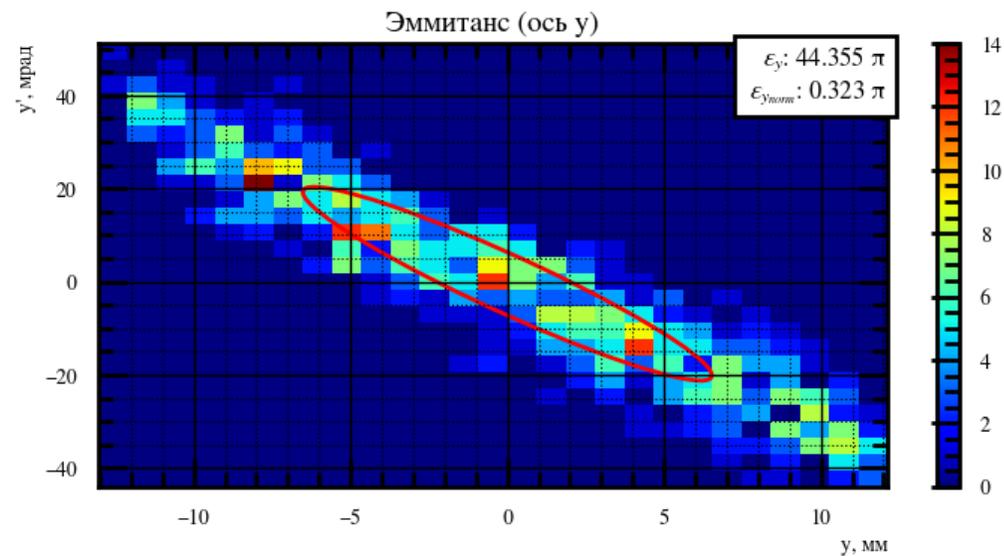
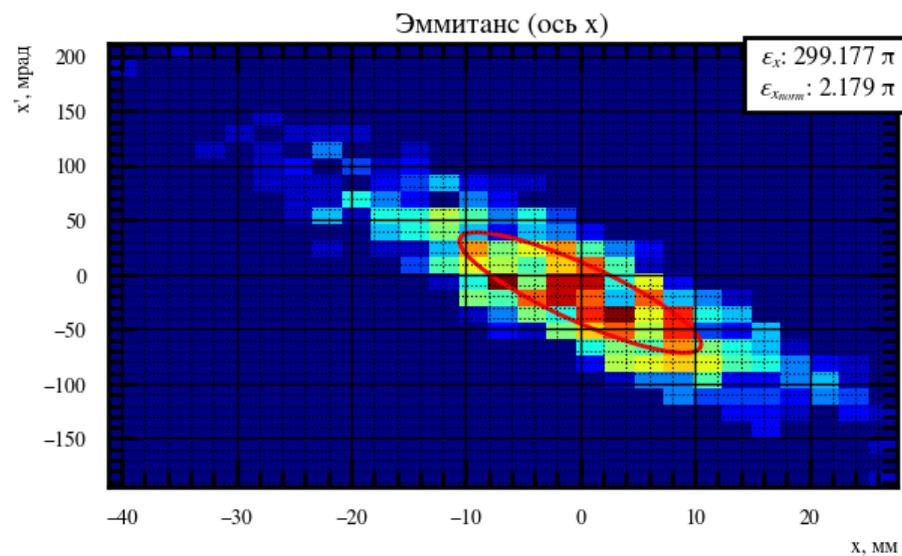
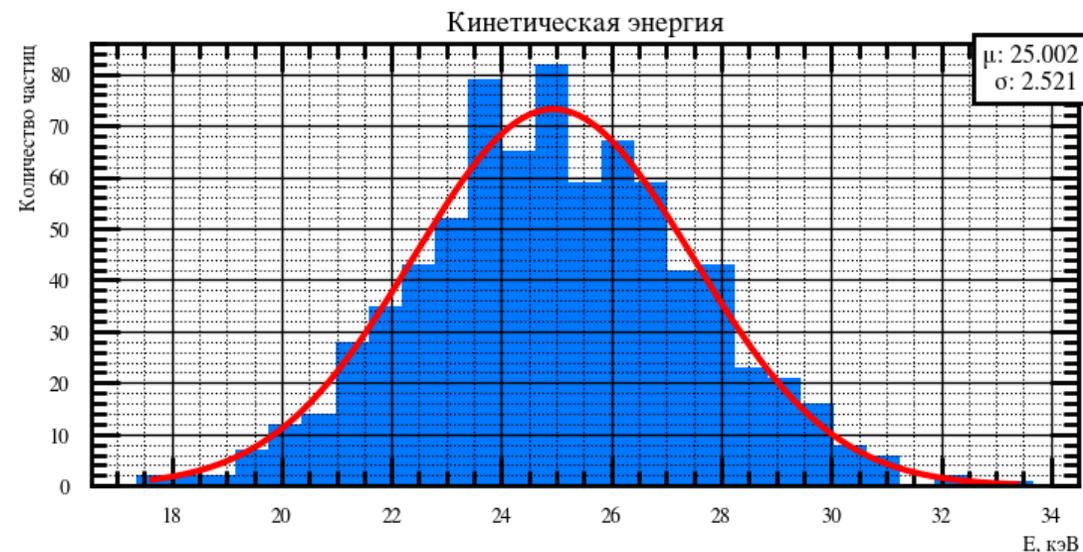
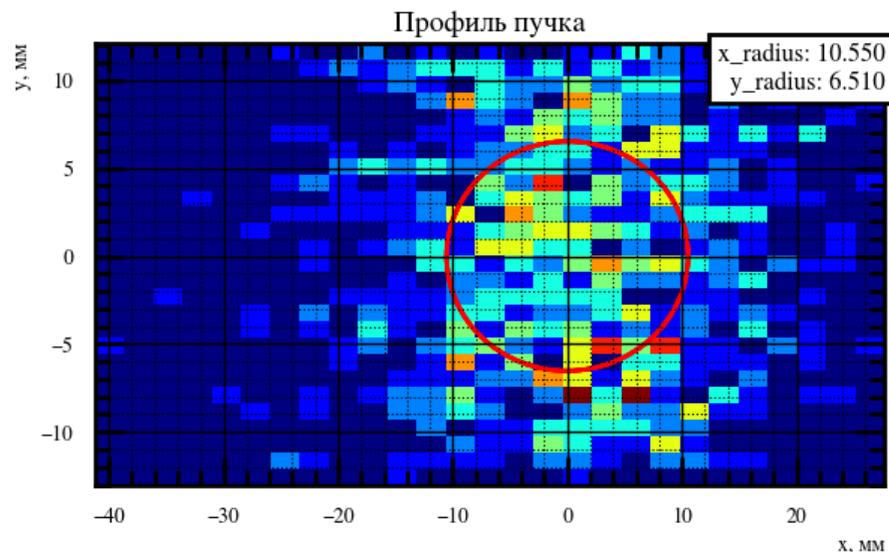
Протоны

Дейтроны



X = 233 мм
Y = 372.5 мм



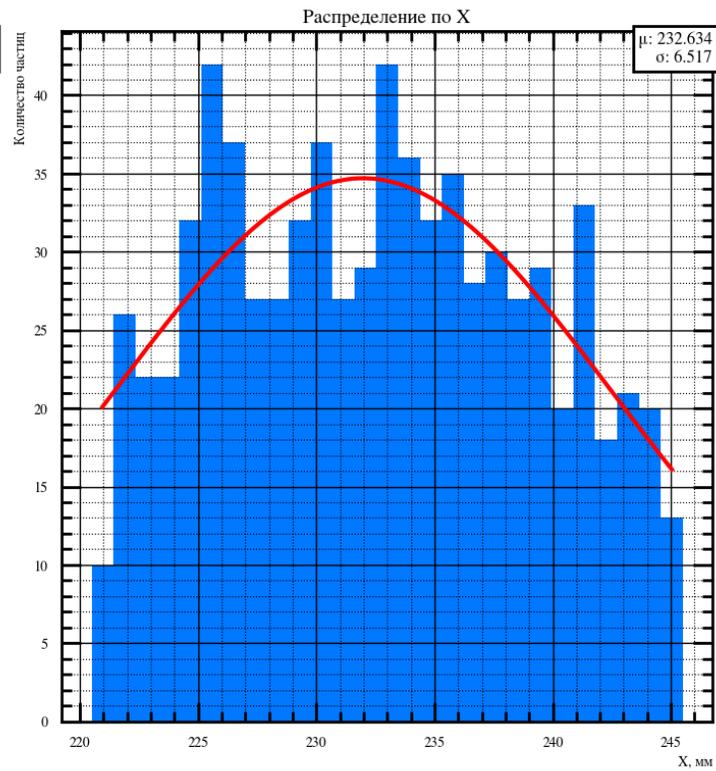
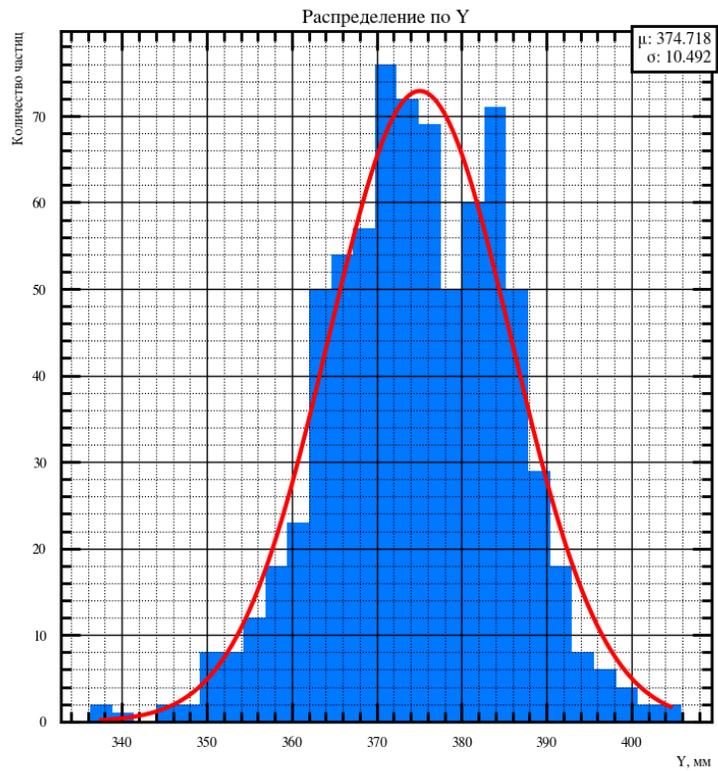




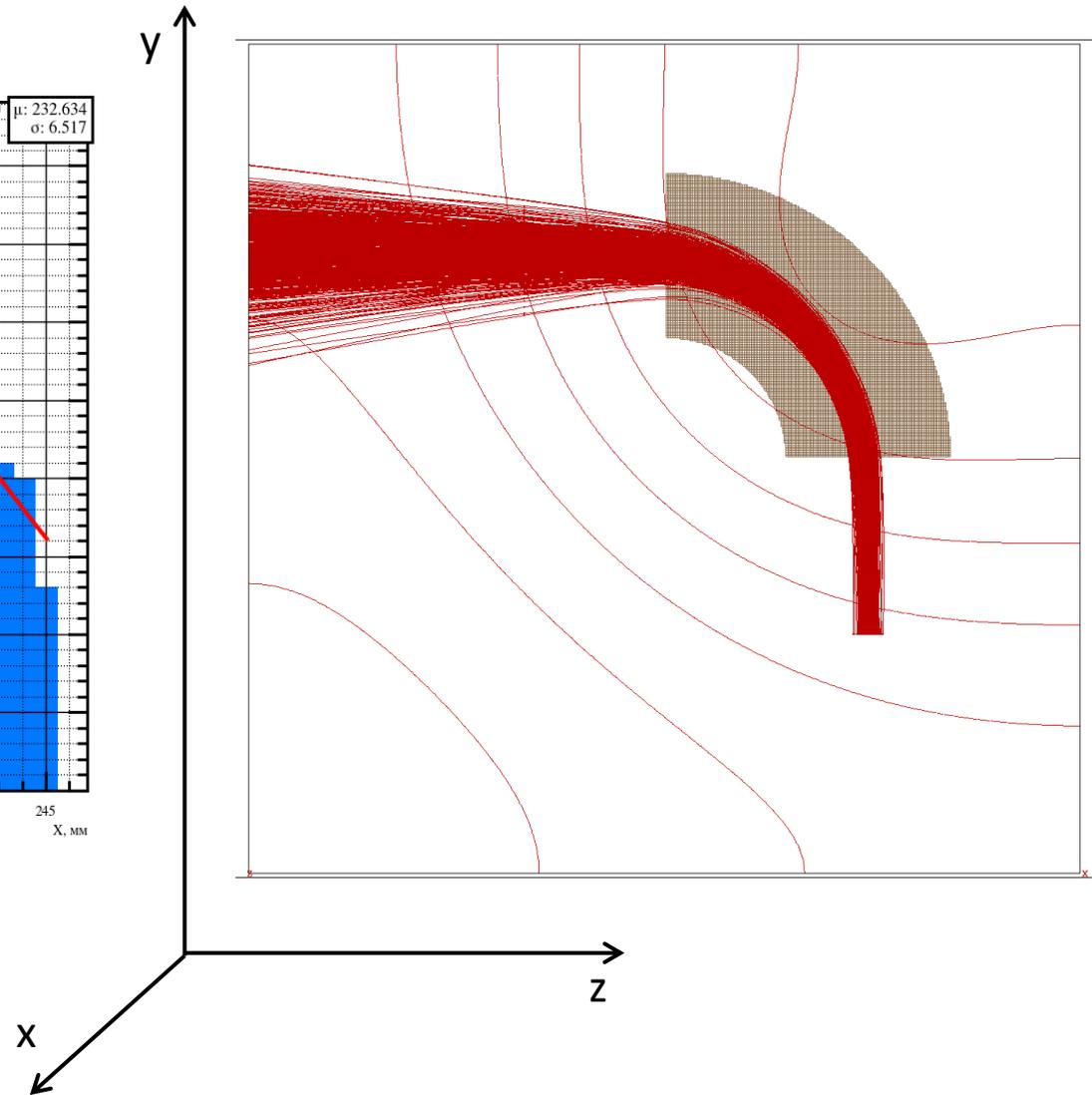
Поворотный магнит (результаты для р)



	Нач. параметры	250 Гс	275 Гс	300 Гс	325 Гс	350 Гс
х, мм	2.51	10.83	10.46	10.55	10.28	11.18
у, мм	2.86	6.76	6.45	6.51	6.58	6.00
ϵ_x , π мм * мрад	54.562	310.293	297.712	299.177	286.094	297.150
ϵ_y , π мм * мрад	62.849	44.635	44.238	44.355	45.815	46.339
ϵ_{n_x} , π мм * мрад	0.398	2.258	0.321	2.179	2.085	2.161
ϵ_{n_y} , π мм * мрад	0.458	0.325	1.046	0.323	0.344	0.337
Δу, мм	-	38.446	18.857	2.335	13.776	29.685

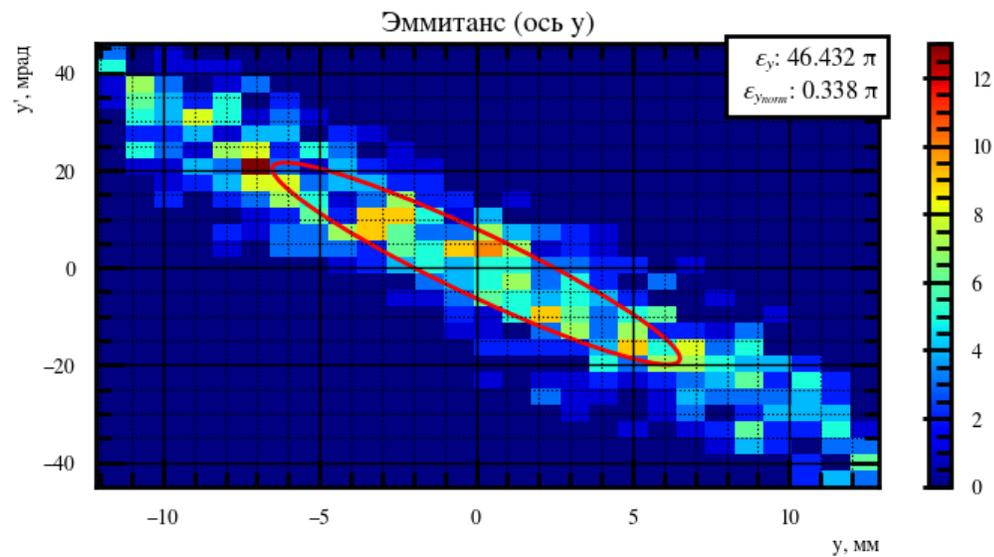
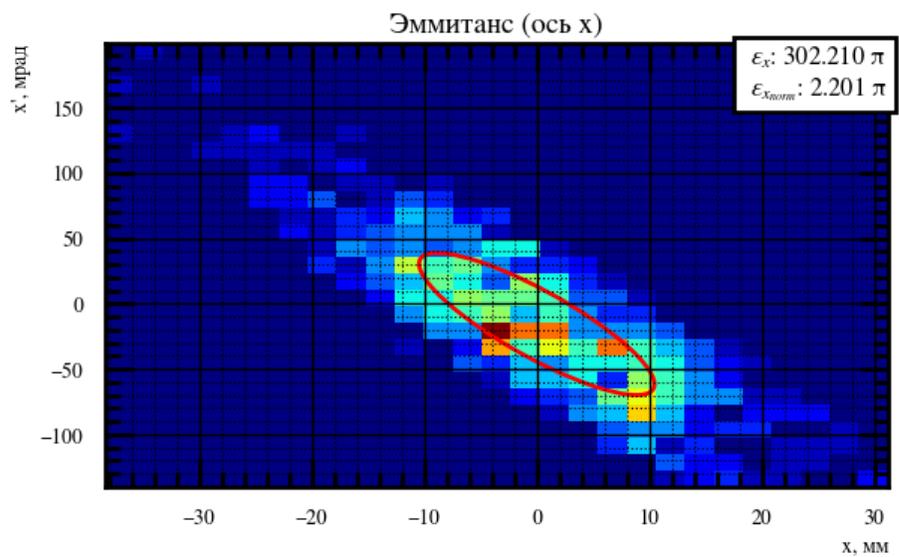
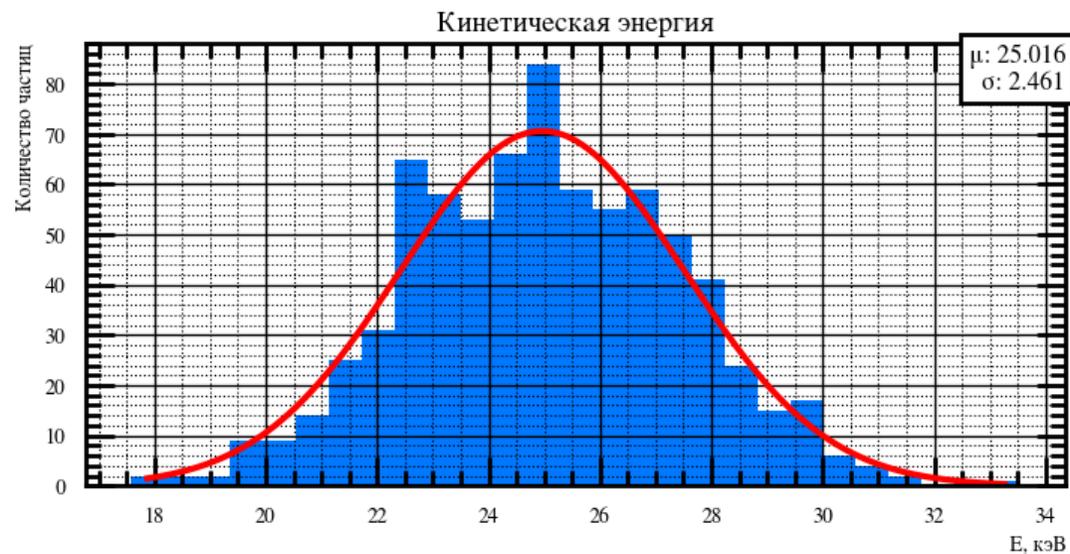
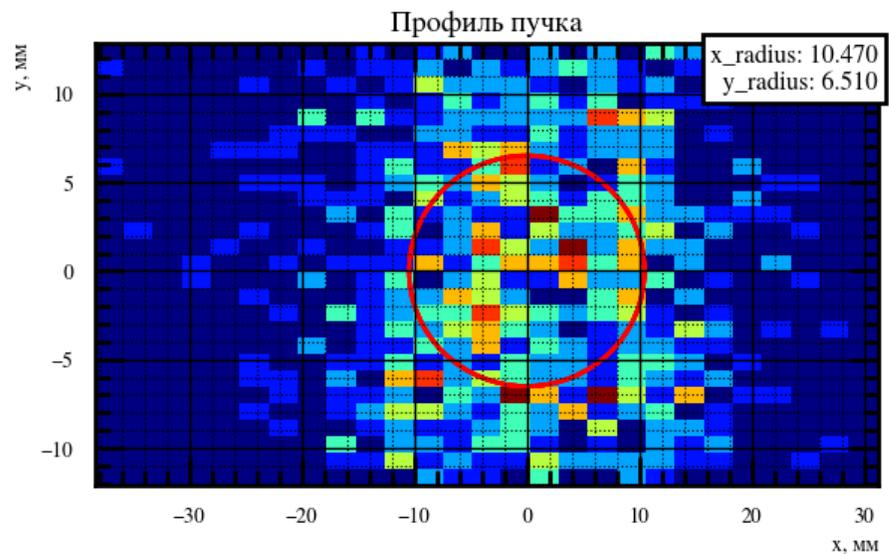


X = 233 мм
Y = 372.5 мм





300 Гаусс (d)





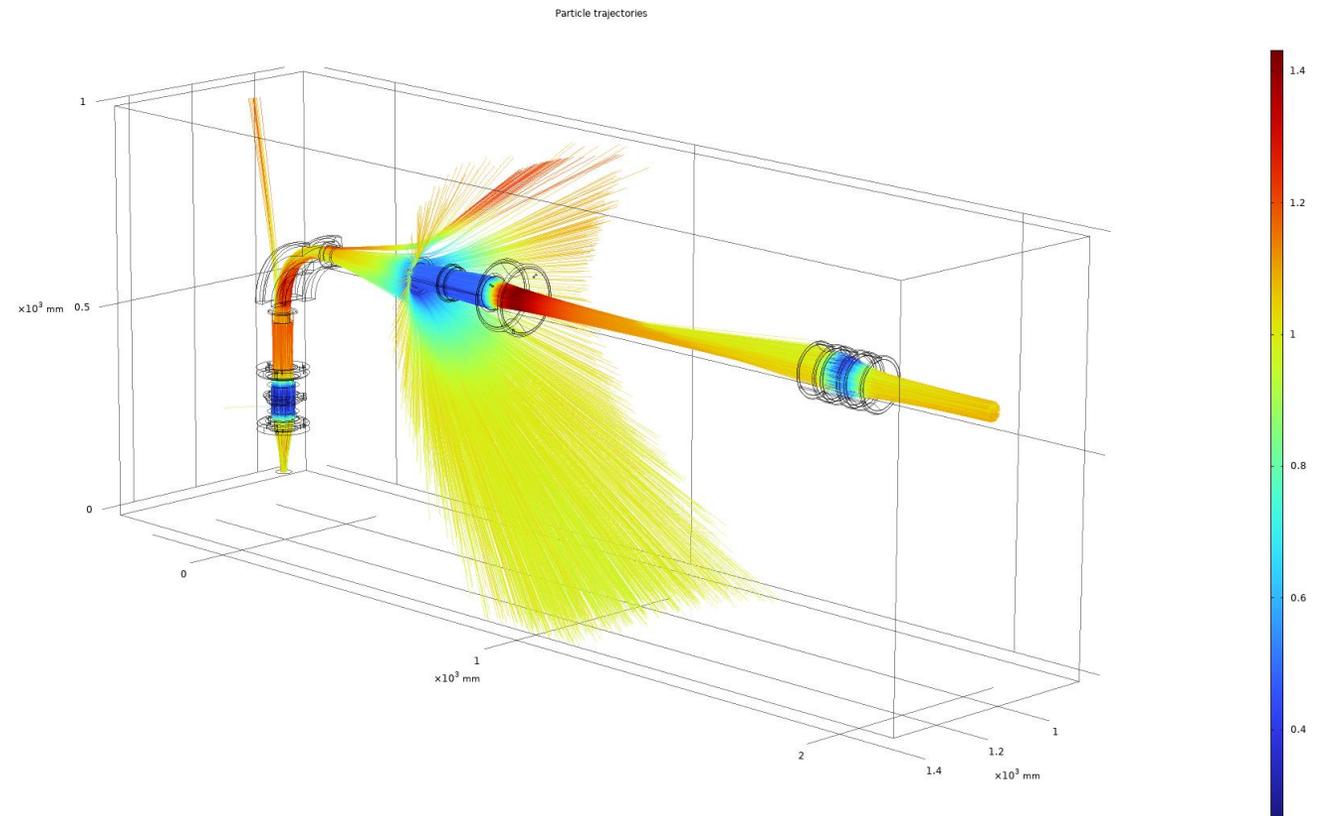
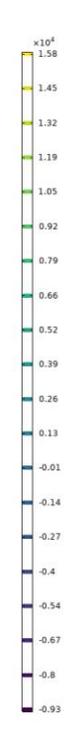
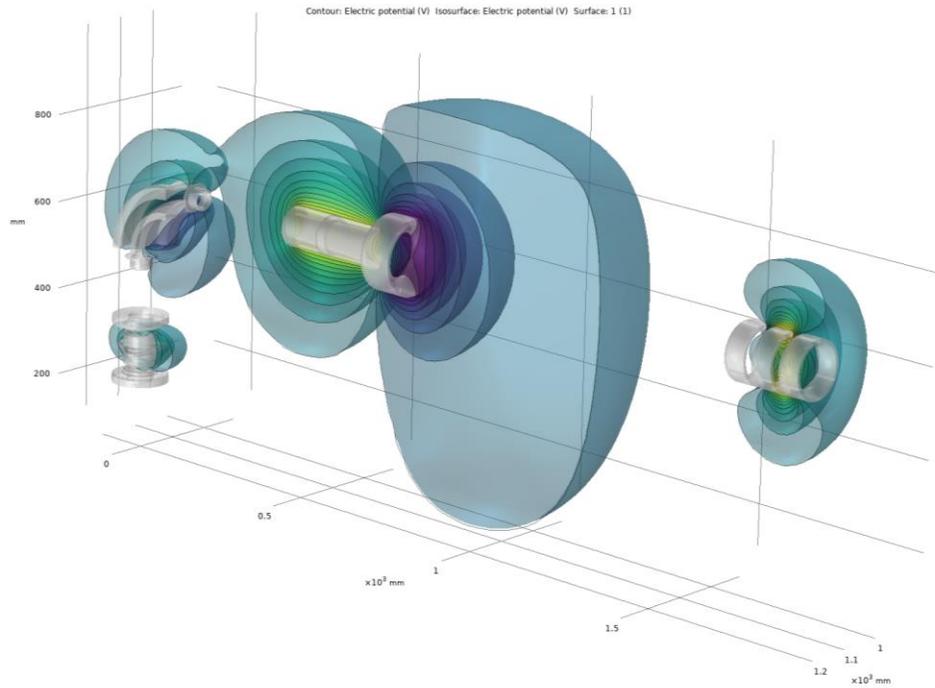
ПОВОРОТНЫЙ МАГНИТ (РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ d)

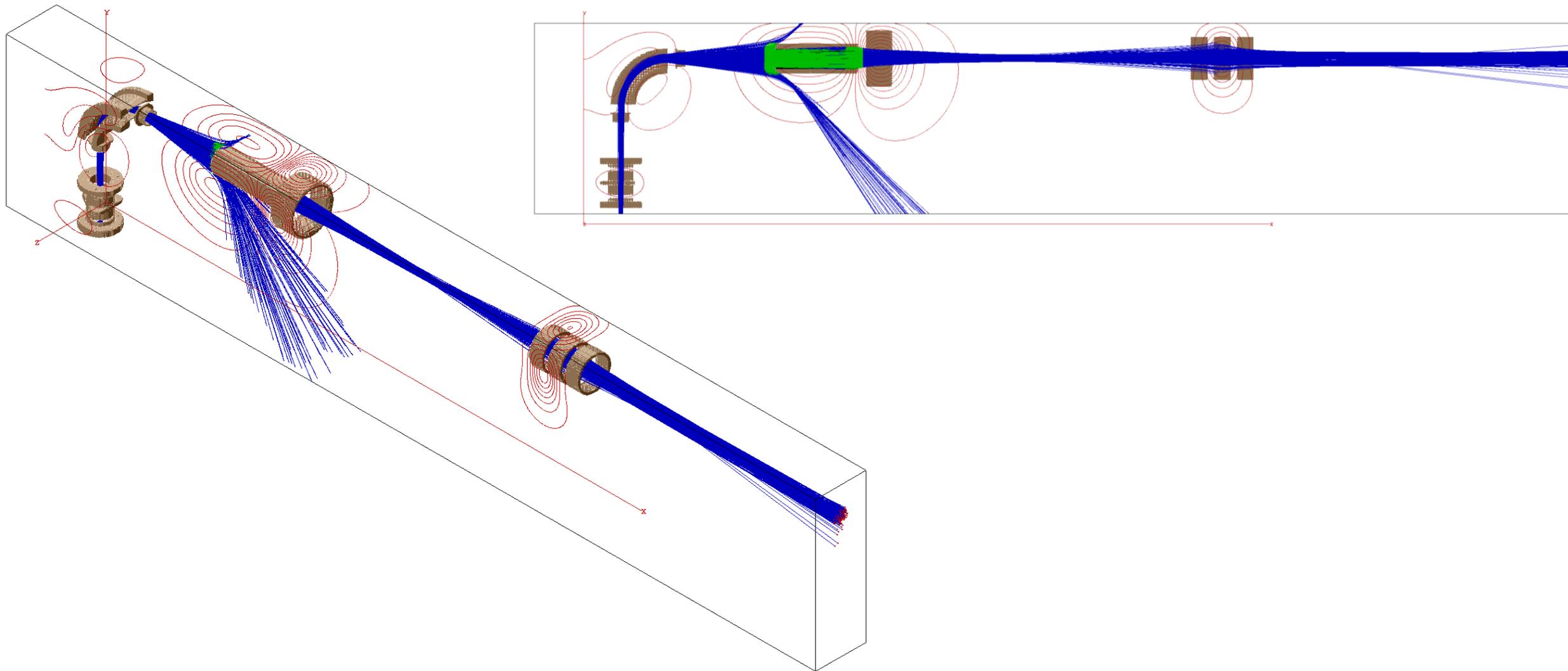


	Нач. параметры	250 Гс	275 Гс	300 Гс	325 Гс	350 Гс
x, мм	2.37	10.510	10.01	10.470	10.28	11.22
y, мм	3.140	6.740	6.76	6.510	6.58	6.15
ϵ_x , π мм * мрад	52.245	294.993	294.49	302.210	286.094	303.163
ϵ_y , π мм * мрад	69.388	48.399	46.726	46.432	45.815	46.944
ϵ_{n_x} , π мм * мрад	0.38	2.145	2.139	2.201	2.085	2.203
ϵ_{n_y} , π мм * мрад	0.505	0.352	0.339	0.338	0.334	0.341
Δy , мм	-	38.34	19.332	2.218	14.845	29.947



- ✓ **Разработка принципиальной схемы работы системы транспортировки ионного пучка. Моделирование устройств, входящих в состав системы диагностики, транспортировки и фокусировки ионного пучка (электростатические одиночные линзы, линзы Эйнзеля, соленоид)**
- ✓ **Моделирование устройств, входящих в состав системы транспортировки и фокусировки ионного пучка (сферическое зеркало, поворотный магнит). Отладка модели системы транспортировки и фокусировки ионного пучка.**
- **Сопряжение смоделированных устройств и создание общей модели системы. Поиск оптимальных параметров и режимов работы модели. Анализ полученных результатов.**
- **Проектирование системы транспортировки и фокусировки ионного пучка на основании результатов моделирования.**







- Сопряжение смоделированных устройств и создание общей модели системы.**
- Поиск оптимальных параметров и режимов работы модели.**
- Учет влияния объемного заряда.**
- Анализ полученных результатов.**
- Проектирование системы транспортировки и фокусировки ионного пучка на основании результатов моделирования.**



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова



Спасибо за внимание!