

**Ишханов Б.С., Посеряев А.В., Шведунов В.И.**

**ДИНАМИКА ПУЧКА В СИЛЬНОТОЧНОМ  
ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2004 – 6/745

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

**Ишханов Б.С., Посеряев А.В., Шведунов В.И.**

**ДИНАМИКА ПУЧКА В СИЛЬНОТОЧНОМ  
ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2004 – 6/745

УДК 539.124.162.5:539.1.076  
ББК 22.382  
И97

**B.S.Ishkhanov, A.V.Poseryaev, V.I.Shvedunov**  
E-mail address: [poseryaev@nm.ru](mailto:poseryaev@nm.ru)

## **BEAM DYNAMICS IN HIGH-CURRENT ELECTRON LINEAR ACCELERATOR**

Preprint INP MSU – 2004 – 6/745

### Abstract

We have studied beam dynamics in a high-current electron linear accelerator for beam energy 10 MeV. The optimal parameters of accelerating cells and electron gun have been received. On the basis of these results we have formulated the basic requirements for the stability of microwave system parameters and electron gun anode voltages. The efficiency of additional transversal beam focusing by a solenoidal magnetic field and variation of accelerated particles energy have been analyzed.

**Ишханов Б.С., Посеряев А.В., Шведунов В.И.**

## **ДИНАМИКА ПУЧКА В СИЛЬНОТОЧНОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2004 – 6/745

### Аннотация

В работе исследована динамика пучка в сильноточном линейном ускорителе электронов на энергию 10 МэВ. Получены оптимальные характеристики ускоряющих ячеек и электронной пушки. На основании проведённых исследований сформулированы основные требования к устойчивости параметров СВЧ системы и напряжений на анодах электронной пушки. Изучены эффективность дополнительной поперечной фокусировки пучка соленоидальным магнитным полем и возможность вариации энергии ускоренных частиц.

© Ишханов Б.С., Посеряев А.В., Шведунов В.И., 2004  
© НИИЯФ МГУ, 2004 <http://www.sinp.msu.ru>

## Оглавление.

<i>Введение.</i> . . . . .	4
<i>§1. Предварительная оценка длин ускоряющих ячеек и соответствующих им амплитуд продольного электрического поля.</i> . . . . .	5
<i>§2. Определение оптимальных параметров инжектируемого пучка и формулировка основных требований, предъявляемых к электронной пушке.</i> . . . . .	7
<i>§3. Изучение динамики пучка электронов с расчётными полями ускоряющих ячеек.</i> . . . . .	8
<i>§4. Изучение динамики расчётного пучка электронов.</i> . . . . .	10
<i>§5. Дополнительная поперечная фокусировка пучка соленоидальным магнитным полем.</i> . . . . .	14
<i>§6. Возможность вариации энергии ускоренного пучка электронов путём изменения общего уровня СВЧ поля.</i> . . . . .	17
<i>§7. Выводы.</i> . . . . .	19
<i>Список литературы.</i> . . . . .	20

## ***Введение .***

В последние десятилетия ускорительная техника, помимо научно-исследовательской области, нашла широкое применение в области промышленных технологий и в медицине. Возрастающая с каждым днём сложность решаемых задач предъявляет всё более жёсткие требования к параметрам ускорителей и пучков заряженных частиц. Немаловажную роль при этом играют проблемы компактности установок, их высокой эффективности и большой средней мощности.

В настоящей работе исследована возможность создания малогабаритного сильноточного линейного ускорителя электронов на энергию 10 МэВ с высокой средней мощностью пучка. Наиболее эффективным представляется использование подобных ускорителей для стерилизации продуктов питания и изменения свойств различного рода материалов.

## **§1. Предварительная оценка длин ускоряющих ячеек и соответствующих им амплитуд продольного электрического поля.**

Предварительная оценка длин ускоряющих ячеек и соответствующих им амплитуд продольного электрического поля производилась исходя из следующих основных проектных требований:

1. Номинальная энергия ускоренного пучка электронов - 10 МэВ.
2. Ширина энергетического спектра ускоренного пучка электронов на половине высоты - 0.5 МэВ.
3. Фазовая ширина сгустков ускоренного пучка электронов -  $20 \div 25^\circ$ .
4. Частота СВЧ поля - 2856 МГц.
5. Длина ускоряющей структуры - 1.25 м.
6. Энергия инжекции – 50 КэВ.
7. Импульсный ток ускоренного пучка электронов – 430 мА.
8. Согласованность поперечных размеров пучка электронов с апертурой ускоряющей структуры.
9. Обеспечение максимально возможного коэффициента захвата.

Для выбора вышеуказанных параметров ускоряющей структуры была использована программа PARMELA, позволяющая производить расчёты динамики пучка в линейных ускорителях электронов. При моделировании электромагнитных полей ускоряющих ячеек использовались стандартные поля, заложенные в программе. Из величины проектной длины ускорителя и частоты СВЧ поля следует, что для набора пучком энергии 10 МэВ, структура должна состоять из 24 ускоряющих ячеек. С практической и теоретической точек зрения оказалось удобным разделить ускоряющую структуру на две части: нерегулярную, состоящую из 3-х различных ускоряющих ячеек, и регулярную, в состав которой входят 21 идентичные между собой ячейки. Основными функциями нерегулярной части являются продольная группировка инжектируемого пучка, его поперечная фокусировка и ускорение до скорости близкой к скорости света. Регулярная часть производит дальнейшее ускорение электронного пучка до номинального значения энергии.

Выбор длин и амплитуд ускоряющего СВЧ поля ячеек нерегулярной части производился из следующих основных соображений:

- Первая ячейка должна обеспечивать модуляцию электронов инжектируемого пучка по скорости и их частичную продольную группировку.
- Во второй ячейке должны производиться окончательная группировка и захват сгруппированного пучка в процесс ускорения с целью получения необходимого энергетического спектра на выходе структуры и требуемой фазовой ширины сгустков.
- Значение фазы входа пучка в регулярную часть должно обеспечивать дальнейшее ускорение электронов до номинальной энергии.

В результате, были определены оптимальные значения параметров ускоряющих ячеек структуры, которые представлены в таблице 1, где  $N_j$  - номер ячейки,  $L_j$  - её длина,  $E_z$  – среднее значение амплитуды ускоряющего поля на оси ячейки.

Таблица 1. Значения основных параметров ускоряющих ячеек.

№	L, см	$E_z$ , МВ/м
1	3.9	1.85
2	2.7	11.5
3	4.2	11.5
4÷24	5.25	11.5

Полученные при этом основные параметры ускоренного пучка электронов представлены в таблице 2, в которой  $E$  – среднее значение энергии пучка,  $\Delta\varphi$  – фазовая ширина сгустков,  $\Delta E$  – энергетическая ширина,  $K_3$  – коэффициент захвата, определяемый как отношение количества ускоренных частиц в диапазонах  $\Delta\varphi$  и  $\Delta E$  к полному количеству частиц на входе в ускоряющую структуру, а  $\langle r \rangle$ ,  $\langle D \rangle$ ,  $\langle \varepsilon_N \rangle$  – среднеквадратичные значения радиуса пучка, расходимости и нормализованного эмиттанса соответственно.

Таблица 2. Основные параметры ускоренного пучка электронов.

$E$ , МэВ	$\Delta\varphi$ , град.	$\Delta E$ , МэВ	$K_3$ , %	$\langle r \rangle$ , мм	$\langle D \rangle$ , мрад	$\langle \varepsilon_N \rangle$ , мм·мрад
10.35	20	0.35	64.5	1.83	1.11	10.5

Следует отметить, что в качестве параметров Твисса для входного пучка использовались  $\alpha=1.8$ ,  $\beta=8$  см/рад при величине ненормализованного эмиттанса  $\varepsilon=44$  мм·мрад (при этом значение нормализованного эмиттанса равно  $\varepsilon_N = \varepsilon\gamma\beta = 20$  мм·мрад, где  $\gamma$  – релятивистский фактор,  $\beta$  – отношение скорости частицы к скорости света). Величина эмиттанса во многом определяется характеристиками катода электронной пушки, которые достаточно хорошо известны. Параметры же  $\alpha$  и  $\beta$  подбирались таким образом, чтобы обеспечивалось согласование поперечных размеров ускоряемого сгустка частиц с апертурой структуры, а вариации их значений в небольших пределах не приводили к существенным изменениям основных характеристик ускоренного пучка. Импульсное значение тока инжектируемого пучка при расчётах динамики с учётом пространственного заряда выбиралось равным  $I_0=0.7$  А, что соответствует импульсному току ускоренного пучка  $I=0.45$  А.

Для определения требований к точности установки параметров ускорителя исследовалась устойчивость характеристик ускоренного пучка по отношению к небольшим изменениям энергии инжекции, тока пучка и общего уровня ускоряющего СВЧ поля в ячейках. При этом выяснилось, что

- Допустимые изменения энергии инжекции -  $\Delta E_0 = \pm 3$  кэВ.
- Допустимое значение импульсного тока пучка на входе в структуру -  $I_0=0.9$  А.
- Допустимые изменения общего уровня СВЧ поля -  $\pm 10\%$ ,  
при соответствующих изменениях энергии пучка в пределах - 9.095÷11.412 МэВ.

## §2. Определение оптимальных параметров инжектируемого пучка и формулировка основных требований, предъявляемых к электронной пушке.

Основными параметрами инжектируемого пучка электронов, которые могут существенно повлиять на его динамику в процессе ускорения и, таким образом, сыграть немаловажную роль в формировании характеристик ускоренного пучка, являются поперечный эмиттанс  $\varepsilon$  и параметры Твисса  $\alpha$  и  $\beta$ . Ранее отмечалось, что величина поперечного эмиттанса  $\varepsilon$ , используемая в расчётах составляет  $\varepsilon=44$  мм·мрад. Оптимизация же инжектируемого пучка электронов производилась путём подбора надлежащих значений параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . В таблице 3 приведены результаты соответствующих расчётов.

Таблица 3. Оптимальные значения параметров инжектируемого пучка электронов.

$\alpha$	$\beta$ , см/рад	$\varepsilon$ , мм·мрад
1.8	9	44

Анализ устойчивости выходных параметров показал, что вполне допустимы небольшие вариации в пределах  $\alpha=1.8\pm 0.4$  и  $\beta=9\pm 3$  см/рад. На рисунке 1 показаны поперечный и фазовый портреты пучка на входе в ускоряющую структуру при  $\alpha=1.8$  и  $\beta=9$  см/рад.

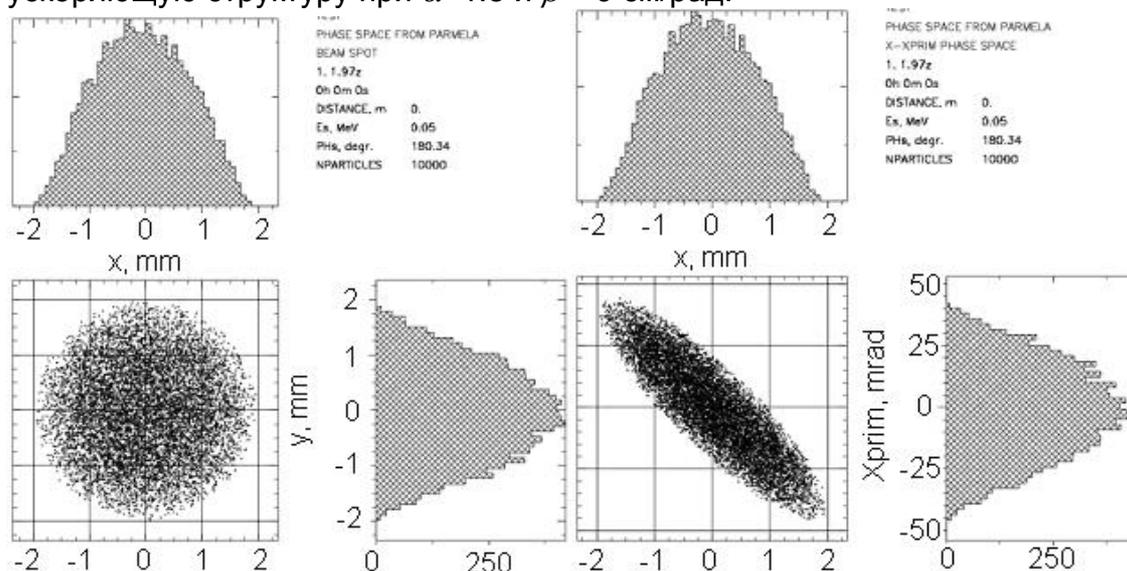


Рис. 1. Поперечный и фазовый портреты пучка электронов на входе в ускоряющую структуру.

Исходя из полученных данных, можно сформулировать основные требования, которых следует придерживаться при разработке электронной пушки.

- Расстояние от анода электронной пушки до кроссовера -  $z_{кр}=2.8$  см.
- Допустимые отклонения в положении кроссовера -  $\Delta z_{кр}=\pm 0.4$  см.
- Среднеквадратичный радиус пучка в кроссовере -  $\langle r_{кр} \rangle=0.56$  мм.
- Допустимые отклонения от  $\langle r_{кр} \rangle$ -  $\Delta \langle r_{кр} \rangle=\pm 0.11$  мм.
- Необходимое максимально достижимое значение импульсного тока инжектируемого пучка -  $I_0=0.8$  А.

### §3. Изучение динамики пучка электронов с расчётными полями ускоряющих ячеек.

По определённым ранее (см. §1) оптимальным значениям длин ускоряющих ячеек и амплитуд СВЧ поля были произведены расчёты геометрии реальных ячеек. С использованием программы Superfish были получены распределения электромагнитных полей в этих ячейках. На рисунке 2 приведена зависимость амплитуд продольного ускоряющего поля  $E_z$  на оси структуры для расчётной геометрии ячеек в сравнении со стандартными полями программы PARMELA от продольной координаты  $z$ .

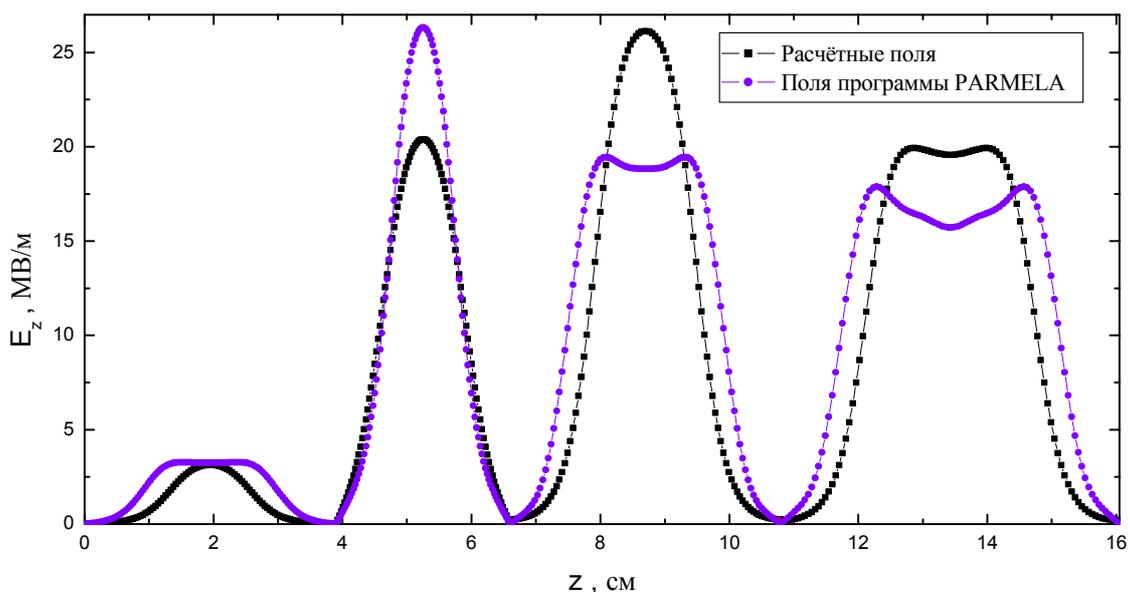


Рис. 2. Распределение амплитуд продольных электрических полей для расчётной геометрии ускоряющих ячеек в сравнении со стандартными полями программы PARMELA.

Амплитуды продольных электрических полей реальных ячеек имеют более выраженный максимум и узкую локализацию, чем стандартные поля программы PARMELA. По этой причине фактор пролётного времени в случае с полями реальных ячеек оказывается несколько большим. Это обуславливает, в свою очередь, несколько больший прирост энергии на длине структуры с выбранными средними значениями амплитуд продольных электрических полей и небольшую перегруппировку пучка на выходе первой ячейки. Поэтому при расчётах динамики пучка общий уровень поля выбирался таким образом, чтобы обеспечить необходимый

Таблица 4. Значения основных параметров ускоряющих ячеек при расчётах динамики пучка для реальных распределений полей.

№	$L$ , см	$E_z$ , МВ/м
1	3.9	1.15
2	2.7	10.5
3	4.2	10.5
4÷24	5.25	10.5

прирост энергии на длине структуры. При этом, среднее значение амплитуды ускоряющего поля первой ячейки пришлось несколько уменьшить по отношению к полям других ячеек для достижения оптимальной группировки пучка. Итоговые значения параметров ускоряющих ячеек и пучка электронов на выходе ускорителя приведены в таблицах 4 и 5 соответственно.

Таблица 5. Основные параметры ускоренного пучка электронов.

$E$ , МэВ	$\Delta\varphi$ , град.	$\Delta E$ , МэВ	$K_3$ , %	$\langle r \rangle$ , мм	$\langle D \rangle$ , мрад	$\langle \varepsilon_N \rangle$ , мм·мрад
10.11	20	0.35	60	1.80	0.863	8.6

Таким образом, коэффициент захвата при расчётах динамики пучка с реальными полями получился на 5% меньше, чем в случае с модельными полями, заложенными в программу PARMELA. Остальные же характеристики ускоренного пучка достаточно близки к тем, которые были получены ранее (см. табл. 2).

Дальнейший анализ свойств ускоряющей структуры с реальной геометрией ячеек, заключающийся в исследовании устойчивости характеристик ускоренного пучка по отношению к небольшим изменениям энергии инжекции, тока пучка и общего уровня ускоряющего СВЧ поля, показал, что

- Допустимые изменения энергии инжекции -  $\Delta E_0 = \pm 2$  кэВ.
- Допустимое значение импульсного тока пучка на входе в структуру -  $I_0 = 0.9$  А.
- Допустимые изменения общего уровня СВЧ поля -  $\pm 5\%$ ,  
при соответствующих изменениях среднего значения энергии ускоренного пучка в пределах  $9.4827 \div 10.679$  МэВ.

Возможности программы Superfish позволили определить СВЧ мощность, теряемую в стенках ускоряющей структуры, добротности и шунтовые сопротивления ускоряющих ячеек. Результаты соответствующих расчётов приведены в таблице 6.

Таблица 6. Потери СВЧ мощности в стенках ускоряющей структуры.

№ ячейки	$P_{свч}$ , кВт	$P_{свч,0}$ , кВт	Q	Z, МОм/м	$Z \cdot T^2$ , МОм/м
1	0.88483	0.66906	10222.49	58.291	52.200
2	122.64	1.11239	6725.15	24.272	22.157
3	68.354	0.62	11192.07	67.742	54.696
4÷24	61.818	0.5607	14040.24	93.633	69.598
$\Sigma$	1490.0568				

Здесь  $P_{свч}$  – мощность СВЧ потерь в ячейках структуры для выбранных оптимальных средних значений амплитуды продольного ускоряющего поля  $E_z$  (см. табл. 4),  $P_{свч,0}$  – мощность СВЧ потерь при  $E_z = 1$  МВ/м, Q, Z и  $Z \cdot T^2$  – добротность и шунтовые сопротивления ускоряющих ячеек соответственно. Таким образом, полная импульсная мощность СВЧ потерь в ускоряющей структуре составляет около 1.5 МВт.

#### §4. Изучение динамики расчётного пучка электронов.

В соответствии с определёнными ранее (см. §2) требованиями к инжектируемому пучку электронов была рассмотрена электронная пушка, геометрия которой при напряжениях  $U_1 = 50$  кВ на первом аноде и  $U_2 = 12.9$  кВ на втором аноде позволяет получить импульсное значение силы тока  $I = 0.8$  А с микропервеансом  $P_\mu = 0.072$  мкА/В<sup>3/2</sup>. Расчёт параметров пучка на выходе пушки производился с помощью программы EGUN. На рисунке 3 приведена динамика электронного пучка в пушке.

На основании полученных характеристик был создан входной файл для программы PARMELA. Это позволило исследовать динамику пучка электронной пушки в ускоряющей структуре. Предполагается, что конструктивно первым анодом будет служить начальная часть первой ячейки. Поэтому параметры пучка в сечении  $Z = 29$  мм электронной пушки являются входными для ускоряющей структуры. По эквипотенциальным линиям, изображённым на рисунке 4, нетрудно заметить, что существует небольшое провисание потенциала вблизи оси симметрии в области первого анода, которое приводит к отклонению энергии инжекции от проектного значения в сечении  $Z = 29$  мм ( $E_{Z=29} = 39$  кэВ).

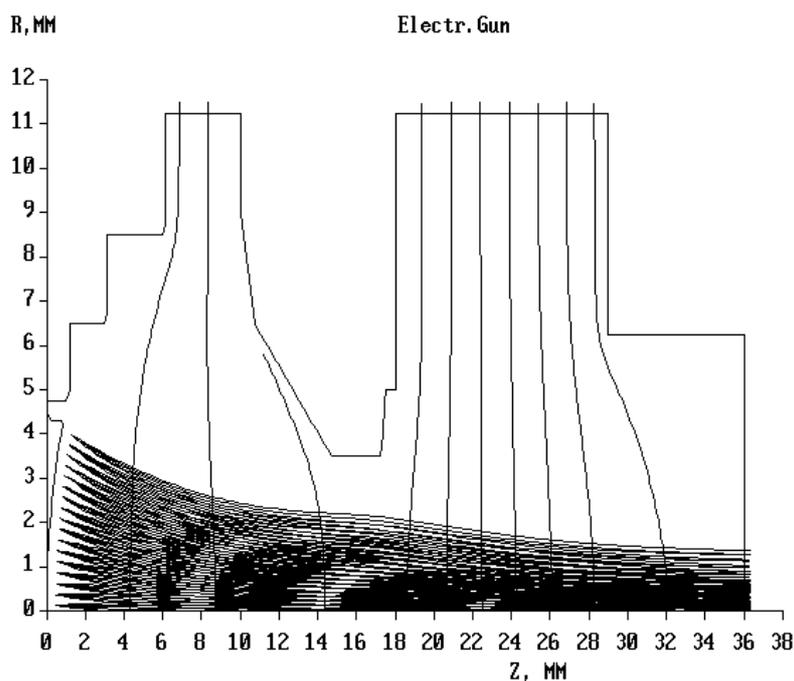


Рис 3. Динамика пучка электронов в электронной пушке.

По этой причине для получения входного файла к программе PARMELA использовалось сечение  $Z = 36$  мм, в котором энергия пучка электронов  $E_{Z=36} = 49$  кэВ. При этом амплитуда СВЧ полей в первой ускоряющей

ячейке на расстоянии 7 мм от её начала (что соответствует  $Z = 36$  мм) достаточно мала, поэтому оказалось возможным исследование динамики пучка в ускоряющей структуре с укороченной на 7 мм первой ячейкой без существенного искажения реальной картины.

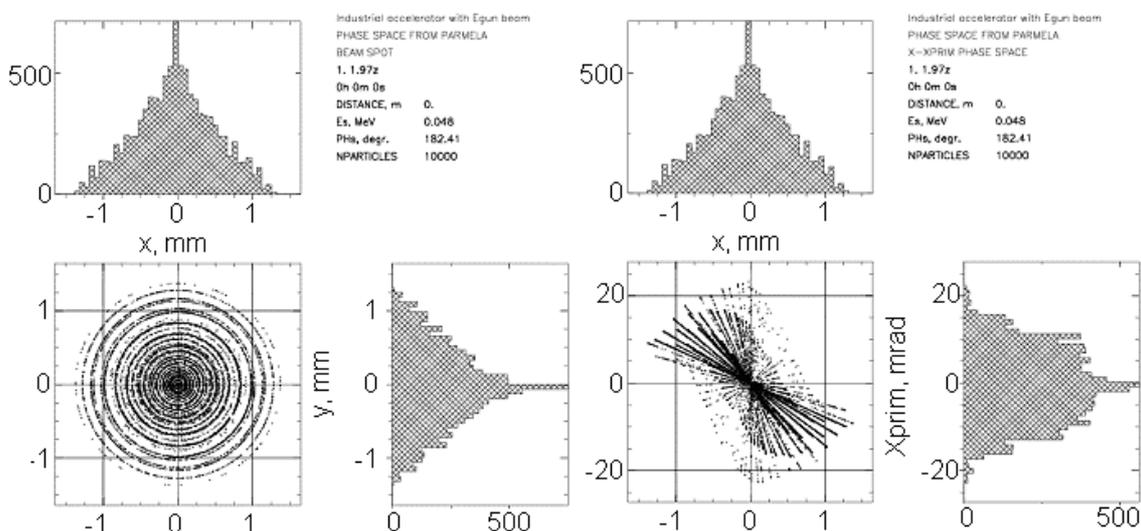


Рис. 4. Поперечный и фазовый портреты пучка электронов на входе в первую ячейку ( $Z = 36$  мм).

На рисунках 4, 5 и 6 изображены поперечные, фазовые и энергетические портреты на входах в первую и вторую ячейку и выходе ускоряющей структуры соответственно. Основные параметры ускоренного пучка представлены в таблице 7.

Таблица 7. Основные параметры ускоренного пучка электронов.

$E$ , МэВ	$\Delta\varphi$ , град.	$\Delta E$ , МэВ	$K_3$ , %	$\langle r \rangle$ , мм	$\langle D \rangle$ , мрад	$\langle \varepsilon_N \rangle$ , мм·мрад
9.914	25	0.6	60	1.868	1.205	32.5

Таким образом, большинство характеристик пучка достаточно близки к проектным. По рис. 6 видно, что поперечные размеры пучка на выходе ускорителя близки к размерам апертуры вакуумной камеры. Тем не менее, в области  $r = 5 \div 6$  мм находится лишь 1% от общего числа ускоренных частиц. В таблице 8 показана расчётная мощность, выделяемая в ячейках ускоряющей структуры за счёт потерь частиц из процесса ускорения.

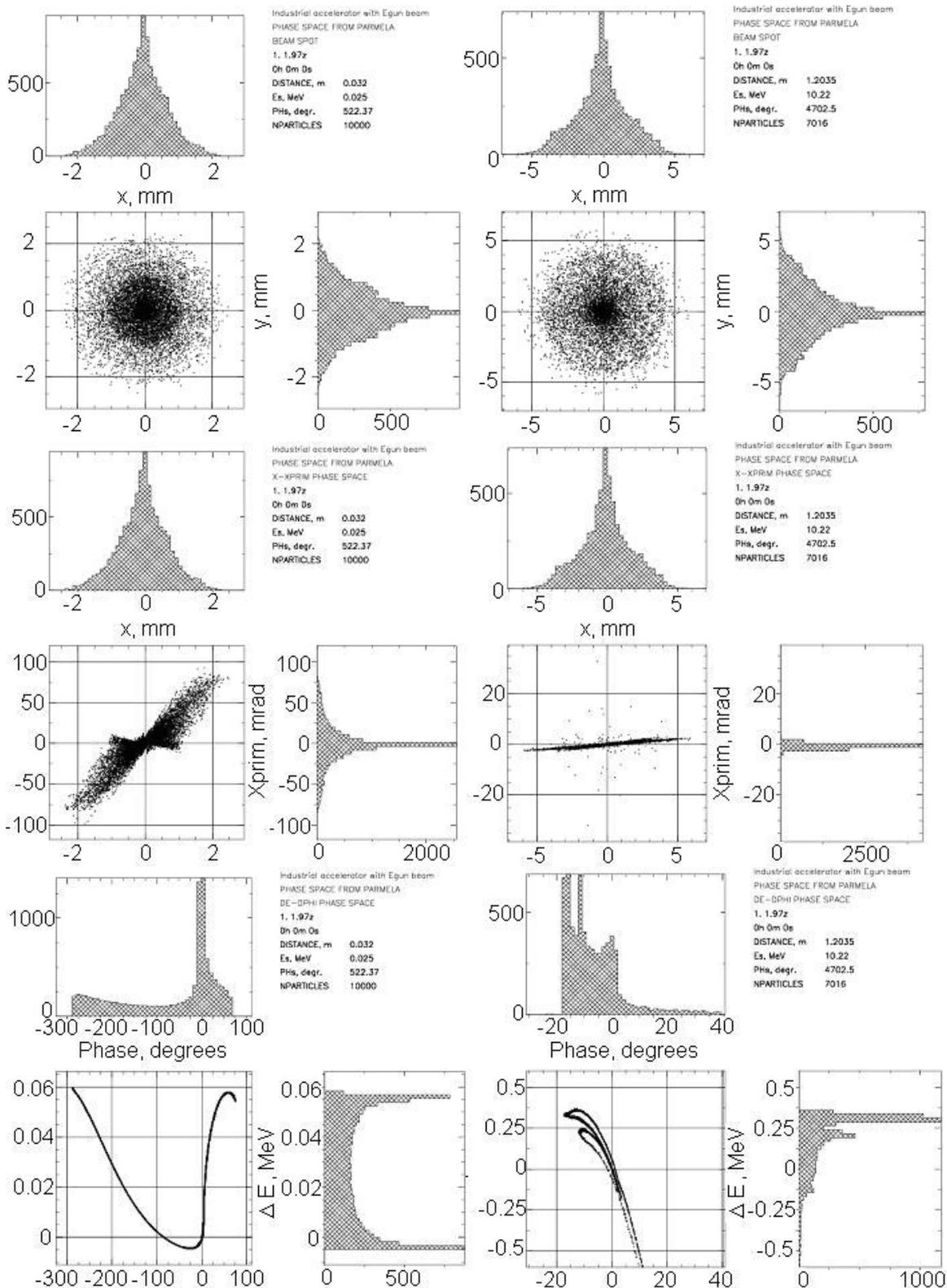


Рис. 5. Поперечный, фазовый и энергетический портреты пучка электронов на входе во вторую ячейку.

Рис. 6. Поперечный, фазовый и энергетический портреты пучка электронов на выходе ускоряющей структуры.

Таблица 8. Мощность, выделяемая в ячейках ускоряющей структуры за счёт потерь частиц из процесса ускорения.

№ ячейки	$P$ , кВт	№ ячейки	$P$ , кВт	№ ячейки	$P$ , кВт
1	0.00000	9	4.50330	17	1.12812
2	0.04079	10	5.01249	18	1.73086
3	0.15067	11	4.05080	19	1.26760
4	2.05500	12	3.80438	20	0.06327
5	9.20108	13	3.83290	21	0.04932
6	8.21184	14	4.26786	22	0.04040
7	9.02832	15	1.85402	23	0.03274
8	6.22562	16	1.49753	24	0.04239
				$\Sigma$	68.0913

Дальнейший анализ свойств ускоряющей структуры с реальной геометрией ячеек и электронной пушки заключался в исследовании устойчивости характеристик ускоренного пучка по отношению к небольшим изменениям напряжений на первом и втором анодах пушки  $U_1$  и  $U_2$ . Оказалось, что: а) возможны небольшие вариации напряжения  $U_1$  в пределах  $\Delta U_1 = \pm 2$  кВ; б) допустимы изменения импульсного значения входного тока в пределах  $I_0 = 0.6 \div 1.0$  А, которые соответствуют изменениям напряжения  $U_2$  в пределах  $\Delta U_2 = \pm 2$  кВ; в) допустимы вариации общего уровня напряжения на анодах электронной пушки в пределах  $\pm 3\%$ .

Для оценки продольной группировки частиц в процессе ускорения на рисунке 7 показан энергетический спектр ускоренного пучка (полное количество частиц, используемое в расчётах, составляло 10000).

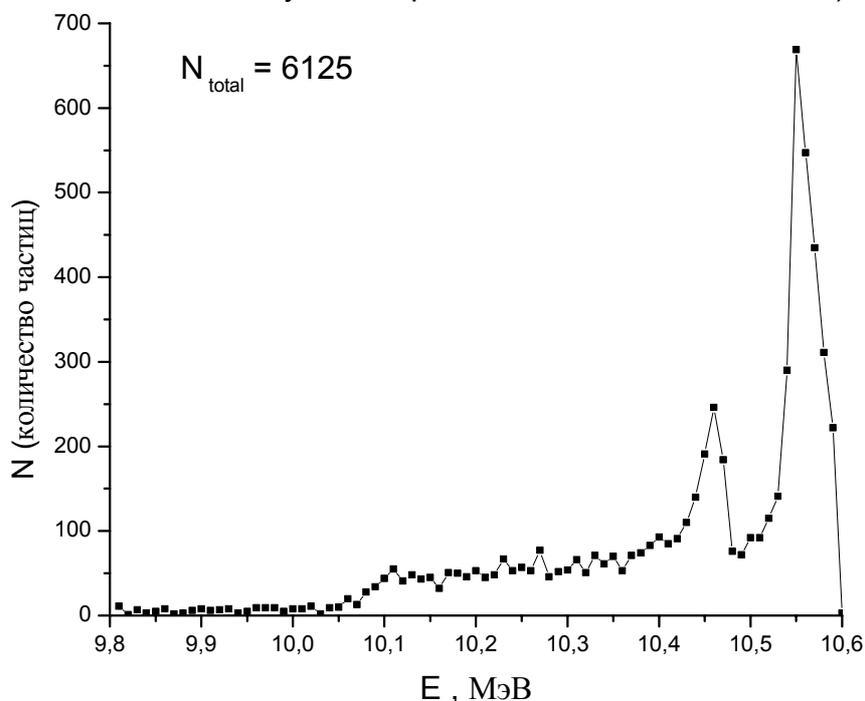


Рис. 7. Энергетический спектр ускоренного пучка электронов.

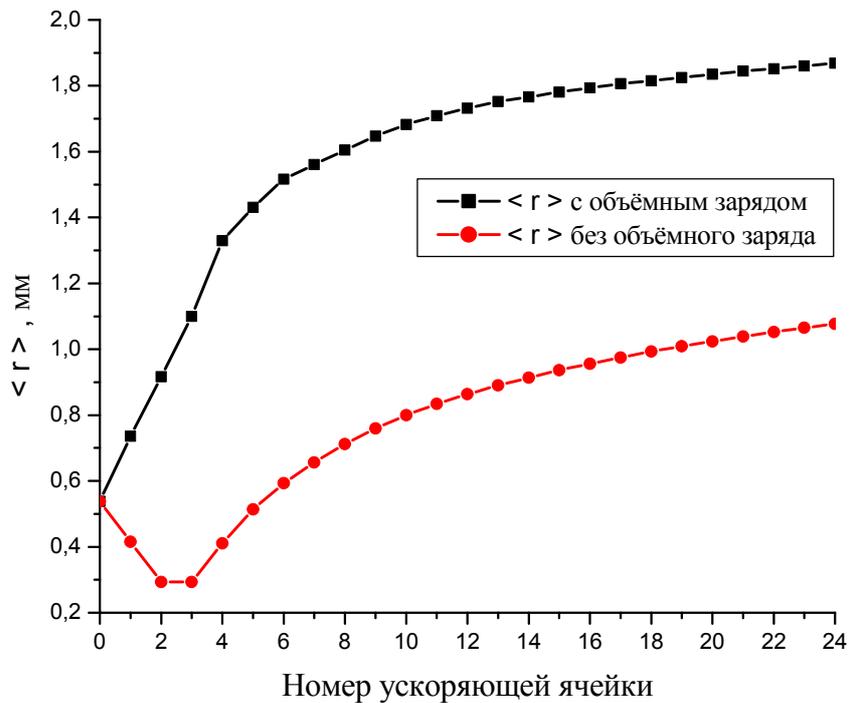


Рис. 8. Зависимости среднеквадратичного размера пучка от номера ускоряющей ячейки для импульсных значений входных токов  $I_0 = 0$  А и  $I_0 = 0.8$  А

По рисунку 8, на котором представлены зависимости среднеквадратичного размера пучка от номера ускоряющей ячейки для импульсных токов инжекции  $I_0 = 0$  А и  $I_0 = 0.8$  А, можно оценить влияние сил пространственного заряда на выходные характеристики сгустков электронов.

### **§5. Дополнительная поперечная фокусировка пучка соленоидальным магнитным полем.**

Во избежание дополнительных потерь частиц на стенках ускоряющей структуры из-за неточности согласования инжектируемого пучка с апертурой ускорителя можно использовать дополнительное магнитное поле соленоида, помещённого в определённой части структуры. В простейшем случае соленоид можно представить в виде отдельного витка с током, амплитуда магнитного поля которого на оси структуры совпадает с амплитудой поля соленоида. По закону Био-Савара-Ампера-Лапласа нетрудно получить общее выражение для магнитного поля витка с током на оси симметрии:

$$B_z(z, r=0) = \frac{\pi}{5} I \frac{R^2}{(R^2 + (z - z_0)^2)^{3/2}},$$

где  $R$  - радиус витка (см),  $z_0$  - расстояние от начала координат до центра витка вдоль оси симметрии (см),  $I$  - ток витка (А),  $B_z$  - магнитное поле витка на оси симметрии (Гс).

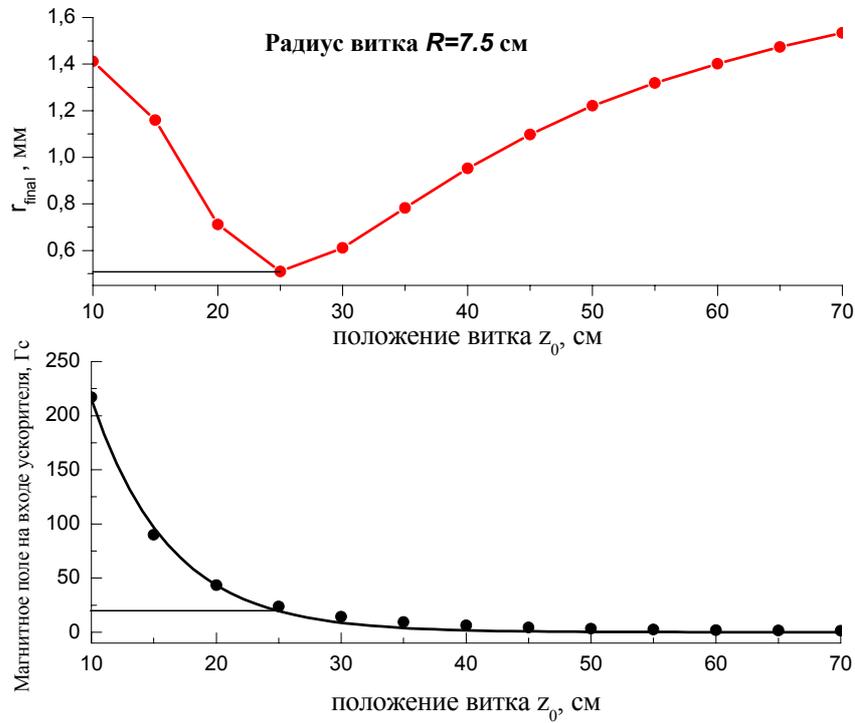


Рис.9. Зависимость среднеквадратичного радиуса ускоренного пучка электронов и магнитного поля, создаваемого витком на входе в структуру, от положения витка относительно начала ускорителя.

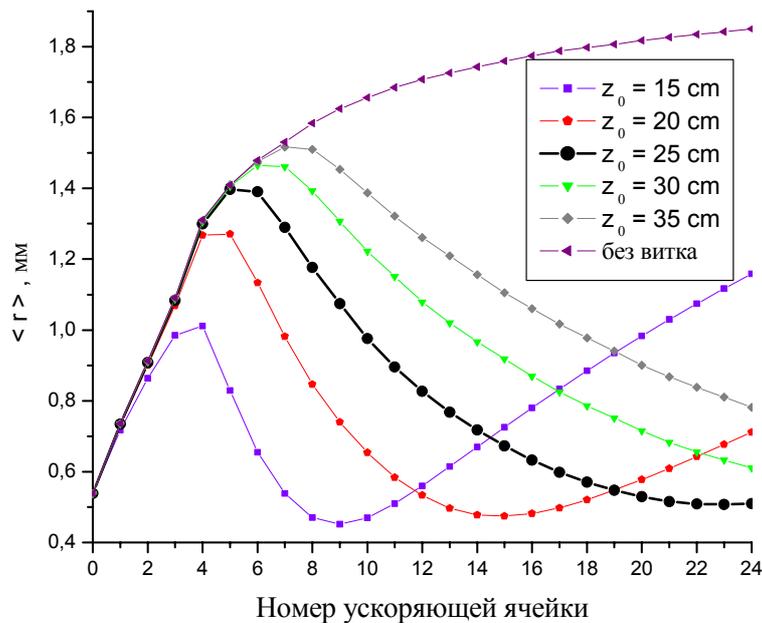


Рис.10. Зависимость среднеквадратичного радиуса пучка электронов на выходе ускоряющих ячеек от номера ячейки при различных положениях витка с током.

Выберем в качестве примера виток радиуса  $R=7,5$  см, амплитуда магнитного поля которого равна  $B_{z,max}=B_z(z=z_0)=1$  кГс. Ток витка при этом составляет  $I=12$  кА. На рис.9. представлены результаты расчёта зависимостей среднеквадратичного радиуса ускоренного пучка электронов  $r_{final}$  и магнитного поля, создаваемого витком на входе в структуру, от положения витка  $z_0$  относительно начала ускорителя. Таким образом, при расположении витка с током на расстоянии  $z_0 = 25$  см от входа в ускоряющую структуру ускоренный пучок имеет минимальные поперечные размеры  $\langle r \rangle \sim 0.5$  мм. При этом, величина магнитного поля, созданного витком на входе в структуру, составляет около  $B_0=24$  Гс. Из рис.10 видно, что при  $z_0 = 25$  см кроссовер пучка приходится на выход ускоряющей структуры.

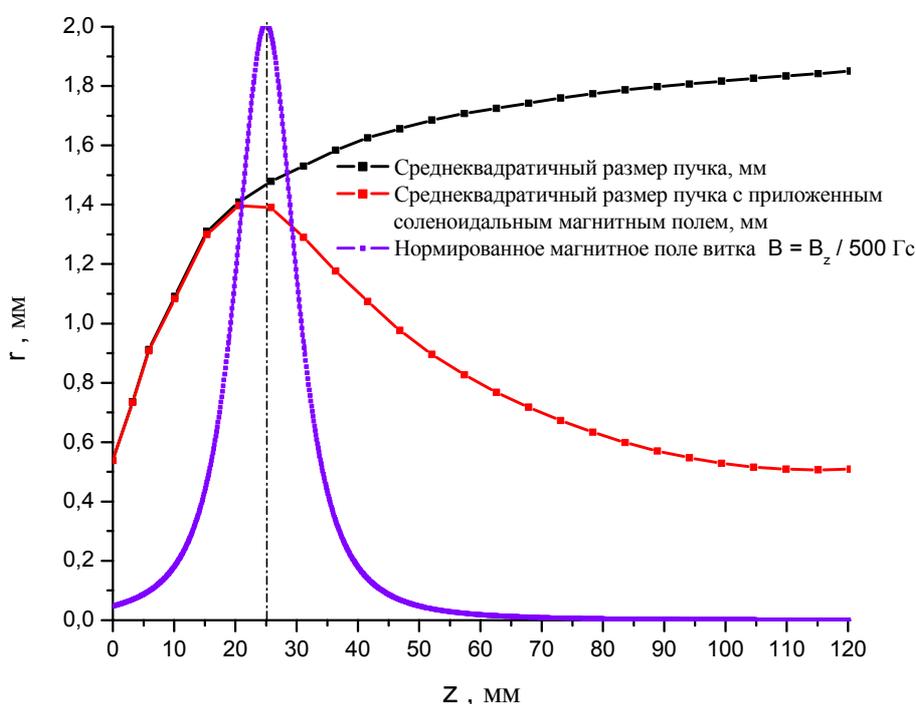


Рис.11. Зависимости среднеквадратичного радиуса пучка и нормированного магнитного поля витка от расстояния от входа в ускоряющую структуру.

На рис.11 можно видеть зависимости среднеквадратичного радиуса пучка в случаях отсутствия витка с током и при его размещении на расстоянии  $z_0 = 25$  см от входа в ускоряющую структуру, а также зависимость продольной компоненты магнитного поля витка с током на оси ускорителя от продольной координаты.

Таким образом, использование соленоидального поля с упомянутыми ранее характеристиками позволяет уменьшить среднеквадратичный размер ускоренного пучка примерно в 3.5 раза при импульсном значении тока инъекции  $I_0=0.8$  А. На рис.12 и 13 представлены расчётные поперечные портреты ускоренного пучка электронов.

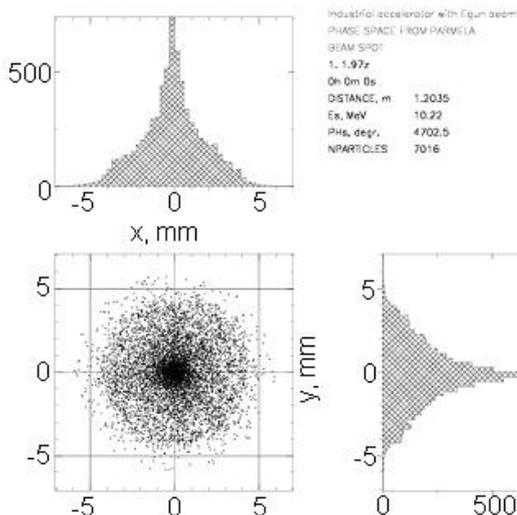


Рис.12. Поперечный портрет ускоренного пучка в отсутствие соленоидального магнитного поля.

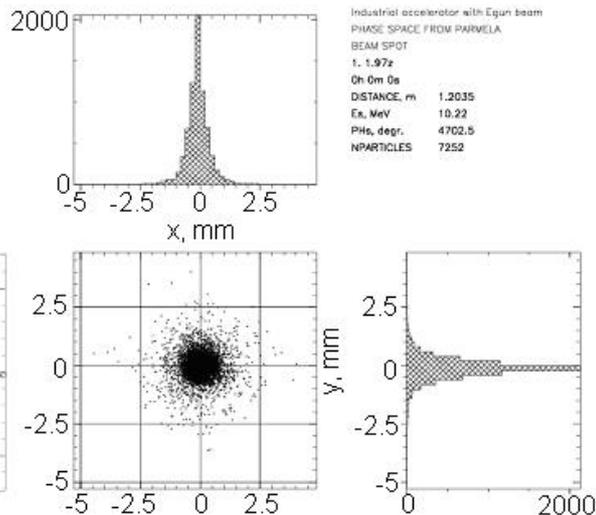


Рис.13. Поперечный портрет ускоренного пучка при положении витка с током в сечении  $z_0 = 25$  см.

### **§6. Возможность вариации энергии ускоренного пучка электронов путём изменения общего уровня СВЧ поля.**

На рисунках 14 и 15 представлены зависимости энергии, среднеквадратичного радиуса ускоренного пучка электронов и коэффициента захвата ускорителя от величины общего уровня СВЧ поля. В отсутствие фокусирующего витка с током (см. рис.14) уменьшение общего уровня СВЧ поля ниже 95% от оптимального значения приводит к рассогласованию радиуса пучка с поперечными размерами пролётного канала ускоряющей структуры (расчёты показывают, что рассогласование наступает при достижении пучком среднеквадратичного значения радиуса  $\langle r \rangle \sim 2$  мм). При этом среднее значение энергии ускоренного пучка равно  $E=9.3$  МэВ, а коэффициент захвата снижается с 60% до 58%. Применение фокусирующего соленоидального поля существенно увеличивает возможность вариации энергии ускорителя (см. рис.15). Расчёты показывают, что в этом случае рассогласование радиуса пучка с поперечными размерами пролётного канала не наступает даже при снижении общего уровня СВЧ поля до 75% от оптимального значения. При этом энергия ускоренного пучка снижается до 6 МэВ, а коэффициент захвата составляет около 48%. Снижение коэффициента захвата объясняется недостаточной продольной группировкой частиц в первой ускоряющей ячейке и слабой поперечной фокусировкой пучка в группирующей части ускорителя из-за уменьшения амплитудного значения СВЧ поля.

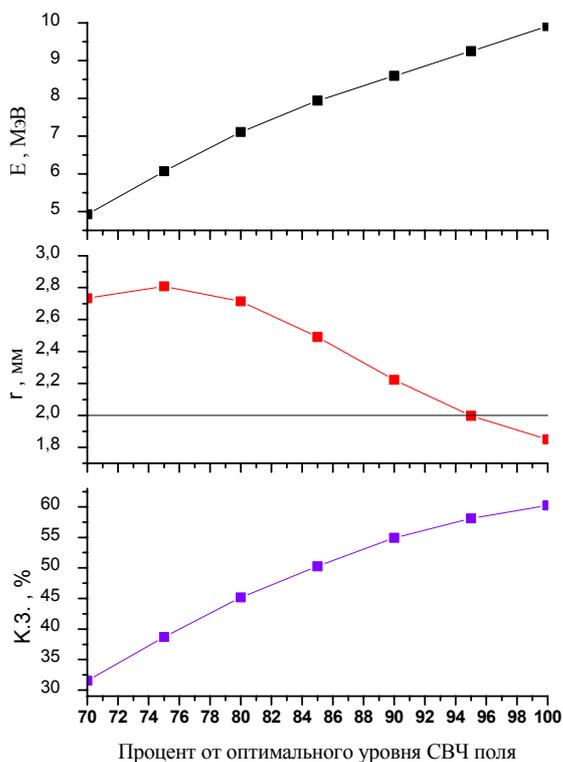


Рис. 14. Зависимости энергии, среднеквадратичного радиуса ускоренного пучка электронов и коэффициента захвата ускорителя от величины общего уровня СВЧ поля в отсутствие витка с током.

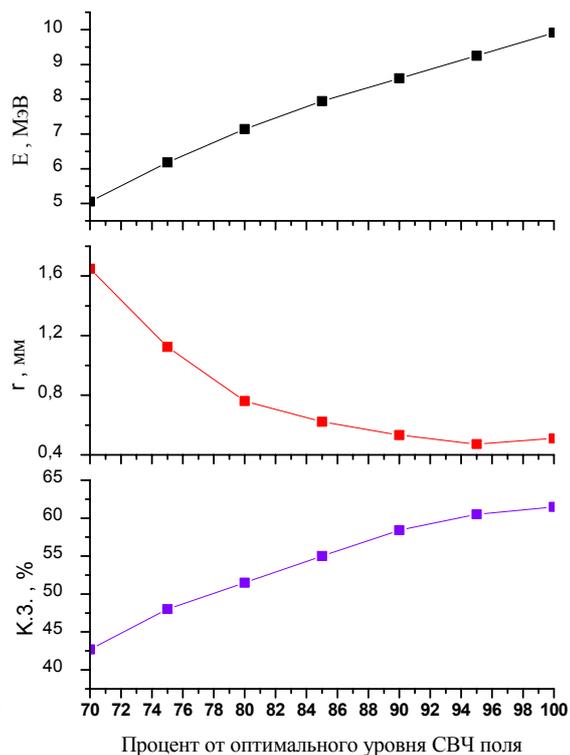


Рис.15. Зависимости энергии, среднеквадратичного радиуса ускоренного пучка электронов и коэффициента захвата ускорителя от величины общего уровня СВЧ поля при положении витка с током в сечении  $z_0 = 25$  см.

Таким образом, использование фокусирующего витка с током ( $R=7.5$  см,  $I=12$  кА,  $B_{z,max}=1$  кГс,  $z_0 = 25$  см) позволяет варьировать энергию ускоренного пучка в пределах  $E=6\div 10$  МэВ с соответствующим изменением коэффициента захвата в пределах  $K_3=48\div 60\%$ .

## §7. Выводы.

В результате произведённых расчётов были получены следующие характеристики электронной пушки, ускоряющей структуры и ускоренного пучка электронов:

1. Напряжение на первом аноде электронной пушки  $U_1 = 50$  кВ.
  2. Напряжение на втором аноде электронной пушки  $U_2 = 12.9$  кВ.
  3. Импульсное значение тока пушки  $I = 0.8$  А.
  4. Средняя энергия ускоренного пучка электронов -  $= 9.914$  МэВ.
  5. Коэффициент захвата -  $K_3 = 60\%$ .
  6. Величина энергетического разброса на выходе структуры- $\Delta E = 0.6$  МэВ.
  7. Фазовая ширина ускоренного сгустка -  $\Delta\varphi = 25^\circ$ .
  8. Среднеквадратичный радиус пучка на выходе структуры- $\langle r \rangle = 1.868$  мм.
  9. Среднеквадратичное значение нормализованного эмиттанса -  $\langle \varepsilon_N \rangle = 32.5$  мм·мрад.
  10. Среднеквадратичная расходимость ускоренного пучка -  $D > = 1.2$  мрад.
  11. Допустимые изменения напряжения  $U_1$  -  $\Delta U_1 = \pm 2$  кВ.
  12. Допустимые изменения напряжения  $U_2$  -  $\Delta U_2 = \pm 2$  кВ.
  13. Допустимое значение импульсного тока пучка на входе в структуру -  $I_0 = 1.0$  А.
  14. Допустимые вариации общего уровня напряжения на анодах пушки-  $\pm 3\%$ .
  15. Полная мощность, выделяемая в стенках ускоряющей структуры за счёт потерь частиц из процесса ускорения -  $P_\Sigma = 68.09$  кВт.
  16. Импульсная мощность СВЧ потерь в ускоряющей структуре -  $1.5$  МВт.
  17. Допустимые изменения общего уровня СВЧ поля -  $\pm 5\%$ , при соответствующих изменениях среднего значения энергии ускоренного пучка в пределах -  $9.4827 \div 10.679$  МэВ.
- Использование фокусирующего соленоидального поля ( $R = 7.5$  см,  $I = 12$  кА,  $B_{z,max} = 1$  кГс,  $z_0 = 25$  см) позволяет получить следующие параметры ускоренного пучка:
18. Среднеквадратичный радиус пучка на выходе структуры-  $\langle r \rangle = 0.49$  мм.
  19. Коэффициент захвата -  $K_3 = 62\%$ .
  20. Допустимые изменения общего уровня СВЧ поля -  $70 \div 100\%$  от оптимального значения, при соответствующих изменениях средней энергии ускоренного пучка в пределах -  $6.0 \div 10.0$  МэВ.

Основные характеристики ускоряющих ячеек представлены в табл. 4 и 6.

**Список литературы.**

1. PARMELA – code, originally developed by K. R. Crandall.
2. W.B. Herrmannsfeldt, “EGUN – An electron optics and gun design program”, Stanford Linear Accelerator Center, SLAC-331, UC-28 (A), (1988).
3. K. Halbach and R. F. Holsinger, “SUPERFISH -- A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry,” Particle Accelerators 7 (4), 213-222 (1976).
4. James H. Billen and Lloyd M. Young, “Poisson Superfish”, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1834, (2003).

Работа поддержана грантом президента РФ № НШ-1619.2003.2.

**Ишханов Борис Саркисович  
Посеряев Антон Владимирович  
Шведунов Василий Иванович**

**ДИНАМИКА ПУЧКА В СИЛЬНОТОЧНОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ  
ЭЛЕКТРОНОВ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2004 – 6/745

Работа поступила в ОНТИ 30.01.2004 г.

**ИД № 00545 от 06.12.1999**

**Издательский отдел  
Учебно-научного центра довузовского образования**

117246, Москва, ул. Обручева, 55А  
Тел./факс (095) 718-6966, 718-7785  
e-mail: [izdat@abiturcenter.ru](mailto:izdat@abiturcenter.ru)  
<http://abiturcenter.ru/izdat/>

Гигиенический сертификат № 77.99.02.923.Д.001743.03.03 от 11.03.2003  
Налоговые льготы – Общероссийский классификатор продукции  
ОК-005-93, том 1 – 953000

Подписано в печать 11. 02. 2004 г. Формат 60x90/16  
Бумага офсетная № 2. Усл. Печ. л. 1, 31  
Тираж 30 экз. Заказ № 567

Отпечатано в Мини-типографии УНЦДО  
<http://abiturcenter.ru/print>  
в полном соответствии с качеством  
предоставленного оригинал-макета