

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 05-01-00487.

Литература

1. Кузьмин В. М., Свешников А. Г., Семашко Н. Н., Якунин С. А. // Ж. вычислительной математики и математической физики. 1981. Т. 21. № 5. С. 1332—1338.

2. Овсянников Д. А. Моделирование и оптимизация динамики пучков заряженных частиц. — Л.: ЛГУ, 1990.

3. Nesterov Yu. E. // Mathematical Programming. 1997. V. 79. P. 285—297.

4. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. — М.: Мир, 1982.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Some methodological features of the solving of optimization problems of intensive charged particle beams

D. O. Beljaev, V. M. Sveshnikov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Some methodological features of the solving of optimization problems of intensive charged particle beams on an example of a test problem about a Pierce's gun are considered. The behavior of the purpose function, its sensitivity to a change of the parameters, and step by step approach to an optimization is investigated.

УДК 621.385.6

Исследование динамики нестационарного электронного пучка в электронно-оптических системах электровакуумных приборов

С. О. Семенов

ФГУП «Научно-производственное предприятие "Алмаз"», г. Саратов, Россия

Исследованы характеристики одно-, двух- и четырехступенчатых коллекторов для ламп бегущей волны (ЛБВ) с различными отношениями их размеров и длины замедленной волны; определены отличия результатов расчета при нестационарном и стационарном подходах и влияние остаточной группировки пучка. Рассмотрена динамика образования виртуального катода при торможении моноскоростного и модулированного электронных пучков.

Введение

В работе [1] приведены описание алгоритма и результаты исследований динамики нестационарного электронного пучка в двух- и четырехступенчатых коллекторах ЛБВ, показаны отличия результатов расчетов при стационарном и нестационарном подходах, влияние степени группировки пучка и эффекта запаздывания на характеристики коллекторов для случая, когда длина замедленной волны в 4,5—5 раз меньше размеров коллекторов. В настоящей статье приведены результаты расчетов одно-, двух- и четырехступен-

чатых коллекторов при изменении соотношений указанных длин, рассмотрена динамика образования виртуального катода при торможении осесимметричного электронного пучка с модуляцией по скорости и плотности и без нее.

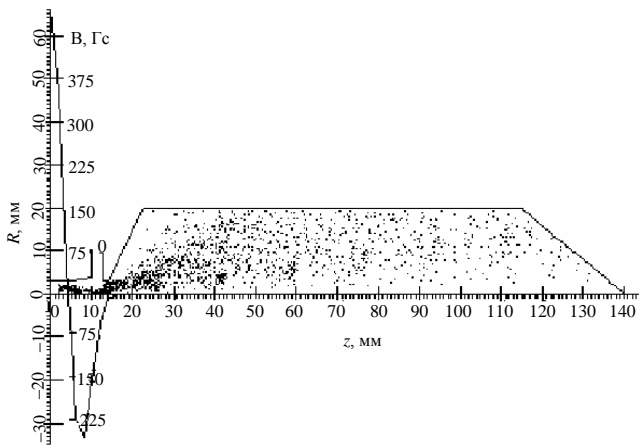
Результаты расчета характеристик коллекторов

Рассмотрены коллекторы с различными размерами, которые изменялись примерно пропорционально относительно первоначальной конструкции, причем

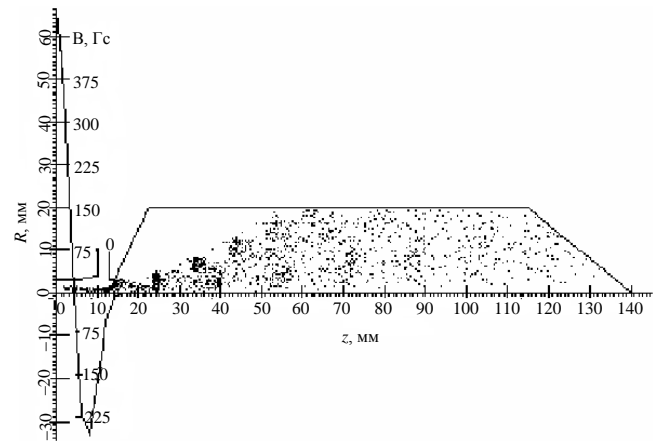
для достижения максимального КПД коллектора с использованием стационарного электронного пучка проводилась некоторая оптимизация распределения магнитного поля в области двухступенчатого коллектора, а также диаметров и положения входных отверстий — в области четырехступенчатого коллектора. На входе коллекторов задавался отработанный электронный пучок, рассчитанный для режимов максимального КПД и максимального усиления [1].

Длина одноступенчатого коллектора (рис. 1, а, б) варьировалась в пределах 7,08—0,95 от замедленной длины волны. Для анализа оседания первичных частиц расчеты проводили без учета вторичной эмиссии, которая приводит к некоторому перераспределению токооседания по поверхности электродов.

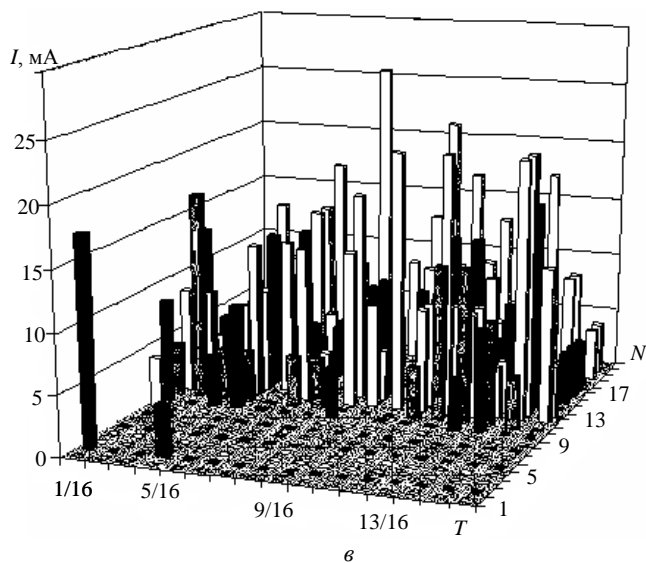
Интегральные характеристики одноступенчатого коллектора при потенциале 0,68 от ускоряющего потенциала приведены в табл. 1. Ток на предколлектор обусловлен прямым оседанием на него крупных частиц, токи на электроды не зависят от размеров коллектора, а только от характеристик пучка, небольшие изменения КПД коллектора и тепловой мощности на электроды связаны с влиянием волнистости потенциала на границе электродов. В табл. 1 приведены данные расчетов без учета запаздывания потенциалов, в противном случае это приводит к увеличению токооседания на предколлектор примерно на 0,3—0,8 мА и соответствующему возрастанию тепловой мощности на предколлектор, уменьшению КПД коллектора на 0,4—1 %, а также его тока и тепловой мощности.



а



б



в

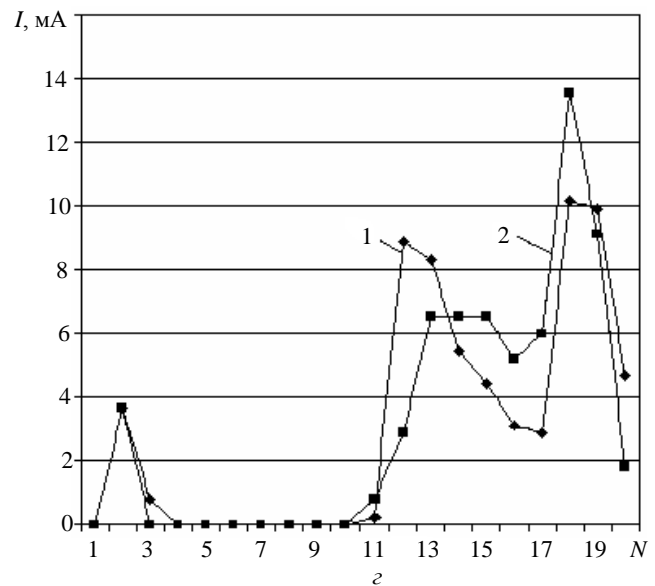
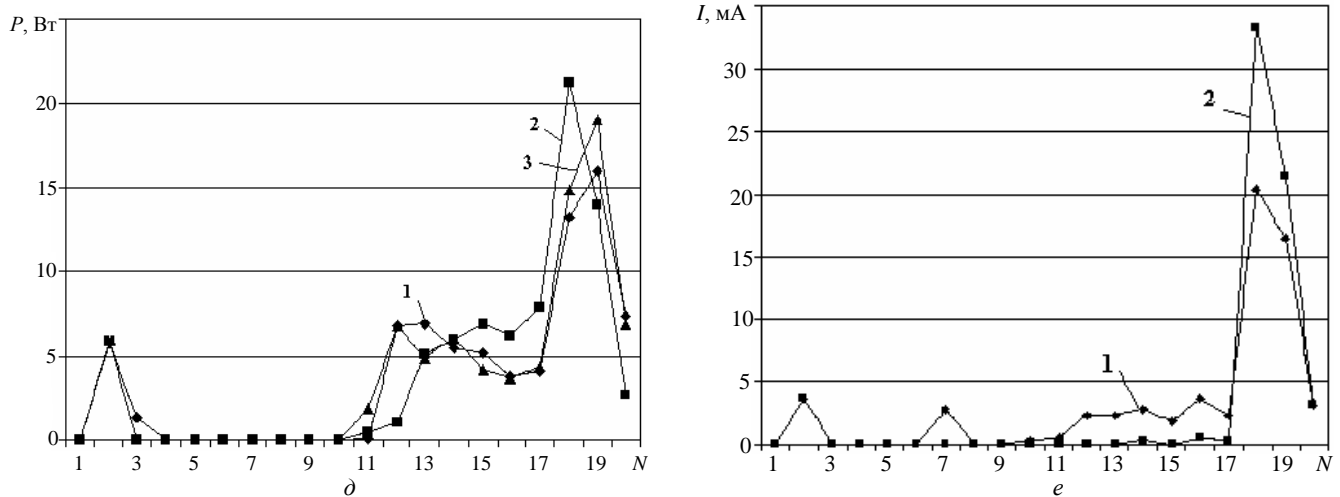


Рис. 1. Расчетные характеристики одноступенчатых коллекторов в режимах максимального КПД (а, в) и максимального усиления (б, з, д, е):

а, б — конфигурация одноступенчатого коллектора ($L_{col}/\lambda_{as} = 7,08$) и положение крупных частиц в момент времени $t = 53 T$; в — распределение токов на участки предколлектора и коллектора ($L_{col}/\lambda_{as} = 7,08$) в течение периода T ; з, е — распределение токов;



Окончание рис. 1. Расчетные характеристики:

d — тепловой нагрузки на участки коллектора (e, d — $L_{col}/\lambda_{as} = 7,08$; e — $L_{col}/\lambda_{as} = 0,95$);
 1 — нестационарный подход без учета запаздывания потенциала; 2 — стационарный подход;
 3 — нестационарный подход с учетом запаздывания потенциала

Таблица 1

Характеристики одноступенчатого коллектора в различных режимах в зависимости от отношения длины коллектора к длине замедленной волны

Максимальный режим	L_{col}/λ_{as}	Подход	КПД кол., %	I_{pr} , мА	I_{col} , мА	P_{pr} , Вт	P_{col} , Вт
КПД	7,08	Стационарный	38,22	1,084	61,52	1,749	57,11
		Нестационарный	38,04	1,084	61,52	1,7747	57,16
Усиление		Стационарный	31,15	3,652	58,95	5,92	72,22
		Нестационарный	30,95	3,652	58,95	5,914	72,39
КПД	3,96	Стационарный	37,525	1,084	61,52	1,748	57,54
		Нестационарный	37,271	1,084	61,52	1,746	58,07
Усиление		Стационарный	30,692	3,652	58,95	5,917	72,71
		Нестационарный	30,331	3,652	58,95	5,912	73,57
КПД	1,78	Стационарный	37,731	1,084	61,52	1,725	58,22
		Нестационарный	37,446	1,084	61,52	1,719	57,43
Усиление		Стационарный	30,891	3,652	58,95	5,858	73,47
		Нестационарный	30,482	3,652	58,95	5,836	72,15
КПД	0,95	Стационарный	37,747	1,084	61,52	1,741	56,85
		Нестационарный	37,467	1,084	61,52	1,736	56,71
Усиление		Стационарный	30,991	3,652	58,95	5,877	72,05
		Нестационарный	30,578	3,652	58,95	5,856	72,43

Помимо интегральных характеристик, в установленном режиме анализировали распределение токооседания и тепловой мощности по участкам предколлектора и коллектора как в течение периода колебаний, так и усредненных за период, и проводили их сравнение с данными, полученными при стационарном подходе. Предколлектор и коллектор разбивали на 20 участков, причем нумерация начиналась с предколлектора.

Цилиндрическую часть коллектора разбивали на девять участков, коническое дно — на три участка. В режимах и максимального КПД и максимального усиления в коллектор влетает модулированный по плотности электронный пучок, но в режиме максимального КПД заметная группировка частиц быстро исчезает в начальной части кол-

лектора (см. рис. 1, а), а в режиме максимального усиления процесс разгруппирования происходит значительно медленнее, области сгущения частиц наблюдаются, по крайней мере, до середины коллектора (см. рис. 1, б). Поскольку в различные моменты периода колебаний частицы отработанного пучка имеют различные энергии, то и оседание частиц на участки электродов существенно изменяется в течение периода (см. рис. 1, в). При большой длине коллектора ($L_{col}/\lambda_{as} = 7,08$) области оседания частиц на участки коллектора при стационарном и нестационарном подходах совпадают, причем если в режиме максимального КПД количественные отличия в распределениях токов и мощностей по участкам небольшие, то в режиме максимального усиления отличия более сущест-

венные (см. рис. 1, з, д). С уменьшением длины коллектора увеличиваются как количественные отличия в распределениях токооседания и мощности по участкам коллектора, так и появляются качественные отличия — частицы при нестационарном расчете начинают оседать на поверхность коллектора раньше, т. е. там, где при стационарном подходе оседание еще не начинается (см. рис. 1, е). При этом необходимо отметить, что во всех рассмотренных случаях расчетная тепловая нагрузка на участки коллектора при использовании стационарного подхода более локализована и по максимальной величине превышает нагрузку при нестационарном расчете.

Влияние запаздывания электрического потенциала на распределение токооседания максималь-

но для коллекторов наибольших размеров. Учет запаздывания не изменяет качественную, а лишь количественную картину распределения оседания (см. рис. 1, д кривая 3), влияние запаздывания уменьшается с уменьшением размеров коллектора и практически равно нулю для коллектора с $L_{col}/\lambda_{as} = 0,95$.

Расчетные характеристики двух ступенчатых коллекторов (рис. 2, а, б) приведены в табл. 2. При меньших размерах коллектора и сохранении неизменной величины входного отверстия не удалось достичь приемлемых величин обратного потока отраженных и вторичных электронов из коллектора и КПД коллектора, поэтому конструкции с меньшими размерами не рассматривались.

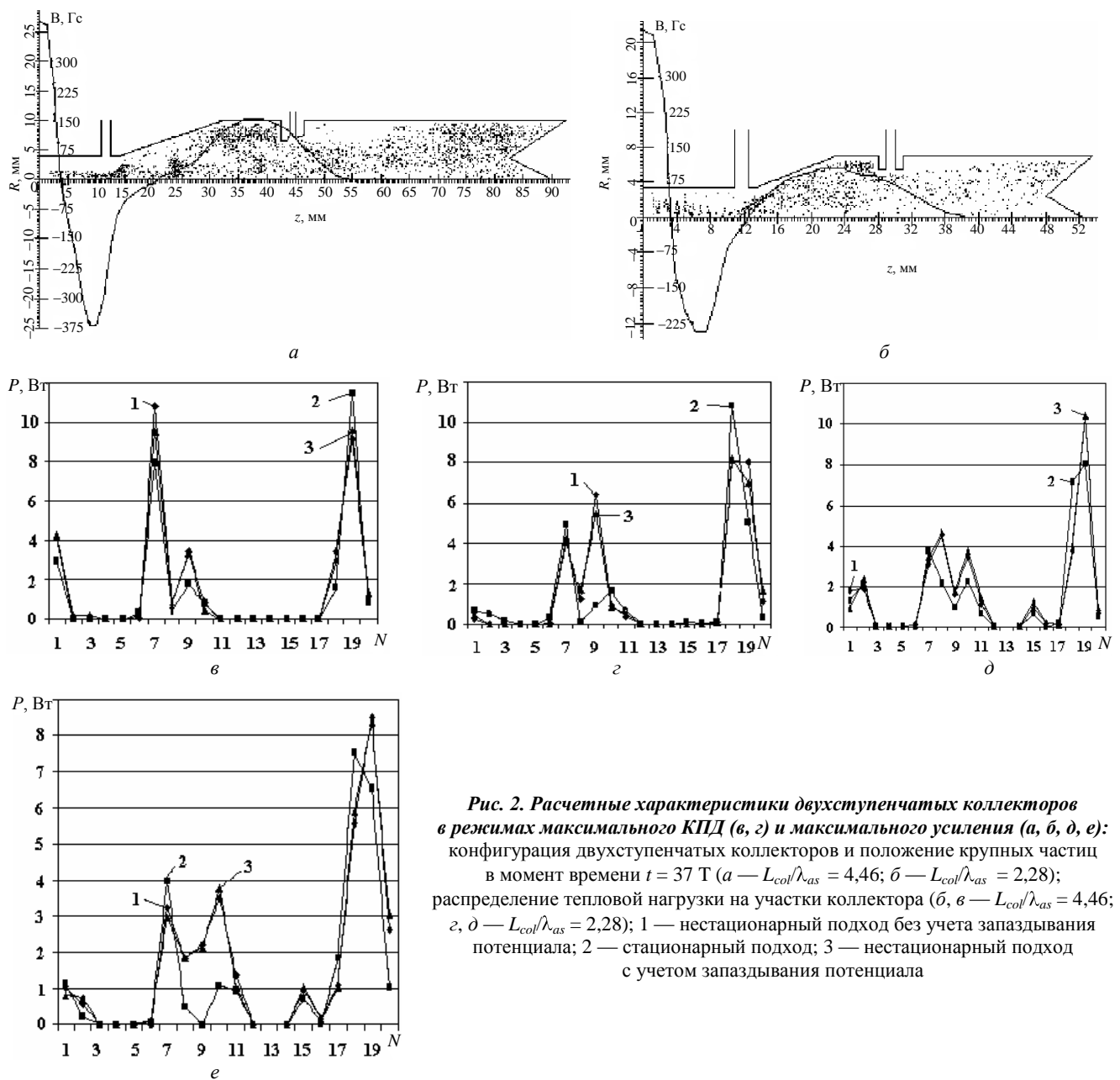


Рис. 2. Расчетные характеристики двухступенчатых коллекторов в режимах максимального КПД (в, з) и максимального усиления (а, б, д, е): конфигурация двухступенчатых коллекторов и положение крупных частиц в момент времени $t = 37 \text{ Т}$ (а — $L_{col}/\lambda_{as} = 4,46$; б — $L_{col}/\lambda_{as} = 2,28$); распределение тепловой нагрузки на участки коллектора (б, в — $L_{col}/\lambda_{as} = 4,46$; з, д — $L_{col}/\lambda_{as} = 2,28$); 1 — нестационарный подход без учета запаздывания потенциала; 2 — стационарный подход; 3 — нестационарный подход с учетом запаздывания потенциала

Таблица 2

Характеристики двухступенчатых коллекторов

Максимальный режим		L_{col}/λ_{cas}	Токи электродов коллектора, мА		
			I_{pr}	I_{col1}	I_{col2}
КПД	Нестационарный	4,46	4,3	36,3	22,0
	Стационарный		3,4	31,3	27,9
Усиление	Нестационарный		0,3	25,0	37,3
	Стационарный		1,3	17,5	43,8
КПД	Нестационарный	2,28	3,5	37,9	21,2
	Стационарный		3,5	32,8	26,3
Усиление	Нестационарный		1,6	24,8	36,2
	Стационарный		1,6	15,9	45,1

Анализ данных табл. 2 показывает, что учет временных зависимостей характеристик пучка приводит к уменьшению тока второй ступени коллектора на 12—26 % для рассмотренных режимов относительно характеристик в стационарном режиме, причем с уменьшением размеров коллектора отличия в величине I_{col2} увеличиваются.

Относительное уменьшение КПД коллектора в нестационарных режимах за счет уменьшения тока второй ступени составило 5—9,2 %. Суммарная тепловая мощность на электродах коллекторов двух конструкций в режиме максимального КПД равна: 33—36 Вт — в нестационарном, 28—29,4 Вт — в стационарном режимах и 30—33 и 25,5—26,4 Вт — соответственно, в режиме максимального усиления.

Сопоставление распределений тепловой мощности по участкам электродов коллектора (предколлектор составляют участки с номерами 1—3, 1-ю ступень коллектора — 5—12, вторую — 14—20), полученных в различных режимах, показывает, что отличия между нестационарным и стационарным режимами (см. рис. 2, ν — e , кривые 1, 2) увеличиваются с уменьшением размеров коллектора и с увеличением остаточной группировки пучка. Учет запаздывания потенциала приводит к незначительным изменениям в распределении мощности оседания пучка (см. рис. 2, ν — e , кривая 3).

Аналогичная тенденция по уменьшению при нестационарном расчете токов на ступени с низ-

ким потенциалом по сравнению с режимом стационарным наблюдается и при уменьшении размеров четырехступенчатых коллекторов (рис. 3, табл. 3), отличия увеличиваются также с уменьшением размеров коллектора и увеличением остаточной группировки пучка, хотя по сравнению с двухступенчатым коллектором по величине отличия меньше — относительное уменьшение КПД коллектора в нестационарных режимах 3—6,2 % и суммарная тепловая мощность на электродах коллекторов трех конструкций в режиме максимального КПД равна: 13,9—19,6 Вт — в нестационарном и 13—14,84 Вт — в стационарном режимах, 14—16,6 и 12,9—14,3 Вт, соответственно, в режиме максимального усиления. Меньшие отличия режимов по сравнению с двухступенчатым коллектором связаны с большими поперечными размерами четырехступенчатых коллекторов и с более быстрым разгруппированием пучка в четырехступенчатом коллекторе из-за непрерывного уменьшения потенциала по длине коллектора в отличие от двухступенчатого, в котором ступени имеют протяженную цилиндрическую форму и тормозящие электростатические линзы занимают ограниченные области по длине коллектора (см. рис. 2, a , 3, a). Тепловая нагрузка на ступени коллектора в различных режимах примерно пропорциональна величинам токов. Учет запаздывания потенциалов мало изменял тепловую нагрузку.

Таблица 3

Характеристики четырехступенчатых коллекторов

Максимальный режим		L_{col}/λ_{cas}	Токи электродов коллектора, мА					
			I_{pr}	I_{col1}	I_{col2}	I_{col3}	I_{col4}	I_{col5}
КПД	Нестационарный	4,85	0	25,2	11,9	5,2	20,3	0
	Стационарный		0,2	24,3	10,7	6,8	20,6	0
Усиление	Нестационарный		3,1	0,5	20,5	8,6	29,9	0
	Стационарный		2,3	1,6	17,7	11,0	29,7	0
КПД	Нестационарный	2,76	1,1	16,1	18,5	7,9	19,0	0
	Стационарный		1,1	15,8	18,3	8,3	19,1	0
Усиление	Нестационарный		3,6	0,3	15,2	15,9	27,6	0
	Стационарный		3,1	1,0	13,8	17,0	27,7	0
КПД	Нестационарный	1,78	2,5	19,9	16,6	5,3	18,3	0
	Стационарный		2,2	18,4	15,3	5,8	20,9	0
Усиление	Нестационарный		1,3	2,1	18,8	13,0	27,4	0
	Стационарный		1,8	3,4	16,2	12,5	28,7	0

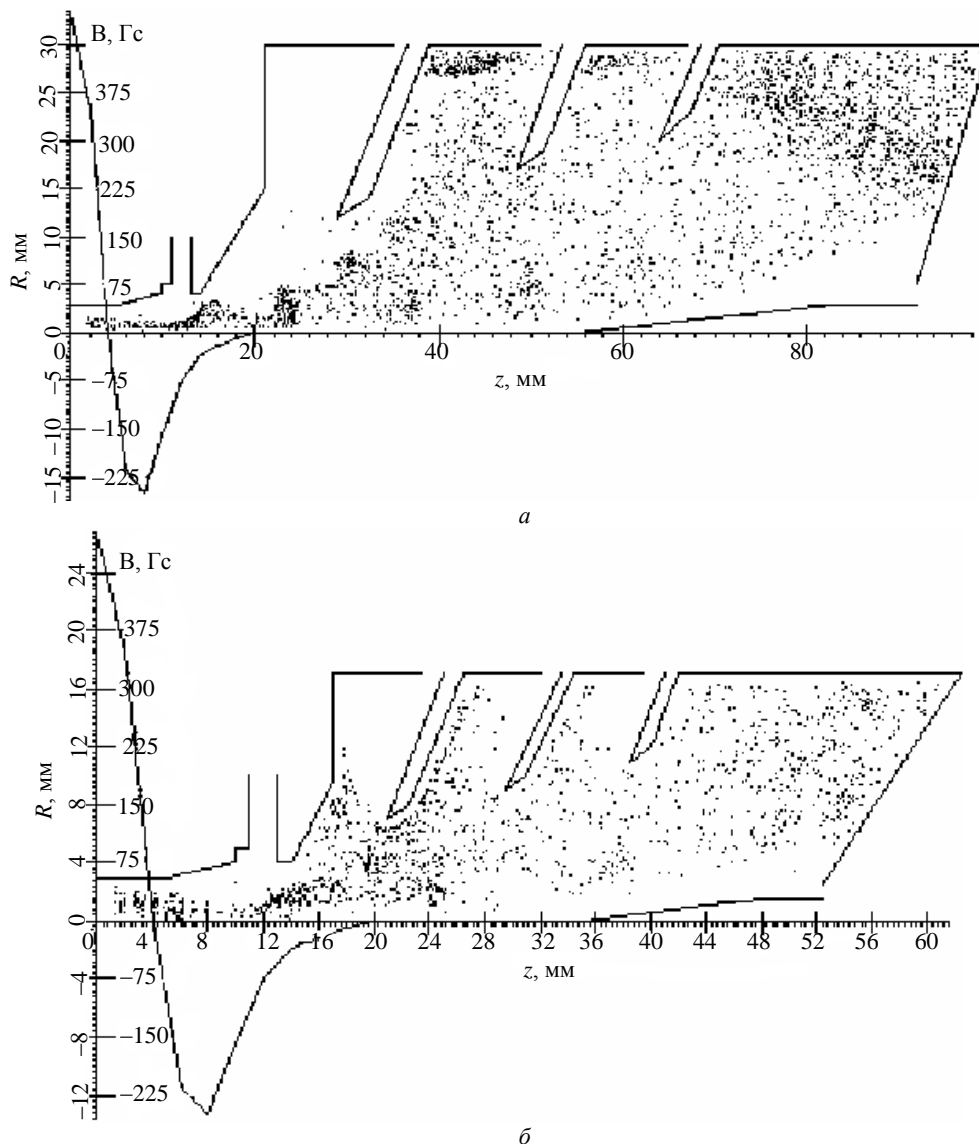


Рис. 3. Конфигурация четырехступенчатых коллекторов и положение первичных и вторичных крупных частиц в момент времени $t = 37 T$:
 а — $L_{col}/\lambda_{as} = 4,85$; б — $L_{col}/\lambda_{as} = 2,76$

Расчет процесса торможения осесимметричного электронного пучка

В качестве примера использования алгоритма [1] исследована также динамика образования виртуального катода при торможении осесимметричного электронного пучка в трубе. Интерес к исследованию колебаний в виртуальном катоде для использования в качестве источника СВЧ-излучения в последние годы существенно возрос, например [2, 3]. В работе [4] был исследован процесс установления потенциала на оси канала при влете пучков с различными первеансами, процесс формирования и форма сгустка электронов не анализировались.

Расчеты проводили для нерелятивистских осесимметричных моноскоростного электронного

пучка и пучка с модуляцией по скорости и плотности. Специальная обработка результатов расчетов для анализа колебаний не проводилась, а рассматривалось лишь положение крупных частиц в различные моменты времени.

Немодулированный по скорости и плотности электронный пучок с микропервеансом $P_{\mu} = 0,67 \text{ мкА/В}^{3/2}$ двигался в трубе с нормированным потенциалом 1 в спадающем магнитном поле и тормозился цилиндрическим электродом с небольшим отрицательным потенциалом $U_{el} = -0,07 U_0$ (рис. 4). На всех рисунках значение параметра t соответствует номеру шага по времени. С ростом t происходит накопление заряда в области торможения, появляется плотный сгусток частиц, потенциал в области сгустка постепенно понижается и начинается отражение частиц от сгустка. Величина тока частиц,

прошедших виртуальный катод, составляла в среднем 6 % тока пучка. Образовался плотный сгусток, имеющий малую продольную протяженность и вытянутый в радиальном направлении. После образования сгустка его положение по координате Z и поперечный размер практически не изменяются, но на каждом шаге по времени изменяются его форма и положение частиц в сгустке.

На рис. 5 показаны результаты процесса торможения модулированного пучка, полученного на выходе ЛБВ в режиме максимального усиления [1]. Потенциал тормозящего электрода равен нулю. Шаг расчета по времени составлял $1/16$ пе-

риода. В отличие от предыдущего случая из-за наличия в пучке частиц с различными продольными скоростями отражение частиц происходит при различных значениях продольной координаты Z и плотного сгустка частиц не образуется.

Ток частиц, прошедших виртуальный катод и продолжающих движение в положительном направлении, составил примерно 50 % тока пучка, хотя доля ускоренных частиц в пучке на входе не превышала 30 %. В обратном потоке отраженных частиц наблюдается пространственно-временная периодичность, соответствующая периодичности пучка на входе в расчетную область.

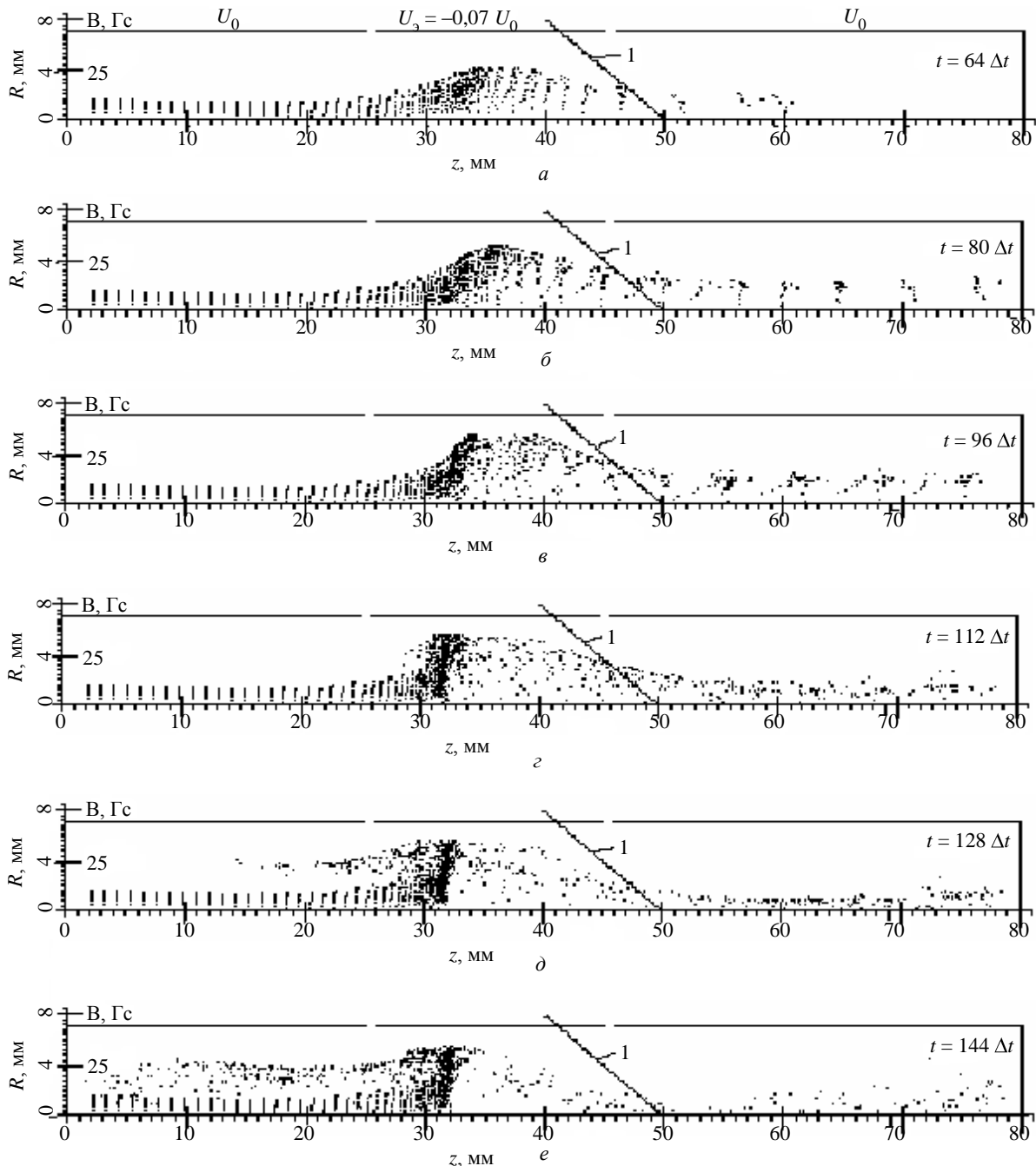


Рис. 4. Торможение моноскоростного электронного пучка:

$a—e$ — положение крупных частиц в различные моменты времени; 1 — распределение магнитного поля

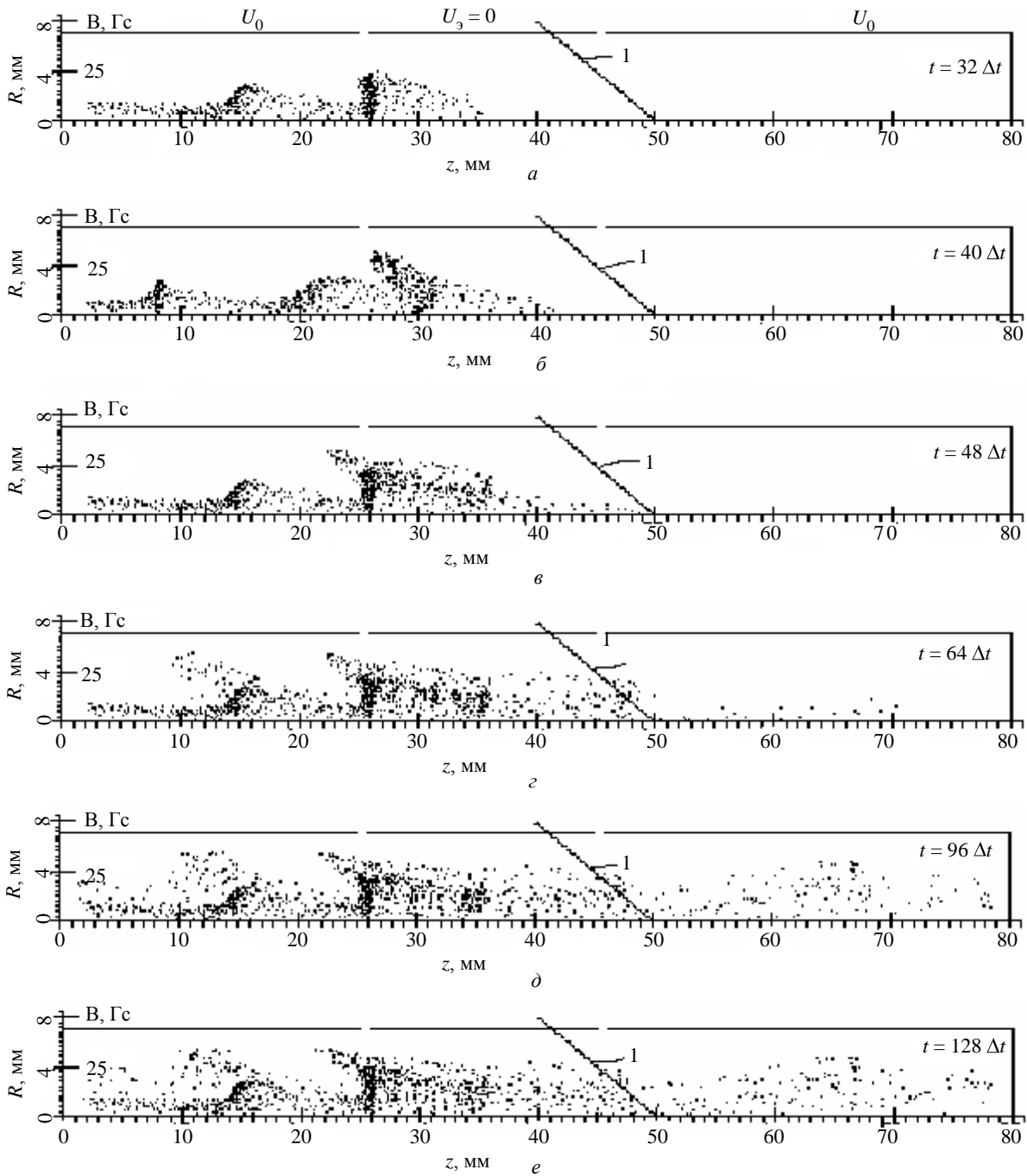


Рис. 5. Торможение модулированного по скорости и плотности электронного пучка:
 а—е — положение крупных частиц в различные моменты времени; 1 — распределение магнитного поля

Заключение

Проведенные исследования показали, что учет изменений характеристик нерелятивистского пучка во времени на входе в коллектор приводит по сравнению со стационарным режимом к следующим отличиям:

для одноступенчатого коллектора отличия в распределении токооседания и тепловой нагрузки по поверхности коллектора увеличиваются и становятся заметными как при уменьшении длины коллектора примерно до длины замедленной вол-

ны или менее, так и при увеличении остаточной группировки пучка, токооседание по поверхности коллектора становится более распределенным и величина максимальной тепловой нагрузки уменьшается;

для многоступенчатых коллекторов наблюдается уменьшение токопрохождения на ступени с низким потенциалом, уменьшение КПД коллектора и увеличение тепловой нагрузки на коллектор, отличия увеличиваются с уменьшением размеров коллектора и увеличением остаточной группировки пучка.

Анализ процесса образования виртуального катода при торможении немодулированного и модулированного пучков в трубе показал, что в обоих случаях образуются колеблющиеся сгустки электронов, причем в случае моноскоростного пучка сгусток плотный, локализованный в пространстве.

Л и т е р а т у р а

1. Журавлева В. Д., Семенов С. О. // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 60.
2. Привезенцев А. П., Фоменко Г. П. // Изв. вузов: Сер. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2. № 5. С. 56.
3. Егоров Е. Н., Калинин Ю. А., Короновский А. А. и др. // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 1. С. 51.
4. Молоковский С. И., Стенюкова Р. Е., Трегубов В. Ф. // Известия Ленинградского электротехнического института. 1973. Вып. 136. С. 17.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Investigation of nonstationary electron beam dynamics in EOS EVD

S. O. Semenov

Federal State Unitary Enterprise «NPP "ALMAZ"», Saratov, Russia

The TWT one-, two- and fourstages collector characteristics with various ratio of their lengths and slow wave length are investigated, the differences under stationary and nonstationary model applications and influence of the value of beam grouping are determined. The dynamics of virtual cathode formation under monovelocity and modulated electron beam slowing is researched.

УДК 537.533

Аберрации масс-спектрометра с секторным магнитом и электростатической призмной системой

О. А. Байсанов

Военный институт Сил воздушной обороны, г. Актобе, Казахстан

Г. А. Доскеев, И. Ф. Спивак-Лавров

Актюбинский государственный университет им. К. Жубанова, г. Актобе, Казахстан

Рассмотрены аберрации и предельное разрешение ахроматического масс-спектрометра с секторным однородным магнитным полем и с электростатической системой, состоящей из иммерсионной трехэлектродной призмы и трансаксиальной линзы.

Введение

В настоящей работе исследуются аберрации и предельное разрешение ахроматического масс-спектрометра с секторным однородным магнитным полем и с электростатической системой, состоящей из иммерсионной трехэлектродной призмы и трансаксиальной линзы [1] при различных эмиттансах пучка.

Постановка задачи и компьютерный анализ

Принципиальная схема исследуемого масс-спектрометра изображена на рис. 1.

В табл. 1 приведены рассчитанные параметры ахроматического масс-спектрометра и величины, определяющие предельный эмиттанс ионного пучка, при котором последний полностью проходит через масс-спектрометр, не задевая полегающих поверхностей. За единицу длины принято расстояние d между плоскими электродами призмы и полюсами магнита. Считается, что потенциал в предметной области и области изображения равен V_0 .

Ось x декартовой системы координат совпадает с первой преломляющей гранью призмы, а начало координат — с вершиной призмы.