

На правах рукописи

Пеклевский Андрей Викторович

**НЕЛИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН
ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В РАСХОДЯЩИХСЯ АКСИАЛЬНО-
СИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Специальность: 01.04.03 – радиофизика,
01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре фотоники и физики микроволн физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор
Сухоруков Анатолий Петрович

кандидат физико-математических наук, ст.н.с.
Саввин Владимир Леонидович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент
Слепков Александр Иванович

доктор технических наук, доцент
Мозговой Юрий Дмитриевич

Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт (МИФИ)

Защита диссертации состоится "18" декабря 2008 г. в 16 часов в Центральной физической аудитории физического факультета МГУ на заседании диссертационного совета Д.501.001.67 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова.

119991, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.2, физический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научной библиотеки им. А.М. Горького МГУ им. М.В. Ломоносова (физический факультет).

Автореферат разослан " 17 " ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.67
кандидат физико-математических наук,
доцент

А.Ф. Королев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы связана с возрастающей необходимостью разработки физических основ для создания мощных и высокоэффективных преобразователей СВЧ энергии в постоянный электрический ток. Проблемы роста общего энергопотребления и энергетической безопасности, выброса промышленных отходов в атмосферу и глобальных изменений климата вызывают необходимость поиска новых экологически чистых источников энергии. Среди них - космические энергосистемы, транслирующих энергию солнечного излучения наземным потребителям с помощью направленного микроволнового луча. В последние годы эта идея получила новое развитие в связи с проектами низкоорбитальных солнечных космических электростанций с мощностью 10-100 МВт.

Для приема микроволн и преобразования их энергии в энергию электрического тока предполагается использовать ректенны, содержащие дипольные антенны и полупроводниковые диоды Шоттки. Ректенны продемонстрировали высокий КПД на этапе лабораторных испытаний, однако соединение маломощных и низковольтных ректенн в последовательно-параллельные цепи в энергетических системах неизбежно скажется на надежности и стабильности их работы. Кроме того, уровень переизлучения ректенных систем на гармониках рабочей частоты, неизбежно возникающих в процессе преобразования микроволн, может вызвать затруднения для работы существующих систем передачи информации и радиосвязи.

Альтернативой ректенам могут стать циклотронные преобразователи энергии (ЦПЭ), заметно превосходящие их по удельной мощности, величине выходного напряжения, устойчивости к электромагнитным и радиационным воздействиям и перегрузкам. Это стимулирует поиск новых и разработку уже известных механизмов взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем, когда модуляция электронного потока производится путем поперечного смещения потока, т.е. при возбуждении поперечных волн электронного потока.

Проведенные ранее в России (в 70х-90х годах в МГУ, НПО "Торий", НПО "Исток") экспериментальные и теоретические исследования циклотронных преобразователей энергии (ЦПЭ), принцип действия которых основан на взаимодействии пространственно искривленного электронного потока без электронных сгустков (отсутствие продольной модуляции в потоке) с реверсивным или спадающим до нуля магнитным полем, показали перспективность такого взаимодействия с точки зрения увеличения эффективности преобразования и реализации высоких значений выходной мощности (достигнутые значения КПД лабораторных образцов ЦПЭ превышают уровень 80% при уровне мощности 10 кВт).

Детальный анализ влияния формы, поперечных размеров и собственных полей электронного потока на процессы энергообмена в этих устройствах и роли нелинейных по радиусу компонент расходящегося магнитного поля, а также проникающих электростатических полей требует дальнейшего развития. Это облегчит оптимизацию и надежное прогнозирование экспериментальных конструкций.

Цель данной работы

1. Разработка физической модели электронного потока с парциальными спиралевидными пучками конечного сечения с целью более точного учета влияния поля пространственного заряда по сравнению с использовавшимися ранее нитевидными моделями.
2. Исследование влияния поля пространственного заряда на процесс нелинейного поперечно-волнового взаимодействия в расходящемся аксиально-симметричном магнитном поле.
3. Исследование возможности снижения разброса продольных скоростей электронного потока в процессе преобразования быстрой циклотронной волны в синхронную волну в расходящемся магнитном поле с различным его распределением.
4. Исследование квазипериодических изменений формы распределения продольных скоростей электронов при взаимодействии поперечных волн в интенсивном электронном потоке.
5. Исследование возможности прямого преобразования энергии быстрой циклотронной волны интенсивного электронного потока в энергию постоянного электрического тока в расходящихся магнитных полях под действием тормозящего электрического поля.

Научная новизна работы

1. Изучено преобразование быстрой циклотронной волны в синхронную волну электронного потока в расходящихся магнитных полях различной конфигурации.
2. Разработана физическая модель электронного потока с парциальными пучками конечного сечения, обеспечивающая существенное снижение погрешности вычислений поля пространственного заряда по сравнению с использовавшимися ранее нитевидными моделями.
3. Исследованы квазипериодические изменения формы распределения разброса продольных скоростей электронов при нелинейном взаимодействии поперечных волн в интенсивном электронном потоке
4. Исследована возможность прямого преобразования энергии быстрой циклотронной волны электронного потока в энергию постоянного электрического тока в расходящихся магнитных полях под действием тормозящего электрического поля.

Научная и практическая значимость работы

1. Разработана трехмерная физическая модель электронного потока с парциальными пучками конечного сечения и предложен метод вычисления поля пространственного заряда электронного потока. Применение данной модели позволяет снизить ошибки в вычислениях кулоновских полей на порядок по сравнению с использовавшимися ранее нитевидными моделями.
Предложенная модель применима для анализа динамики электронных потоков в поперечно-волновых устройствах СВЧ.
2. Предложен модифицированный профиль магнитного поля. В результате численного моделирования установлено, что применение данного профиля

магнитного поля при использовании оптимальных параметров поперечно-волнового преобразования позволяет сократить потери в полтора раза и более.

3. Установлено, что при нелинейном взаимодействии поперечных волн в интенсивном электронном потоке, сопровождающемся продольной группировкой электронного потока, наблюдаются квазипериодические изменения формы распределения продольных скоростей.
4. Предложена новая конструкция циклотронного преобразователя с комбинированной реверсивной областью, в которой кинетическая энергия вращения электронного потока преобразуется непосредственно в его потенциальную энергию при сохранении продольной скорости электронов на постоянном уровне.
5. Результаты работы применимы для анализа динамики электронных потоков в мощных поперечно-волновых СВЧ устройствах (ЛБВ, ЦПЭ, гироконы, магниконы и др.).

Защищаемые положения

1. Действие поля пространственного заряда в интенсивном электронном потоке приводит к нелинейному взаимодействию поперечных волн электронного потока в расходящихся магнитных полях.
2. В расходящемся аксиально-симметричном магнитном поле с $\pi/2$ -профилем снижается в полтора раза разброс продольных скоростей, вызванный взаимодействием поперечных волн.
3. Взаимодействие поперечных волн в интенсивном электронном потоке вызывает квазипериодические изменения формы распределения продольных скоростей электронов.
4. Применение тормозящего электрического поля в области расходящегося магнитного поля позволяет реализовать прямое высокоэффективное (до 94%) преобразование энергии быстрой циклотронной волны в энергию постоянного электрического тока.

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: 50^м Международном астронавтическом конгрессе (Амстердам, Нидерланды, 1999г.), Научных сессиях МИФИ-98, МИФИ-99, МИФИ-2000, МИФИ-2003 (г.Москва), Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (Красновидово/Звенигород, Московская область, 1997, 1999, 2000, 2001, 2002, 2006, 2007, 2008 гг.), семинарах лаборатории вычислительной физики ИРЭ РАН и кафедры фотоники и физики микроволн Физического факультета МГУ. По теме диссертации опубликовано 23 работы, в том числе 6 научных статей в реферируемых изданиях из списка ВАК [18-23].

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа (170 страниц) состоит из введения, 5 глав (33 параграфа), заключения, списка литературы (90 ссылок, из них 28 - на иностранные источники) и приложения. Иллюстрирована 66 рисунками (в т.ч. 12 рисунков в приложении) и содержит 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко изложено состояние изучаемой проблемы, сформулирована цель работы, рассмотрены актуальность темы, научная новизна, научная и практическая ценность результатов проведённых исследований, приведены сведения об аprobации работы и публикациях автора.

В первой главе приводится обзор публикаций по теме диссертации, обсуждается история развития и современное состояние проблемы. Рассмотрены вопросы, связанные с передачей энергии микроволновым лучом, в том числе проблемы безопасности микроволновой передачи. Рассмотрены различные устройства для обратного преобразования микроволн в постоянный ток. Наиболее распространенным типом преобразователя микроволн в постоянный электрический ток является ректенна с полупроводниковым диодом Шоттки. Наивысшее значение КПД преобразования ректенны было достигнуто в лабораторных условиях – 91,4% при входной мощности микроволн до 10 Вт на единичном экземпляре диода Шоттки для рабочей частоты 2,45 ГГц. На частоте 5,8 ГГц КПД преобразования ректенн с диодами Шоттки достигает 82% при входной мощности 50 мВт. Особое место занимает циклотронный преобразователь энергии (ЦПЭ) с эффективностью преобразования более 70%. ЦПЭ является весьма перспективным устройством для решения задач энергетики настоящего и будущего. Мощные вакуумные преобразователи с высоким выходным напряжением легче могут быть интегрированы в существующие энергосистемы по сравнению с низковольтными ректеннами, которые необходимо коммутировать в большое число последовательно-параллельных цепей для передачи энергии на высоковольтном уровне.

Аналитические результаты рассмотрения преобразования поперечных волн в нитевидном электронном пучке показали, что в бесконечно коротком симметричном реверсе аксиально-симметричного магнитного поля преобразование быстрой циклотронной волны (БЦВ) в медленную синхронную волну (МСВ) является полным (100%). В этом случае радиальное магнитное поле, описываемое б-функцией, столь велико, что мгновенно разворачивает векторы поперечной скорости (скорости вращения) в продольном направлении. Для пучка конечного сечения с относительным радиусом g (g есть отношение радиуса пучка к радиусу его циклотронного вращения) в бесконечно коротком реверсе коэффициент трансформации энергии быстрой циклотронной волны (отношение величины преобразованной энергии волны к её начальному значению) $K=1-g^2$ без учета влияния поля пространственного заряда.

Аналитическое рассмотрение в случае реверсивного магнитного поля конечной длины существенно усложняется, и результаты были получены только для нитевидного пучка в нерелятивистском (классическом) приближении в симметричном реверсе магнитного поля без учёта поля пространственного заряда. Уравнения движения были сведены к системе четырех независимых линейных дифференциальных уравнений, учитывающих пространственное изменение внешних электрического и магнитного полей. Решение представлялось в виде суперпозиции четырех поперечных волн (быстрой и медленной циклотронных, быстрой и медленной синхронных), амплитуды которых зависели от продольной координаты.

При учёте кулоновского взаимодействия в электронном потоке в правой части этих уравнений появится нелинейный относительно амплитуд поперечных волн член, учитывающий потенциальное взаимодействие элементарных пучков. Такая система уравнений не решается аналитически; подобные задачи возможно решить только численными методами.

Во второй главе приводится краткое рассмотрение нормальных волн электронного потока, распространяющихся в пучке, их связь, структура электромагнитного поля и неоднородность воздействия на электронный поток различных факторов, в том числе изученная в диссертационной работе циркулярно-поляризованная продольная группировка электронного потока.

Основными уравнениями, описывающими распространение волн в электронном потоке, являются уравнения Максвелла, уравнение непрерывности, уравнение движения электронов и уравнение для плотности тока. Чтобы решить исходные уравнения аналитически, их линеаризовали, приняв целый ряд упрощений и допущений. После таких преобразований были получены уравнения волн в форме нормальных волн. Уравнения в форме нормальных волн описывают процесс их распространения в нитевидном (бесконечно тонком) электронном пучке, движущемся с постоянной скоростью вдоль оси при наличии аксиального магнитного поля. Циклотронные волны являются волнами поперечной скорости. Синхронные волны являются волнами поперечного смещения. В расходящемся аксиально-симметричном магнитном поле под действием его радиальной компоненты быстрая циклотронная волна электронного потока преобразуется в медленную синхронную волну, поскольку эти волны имеют одинаковую скорость и знак поляризации. Это означает, что в случае полного или частичного (симметричного/асимметричного) реверса магнитного поля кинетическая энергия поперечного вращения электронного потока преобразуется в продольную кинетическую, в результате чего пучок ускоряется в продольном (осевом) направлении.

Пучок конечного сечения можно представить в виде физической модели совокупности большого количества нитевидных пучков, взаимодействующих между собой посредством кулоновского поля. Энергия этого потенциального взаимодействия зависит от расстояния между элементарными пучками и может в процессе их трехмерного движения частично трансформироваться в кинетическую энергию потока и обратно под действием внешнего статического неоднородного магнитного поля.

Электронный поток конечного сечения испытывает неоднородное воздействие со стороны расходящегося аксиально-симметричного магнитного поля. Если электронный поток смещен от оси магнитной системы, то продольное воздействие, обусловленное действием радиальной компоненты магнитного поля на поперечные кулоновские скорости v_q пучка, разнонаправлено в разных его частях (рис. 1). Пучок, таким образом, подвергается продольной группировке. Граница разнонаправленного действия продольной группировки, так же как и пучок вращается с циклотронной частотой. Циркулярно-поляризованная продольная группировка электронного потока возникает в потоке конечного сечения, смещенном от оси расходящегося аксиально-симметричного магнитного поля.

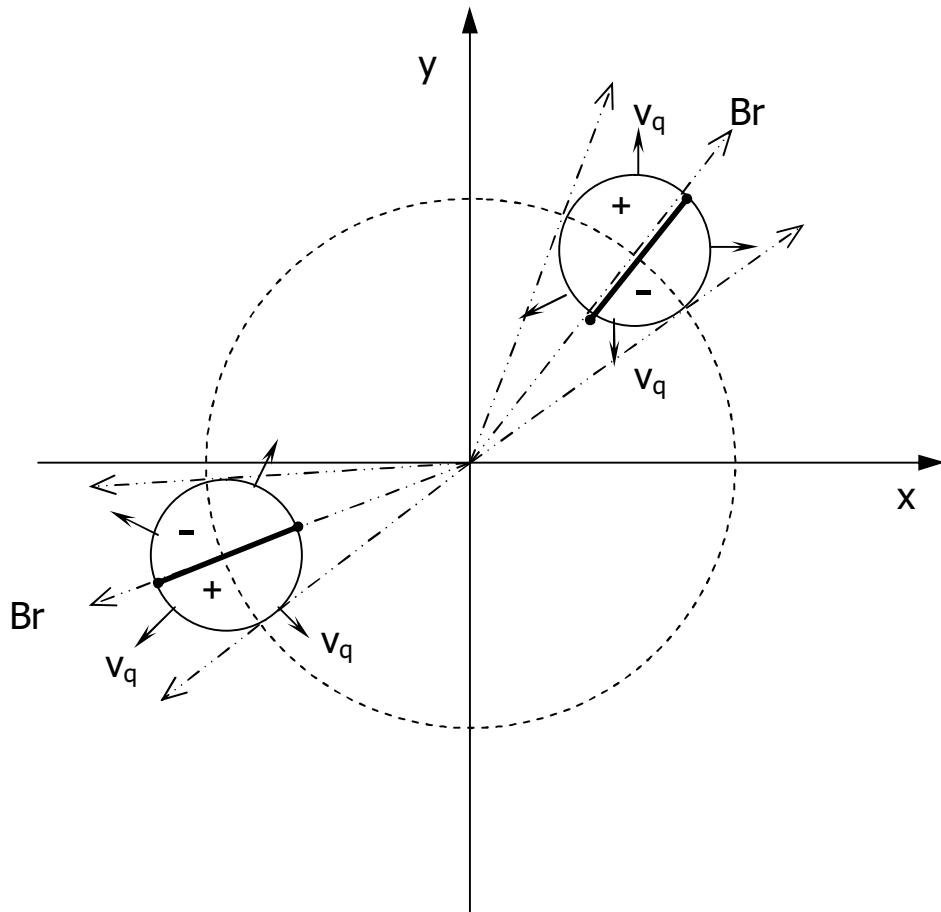


Рис. 1. Циркулярно-поляризованные продольные группировки электронного потока. B_r – линии напряженности радиального магнитного поля, v_q – поперечные кулоновские скорости. Жирная линия – граница разнонаправленного действия лоренцевых сил вдоль аксиальной оси.

В электронном потоке возможно распространение волн различных типов при разных условиях. Во многих сверхвысокочастотных приборах используется связь этих волн, поэтому при изучении таких приборов целесообразно использовать представление о связанных колебаниях (волнах). Люиселл полагал, что теория связанных волн к началу 60-х годов прошлого столетия завершена. Однако имеются случаи, когда связь между волновыми элементами нельзя назвать слабой (интенсивный электронный поток, например). Хаус рассматривал задачу в более общем виде вариационным методом, из которого видна природа и справедливость приближения слабой связи. Изложение вариационного принципа применительно к задаче об электронном потоке в случае малого сигнала было дано Старроком. Однако, аналитические методы не позволяют учитывать факторы, связанные с существенным изменением формы поперечного сечения потока, а также ряда других аспектов, приводящих к существенно нелинейному взаимодействию. Решение таких задач возможно только численными методами.

К числу таких задач относится и рассмотренная в данной диссертационной работе циркулярно-поляризованная продольная кулоновская группировка электронного потока конечного сечения, при которой имеет место нелинейное взаимодействие поперечных волн.

Третья глава посвящена вопросам численного моделирования нелинейного взаимодействия поперечных волн интенсивного электронного потока в расходящихся аксиально-симметричных магнитных полях.

Для реализации численного моделирования указанных процессов ранее была разработана трехмерная модель электронного потока с нитевидными парциальными пучками. Сила взаимодействия между нитевидными пучками при их сближении неограниченно возрастает, поэтому такая модель взаимодействия дискретных элементов не может качественно воспроизвести физическое взаимодействие в непрерывной среде. В диссертационной работе нитевидные пучки были заменены парциальными пучками с фиксированным радиусом, допускающими их взаимное проникновение и совмещение. Это позволяет воспроизводить в модели электронного потока локальные возмущения плотности пространственного заряда любой величины без «жесткого» взаимодействия между соседними пучками. «Мягкое» взаимодействие между парциальными пучками максимально приближено к взаимодействиям в непрерывной среде.

Особое внимание было уделено начальной расстановке пучков по поперечному сечению с целью исключения любых возможных симметрий, но, в то же время, обеспечивая при этом максимально равномерное распределение плотности пространственного заряда по сечению потока. После тестирования равномерности распределения кулоновского поля по поперечному сечению потока была выполнена корректировка начальной расстановки парциальных пучков (рис. 2). В результате для модели из $N \approx 1000$ пучков погрешность начального распределения кулоновского поля составляет $\sim 1\%$.

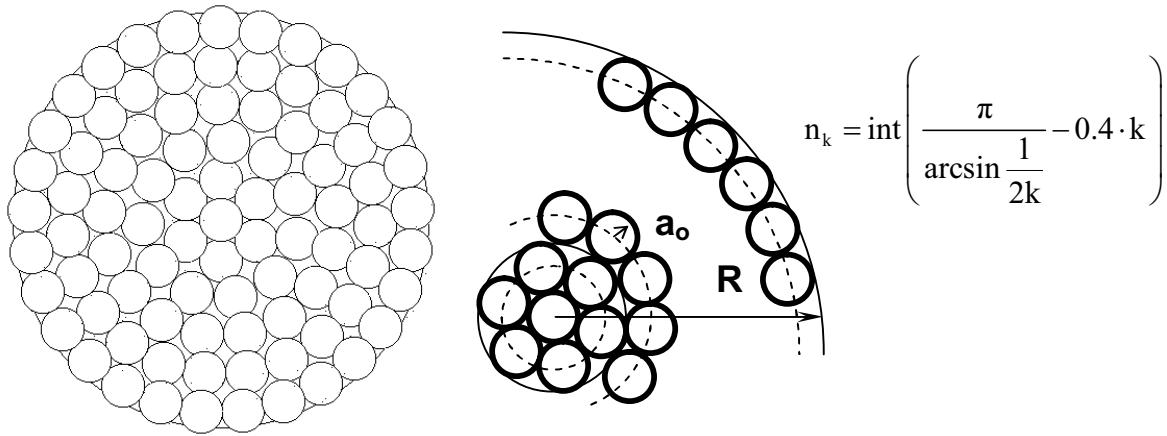


Рис. 2. Модель электронного потока. Начальное расположение элементарных пучков и эмпирическая формула для количества пучков n_k на k -м радиусе.

Предложенный метод вычисления поля пространственного заряда существенно сокращает затраты машинного времени, что позволяет производить вычисления с 10 тысячами элементарных пучков (~ 1 млн. парных взаимодействий). Этого удалось добиться, отказавшись от матричного преобразования координат и сведя задачу вычисления расстояния до равномерно заряженного стержня, заменяющего криволинейный пучок, к нескольким алгебраическим операциям над векторами. Как

и прежде, результирующее кулоновское поле в заданной точке определялось как

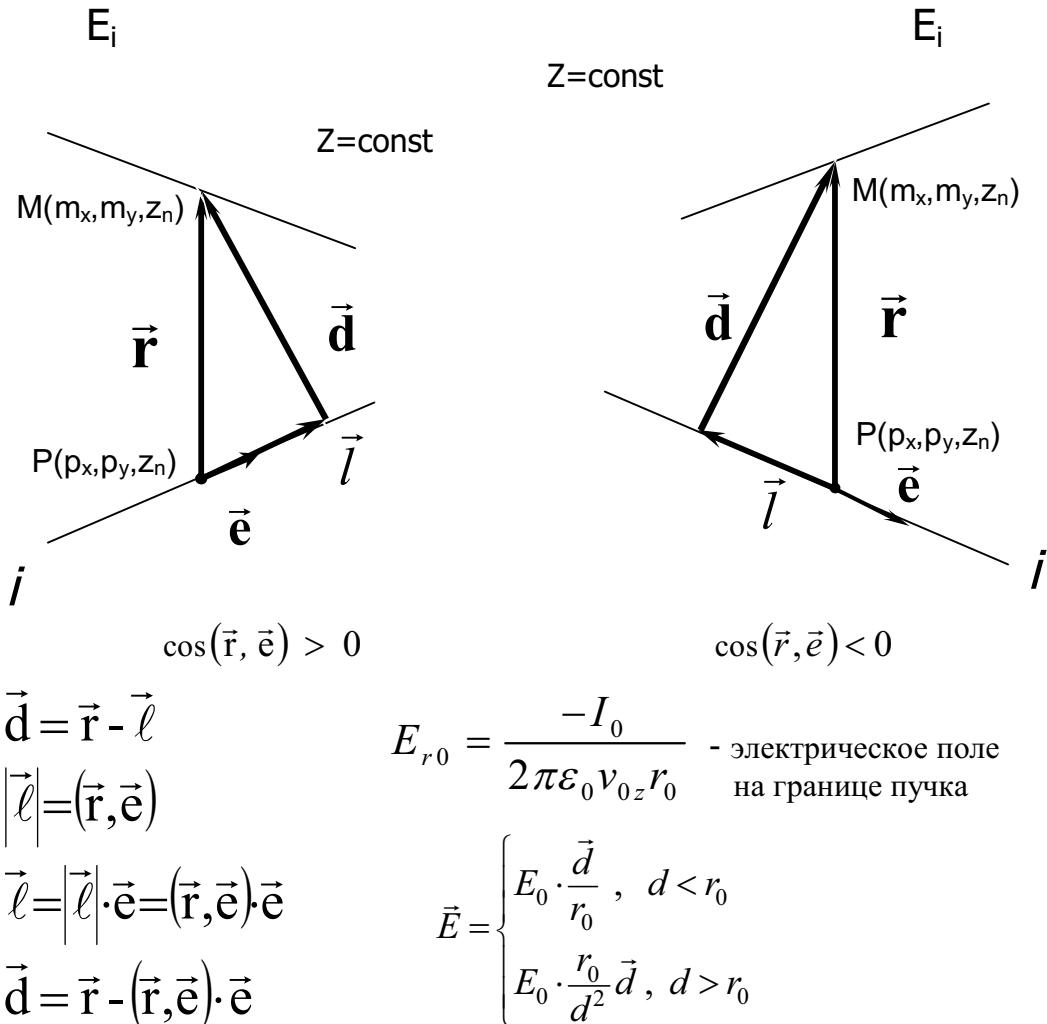


Рис. 3. К методу вычисления кулоновских полей. i -й пучок создаёт в т.М поле E_i , определяемое расстоянием точки до пучка d. Координаты направляющего вектора пучка \vec{e} определяются через компоненты его мгновенной скорости в данной точке.

суперпозиция полей всех остальных N-1 пучков (рис. 3).

Исходя из релятивистского уравнения движения электрона

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{-e}{m_o} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \left(\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}] - \frac{\vec{v}}{c^2} (\vec{v}, \vec{E}) \right),$$

где \vec{E} - вектор напряженности электрического поля, а \vec{B} - вектор индукции магнитного поля в точке нахождения частицы, после преобразований с учётом операторного уравнения $\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{v_z} \left(\frac{d}{dt} - j\omega \right)$ получим систему уравнений, составляющую основу соответствующего вычислительного алгоритма для каждого i -го пучка (с учетом опущенных индексов):

$$\frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{1}{v_z} \left(-\eta_o \sqrt{1 - \beta^2} \left(E_x + v_y B_z - v_z B_y - \frac{v_x}{c^2} \cdot V \cdot E \right) + \omega \cdot v_y \right)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial z} = \frac{1}{v_z} \left(-\eta_o \sqrt{1-\beta^2} \left(E_y + v_z B_x - v_x B_z - \frac{v_y}{c^2} \cdot V \cdot E \right) - \omega \cdot v_x \right)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{v_z} \left(-\eta_o \sqrt{1-\beta^2} \left(E_z + v_x B_y - v_y B_x - \frac{v_z}{c^2} \cdot V \cdot E \right) \right)$$

$$\frac{\partial x}{\partial z} = \frac{1}{v_z} (v_x + \omega \cdot y)$$

$$\frac{\partial y}{\partial z} = \frac{1}{v_z} (v_y - \omega \cdot x)$$

Алгоритм численного моделирования основан на интегрировании N релятивистских уравнений движения элементарных электронных пучков методом Рунге-Кутта четвертого порядка точности с использованием разработанной модели электронного потока и метода вычисления трехмерного кулоновского поля.

Проведенные на основе разработанного алгоритма вычисления показали хорошую сходимость результатов. С учетом результатов тестовых задач, программа численного моделирования обладает высокой точностью счета, достаточной для выполнения научных и инженерных задач.

В четвертой главе приводятся результаты численного моделирования нелинейного взаимодействия поперечных волн электронного потока с учетом влияния трехмерного поля пространственного заряда и различных профилей расходящегося аксиально-симметричного магнитного поля. Моделирование выполнено на примере реверсивной области ЦПЭ – мощного и перспективного для практического применения электровакуумного прибора с интенсивным трехмерным электронным потоком.

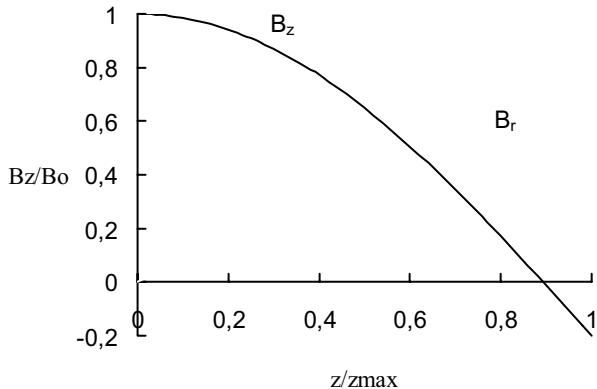
В области преобразования ЦПЭ действует стационарное аксиально-симметричное расходящееся магнитное поле. Его распределение показано на рис. 4а. Глубина реверса магнитного поля задается параметром $C_0 = B_1 / B_0$, где B_0 , B_1 – значения магнитного поля на оси системы в начале и конце области соответственно. Коэффициент C_0 изменяется от -1 до 1 , позволяя варьировать значение магнитного поля в конце области ($z = z_{max}$) от $-B_0$ до B_0 . Значение $C_0=1$ соответствует случаю однородного магнитного поля. Протяжённость области реверса z_{max} магнитного поля выражается в начальных длинах циклотронных волн λ_c параметром $N_c = z_{max} / \lambda_c$. Как видно из рисунка, значение радиального магнитного поля, определяющего интенсивность преобразования поперечных волн, в конце области спадает до нуля. Это означает, что при таком распределении магнитного поля преобразование поперечных волн в конце области практически не происходит и её заключительный участок используется не эффективно.

Предложено использовать новый профиль распределения магнитного поля на оси системы ($\pi/2$ -профиль), представленный на рис. 4б, при котором интенсивность преобразования монотонно растет вдоль всей области и достигает максимума в конце области преобразования в условиях максимально деформированного и расширявшегося электронного потока. Предложенный профиль магнитного поля интересен не только с теоретической, но и с практической точки зрения, поскольку он существенно проще реализуется в практических конструкциях.

В общем виде косинусоидальное распределение магнитного поля на оси системы описывается выражением:

$$B(z) = B_0 \left[\frac{C_0 - \cos \Theta}{1 - \cos \Theta} + \frac{1 - C_0}{1 - \cos \Theta} \cdot \cos \left(\Theta \frac{z}{z_{\max}} \right) \right], \quad 0 < z < z_{\max}, \quad \Theta \neq 2\pi n.$$

a) $\theta = \pi$



б) $\theta = \pi/2$

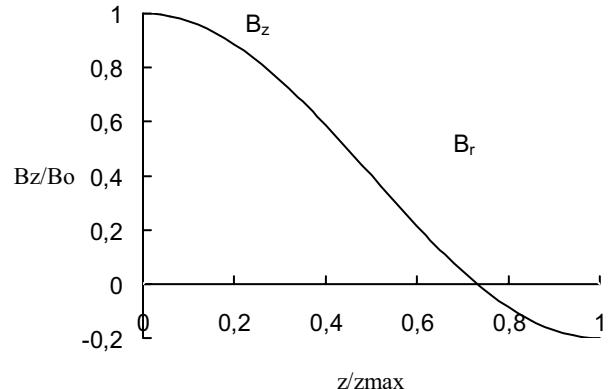


Рис. 4. Распределение магнитного поля вдоль области преобразования ЦПЭ. B_z – распределение поля на оси, B_r – распределение радиальной компоненты поля на расстоянии циклотронного радиуса от оси.

Значению параметра $\theta = \pi/2$ соответствует предложенный профиль поля, а значению $\theta = \pi$ – прежний, использовавшийся ранее.

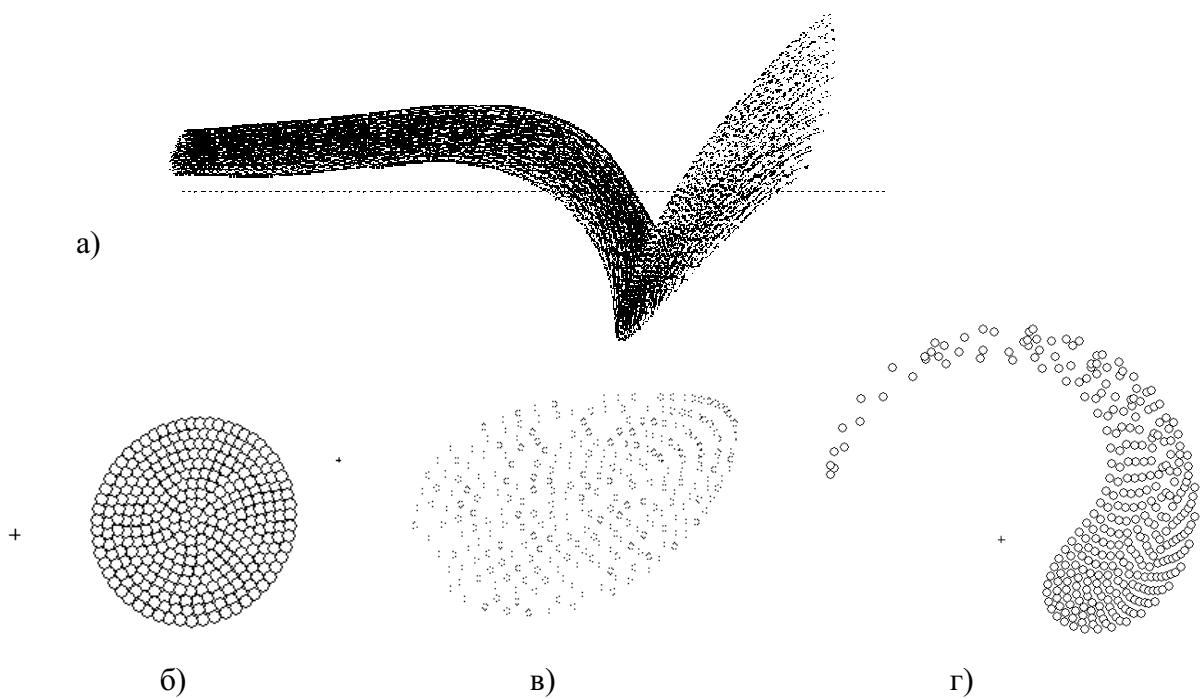


Рис. 5. Вид электронного потока ($N=320$) в процессе движения в реверсивной области ЦПЭ (а) и формы поперечных сечений: б) – в начале области, в) – в конце области, $K=88\%$, $\delta V_z=18\%$, г) – в конце области, $K=47\%$, $\delta V_z=95\%$.

Численное моделирование движения электронного потока в расходящихся аксиально-симметричных магнитных полях показало, что в результате нелинейного взаимодействия поперечных волн форма поперечного сечения потока деформируется (рис. 5), и при неоптимальных параметрах преобразования поперечных волн сильная деформация может привести к разрушению потока как целого.

В процессе моделирования производилось наблюдение за величинами коэффициента трансформации K (отношение величины преобразованной энергии быстрых циклотронных волн потока к их суммарному первоначальному значению), эффективности преобразования E (отношение приращения энергии медленной синхронной волны самого медленного электрона потока к его начальной суммарной поперечной кинетической энергии) и относительного разброса продольных скоростей δV_z (отношение разницы величин продольных скоростей самого быстрого и самого медленного электронов к начальному значению продольной скорости), смысл которых пояснён на рис. 6.

Эффективность рекуперации электронного потока существенным образом зависит от величины разброса продольных скоростей в нём. Поэтому с точки зрения

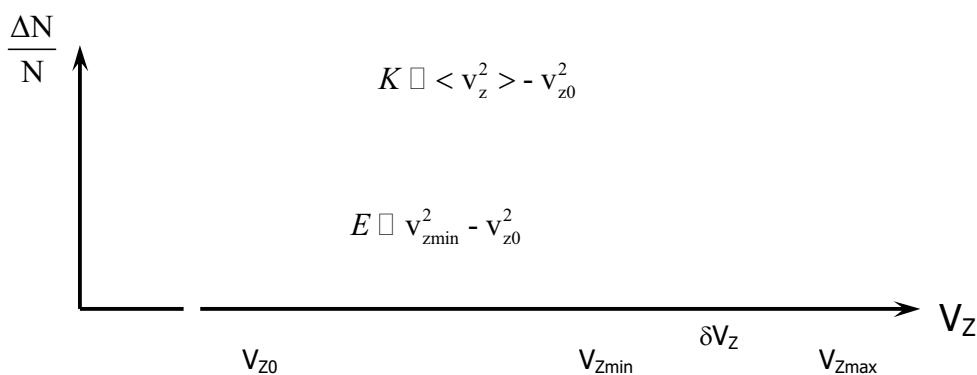


Рис. 6. К определению величин трансформации волн K и эффективности преобразования E . $\Delta N/N$ – распределение продольных скоростей, V_{z0} – начальное значение продольной скорости потока, $\delta V_z = V_{z\max} - V_{z\min}$.

возможности создания высокоэффективных электровакуумных приборов необходимо совместное рассмотрение в области преобразования как среднестатистических величин (K), так и величин, зависящих от поведения самого медленного электрона ($E, \delta V_z$).

На рис. 7 показаны результаты вычислений наблюдаемых величин K , E и δV_z вдоль области. При выключенном кулоновском поле все величины растут монотонно. При включенном кулоновском поле имеет место нелинейное взаимодействие поперечных волн электронного потока. Разброс продольных скоростей в потоке имеет квазипериодический характер, который нарушается из-за многократного расширения потока. Важно отметить, что кулоновское взаимодействие может не только увеличивать разброс скоростей, но и уменьшать его, как видно из графика. Под действием поля пространственного заряда пучок вращается вокруг собственной оси, усредняя при этом неоднородность воздействия

со стороны магнитного поля. Поэтому очень важно выбрать такие значения начальных параметров, которые обеспечивали бы максимально эффективное потенциальное кулоновское взаимодействие поперечных волн потока, при котором форма его поперечного сечения испытывает минимальные деформации, что очень важно для работы вращательного механизма усреднения неоднородностей.

Значения наблюдаемых величин зависят от многих параметров, поэтому их итоговые значения для большей информативности удобно изображать в виде контурных диаграмм с линиями постоянного уровня, которые позволяют наблюдать за изменениями рассматриваемой величины от двух параметров. Зависимости итоговых значений наблюдаемых величин K , E и δV_z от глубины и протяжённости реверса магнитного поля показаны на рис. 8. При включении кулоновского поля контуры величин K и E приобретают немонотонный волнообразный характер; появляются локальные максимумы. Локальные максимумы соответствуют оптимальным значениям параметров, при которых механизм усреднения неоднородностей работает эффективно. Диаграммы показывают, что наиболее существенно нелинейность взаимодействия поперечных волн сказывается на величине разброса продольных скоростей.

Диаграммы результатов моделирования с различными профилями магнитного поля представлены на рис. 9. Применение предложенного $\pi/2$ -профиля позволяет повысить эффективности преобразования поперечных волн и снизить разброс продольных скоростей примерно в полтора раза (с 15 до 10%), что позволит повысить эффективность рекуперации электронного потока в коллекторной области.

Моделирование различных режимов преобразования поперечных волн в коротком реверсе магнитного поля ($N_c \leq 1$) показало, что результат практически не зависит от протяженности области (в пределах указанного диапазона) и профиля магнитного поля. Это позволяет использовать режим короткого реверса для предварительных оценок и поиска оптимальных значений прочих параметров,

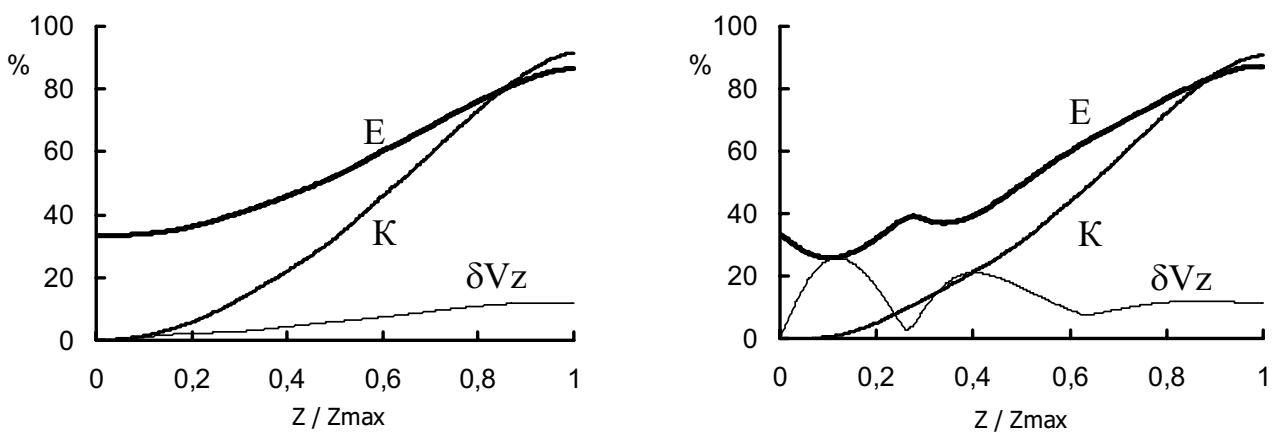


Рис. 7. Зависимости величин коэффициента трансформации волн K , эффективности преобразования E и разброса продольных скоростей δV_z вдоль области преобразования длиной z_{max} . при а) - выключенном и б) - включенном кулоновском поле. Значения параметров относительной мощности $W=2$, относительного радиуса пучка $g=0.5$, глубины реверса $C_0=-0.1$. Ток пучка 2 А, напряжение 5 кВ.

связанных с интенсивностью потока и его поперечными размерами.

Распределение продольных скоростей электронного потока существенно видоизменяется в процессе нелинейного взаимодействия поперечных волн. Как видно из рисунка 10, профили квазипериодически повторяются (1-6, 2-8 и пр.), что является подтверждением предложенного во второй главе механизма циркулярно-поляризованной продольной группировки электронного потока. Поскольку во второй половине области преобразования продольное фокусирующее магнитное поле существенно ослаблено, пучок значительно расширяется (в несколько раз), что приводит к нарушению циркулярной поляризации продольной группировки и её периодичности. Сильное влияние кулоновского взаимодействия на распределение продольных скоростей в потоке позволяет изучать нелинейное взаимодействие поперечных волн посредством наблюдения за указанным распределением. В процессе движения электронного потока вдоль области преобразования при выключенном кулоновском поле начальное распределение продольных скоростей плавно переходит в конечное распределение. Гистограммы показывают взаимосвязь распределения продольных скоростей в потоке с воздействием кулоновского поля на процесс преобразования поперечных волн электронного потока.

В пятой главе приводятся результаты численного моделирования нелинейного взаимодействия поперечных волн электронного потока с учетом влияния тормозящего электростатического поля. Актуальность изучения процесса преобразования поперечных волн в присутствии тормозящего электростатического поля связана с тем, что в практических конструкциях не удается полностью изолировать пространственно-разделенные области от взаимного влияния, и в область преобразования ЦПЭ проникает тормозящее электрическое поле коллектора.

Численное моделирование показало возможность преобразования поперечных волн в присутствии электрического поля. Процесс характеризуется существенным (вдвое и более) увеличением разброса продольных скоростей потока. Как и в случае отсутствия тормозящего электрического поля (параметр $J=0$), применение $\pi/2$ -профиля магнитного поля ($\theta = \pi/2$) дает более высокие характеристики.

Исследовалась возможность полного ($J=1$) и частичного ($J=0.5$) преобразования приращения энергии медленных синхронных волн потока в потенциальную электрическую энергию (рис. 11). Прямое преобразование имеет систему ярко выраженных квазипериодических локальных максимумов наблюдаемых величин. Последовательность гребней локальных минимумов разброса продольных скоростей также имеет квазипериодический характер. Отличительной особенностью таких режимов является наличие параметрических областей срыва процесса преобразования из-за разрушения электронного потока как целого.

Возможность прямого преобразования энергии быстрых циклотронных волн электронного потока в потенциальную электрическую энергию позволяет предложить конструкцию ЦПЭ с комбинированной областью, в которой величина проникающего тормозящего поля предколлектора обеспечивала среднюю скорость движения потока на постоянном уровне. Такая конструкция имела бы не только более выгодные массогабаритные характеристики, но и обеспечивала более качественную рекуперацию энергии электронного потока.

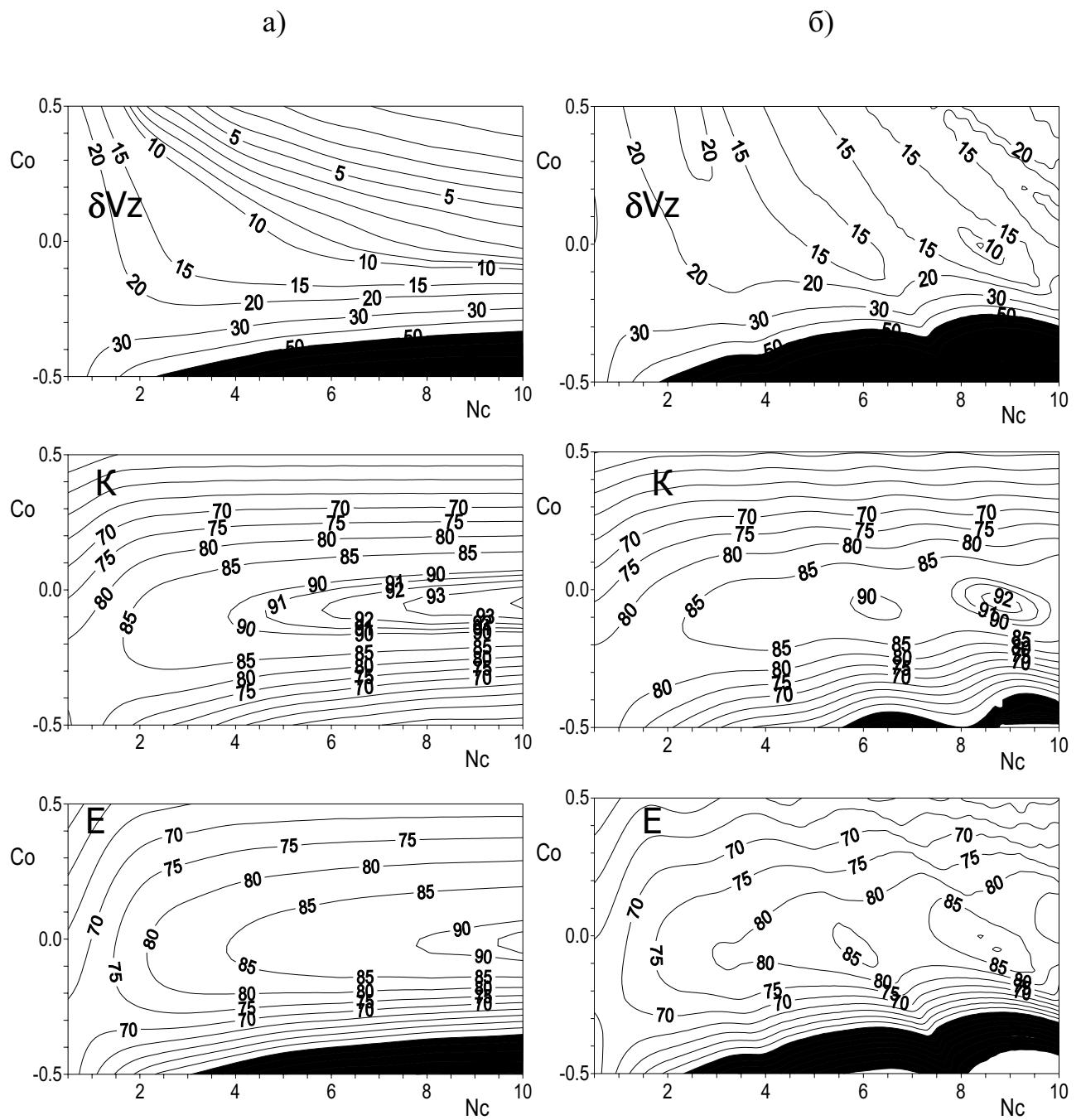


Рис. 8. Линии уровней относительного разброса продольных скоростей δV_z , коэффициента преобразования энергии поперечных волн К, эффективности преобразования энергии поперечных волн Е в процентном выражении в зависимости от параметров глубины и протяженности реверса C_0 и N_c при выключенном – а) и включенном – б) кулоновском поле. Относительный радиус $g=0.5$, параметр мощности $W=2$, параметр профиля магнитного поля $\Theta = \pi$.

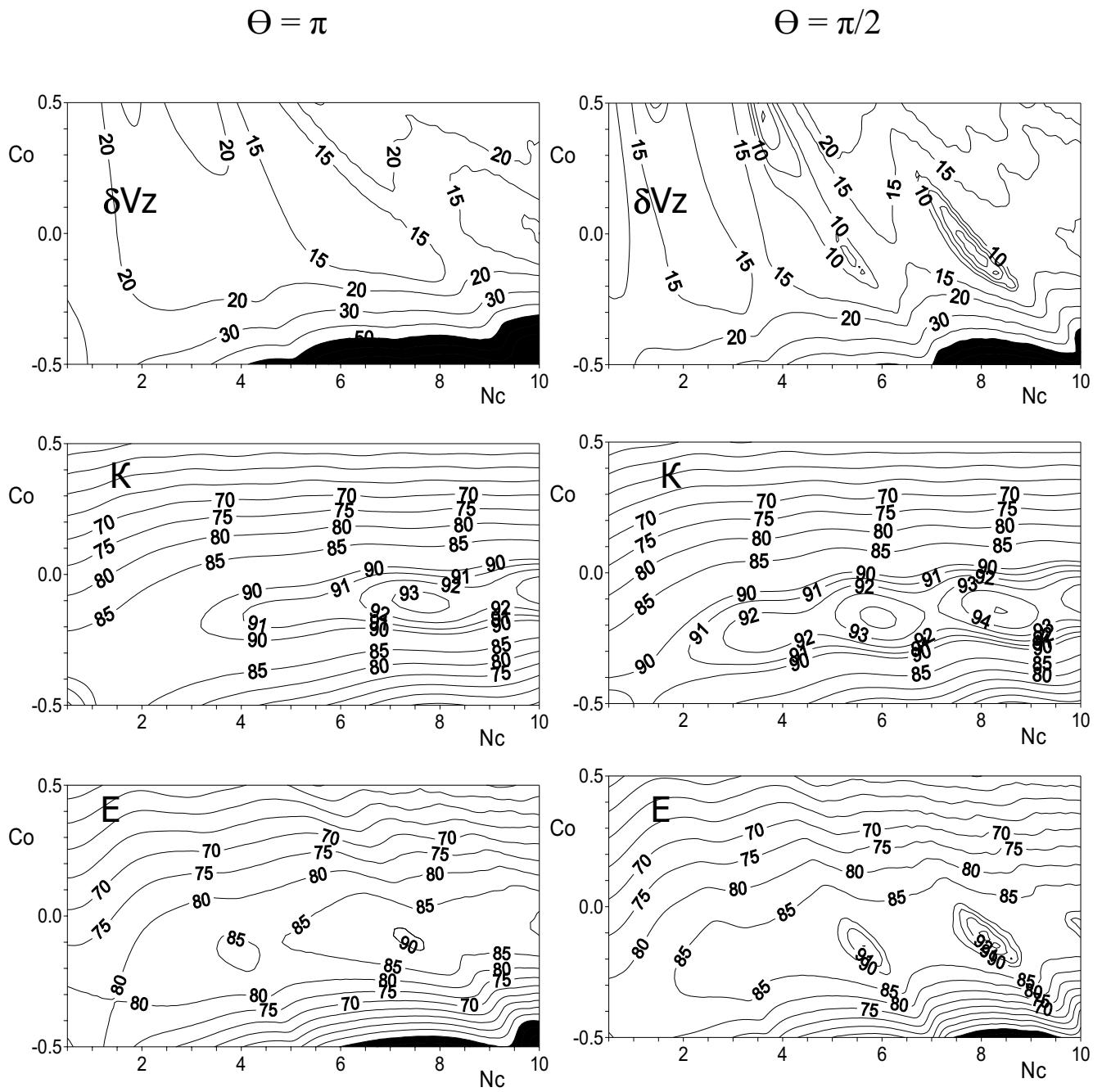


Рис. 9. Линии уровней относительного разброса продольных скоростей δV_z , коэффициента преобразования энергии поперечных волн K , эффективности преобразования энергии поперечных волн E в процентном выражении в зависимости от параметров глубины и протяженности реверса магнитного поля C_0 и N_c . Ускоряющее напряжение пучка 5кВ, ток 2А, относительный радиус $g=0.2$, параметр мощности $W=5$, значения параметра профиля магнитного поля $\Theta = \pi$ и $\Theta = \pi / 2$ соответственно. Кулоновское поле включено.

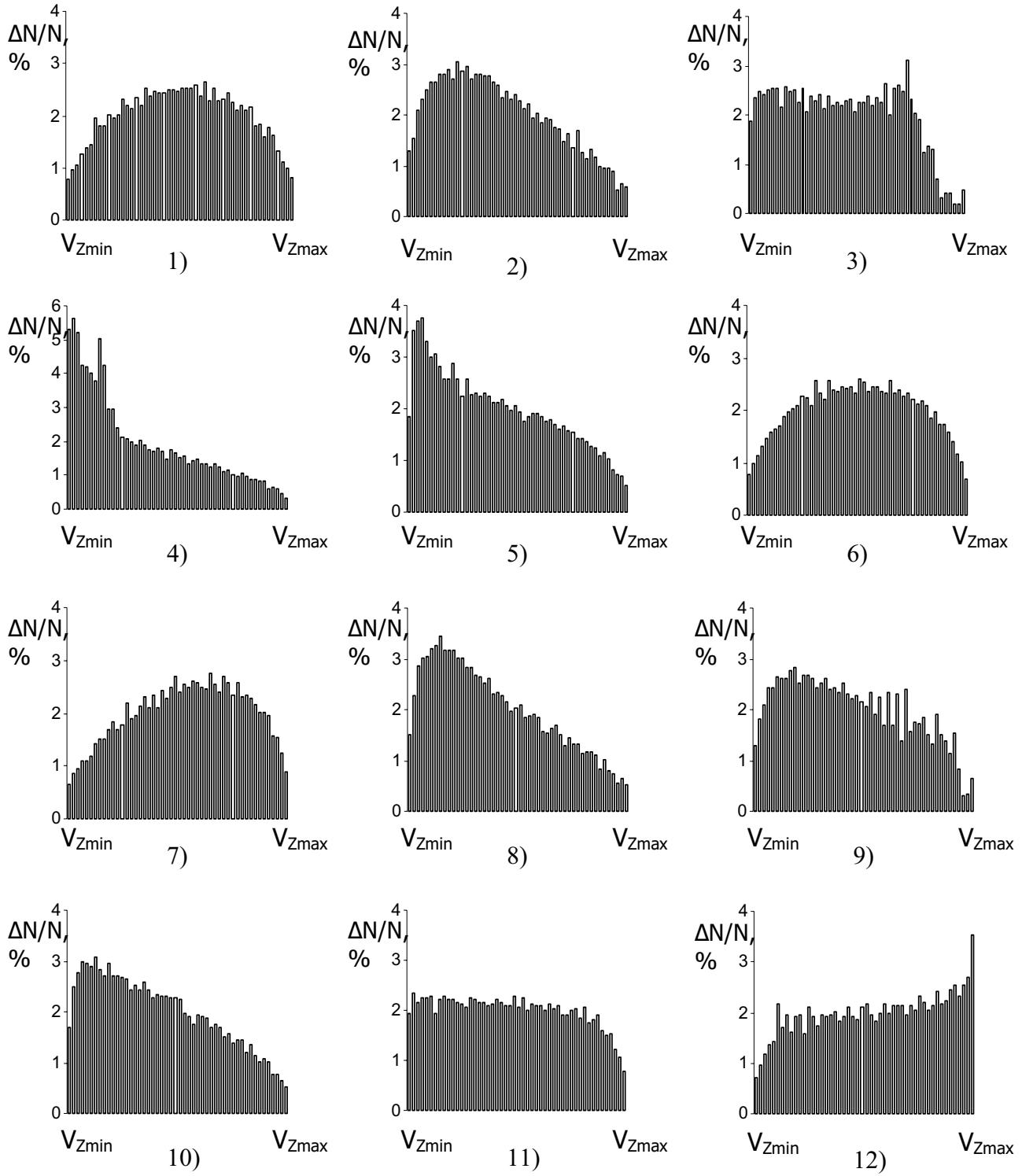


Рис. 10. Распределение продольных скоростей электронного потока в процессе его движения в расходящемся магнитном поле для различных значений z/z_{\max} : 1) – 0.09, 2) – 0.209, 3) – 0.259, 4) – 0.273, 5) – 0.284, 6) – 0.305, 7) – 0.382, 8) – 0.511, 9) – 0.627, 10) – 0.711, 11) – 0.900, 12) – 1.0. Ускоряющее напряжение пучка 5кВ, ток 2А, относительный радиус $g=0.2$, параметр мощности $W=5$, параметры $C_0 = -0.1$, $N_C = 4.4$, параметр профиля магнитного поля $\Theta=\pi/2$. Количество элементарных пучков $N=2700$.

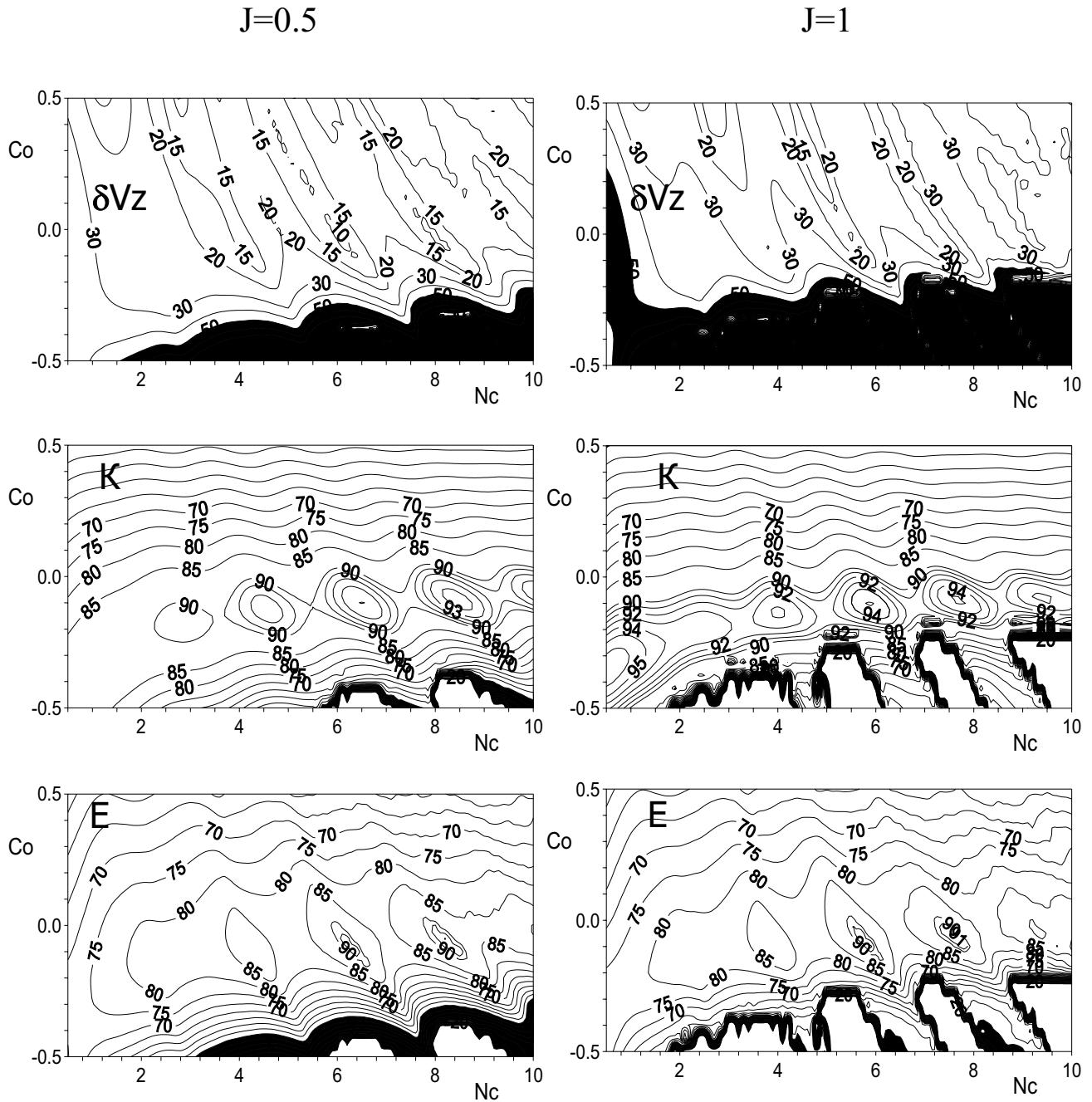


Рис. 11. Линии уровней относительного разброса продольных скоростей δV_z , коэффициента преобразования энергии поперечных волн K , эффективности преобразования энергии поперечных волн E в процентном выражении в зависимости от параметров глубины и протяженности реверса магнитного поля C_0 и N_c в присутствии тормозящего электростатического поля с параметром $J=0.5$ и $J=1$ соответственно. Ускоряющее напряжение пучка 5кВ, ток 2А, относительный радиус $g=0.5$, параметр мощности $W=2$, параметр профиля магнитного поля $\Theta = \pi/2$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Действие поля пространственного заряда в интенсивном электронном потоке в присутствии неоднородного радиального магнитного поля приводит к нелинейному взаимодействию поперечных волн электронного потока.
2. Разработана трехмерная физическая модель электронного потока с парциальными пучками конечного сечения и предложен метод вычисления поля пространственного заряда электронного потока. Применение данной модели позволяет снизить погрешность в вычислениях кулоновских полей на порядок по сравнению с использовавшимися ранее нитевидными моделями. Предложенная модель применима для анализа динамики электронных потоков в поперечноволновых устройствах СВЧ.
3. Применение предложенного $\pi/2$ -профиля магнитного поля при использовании интенсивных электронных потоков позволит повысить эффективность преобразования поперечных волн, сократив потери в полтора раза и более.
4. Поле пространственного заряда приводит к усреднению неоднородности воздействия радиальной компоненты магнитного поля по поперечному сечению пучка.
5. При взаимодействии поперечных волн в интенсивном электронном потоке происходит периодическое изменение формы распределения продольных скоростей, обусловленное продольной группировкой электронного потока, смещенного от оси магнитной системы.
6. Применение тормозящего электрического поля в расширяющихся магнитных полях позволяет осуществить высокоэффективное (до 94%) прямое преобразования энергии быстрой циклотронной волны электронного потока в энергию постоянного электрического тока.
7. Предложена новая конструкция циклотронного преобразователя с комбинированной реверсивной областью, в которой кинетическая энергия вращения электронного пучка преобразуется непосредственно в его потенциальную энергию при сохранении продольной скорости электронов на постоянном уровне.
8. Результаты работы применимы для анализа динамики электронных потоков в мощных поперечноволновых СВЧ устройствах (ЛБВ, ЦПЭ, гироконы, магниконы и др.).

Список публикаций по теме диссертации:

1. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. О возможности увеличения КПД циклотронного преобразователя энергии. // Труды VI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», Московская область, Красновидово, с.65, 1997г.
2. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. О влиянии поля кулоновских сил на КПД реверсивной области циклотронного преобразователя энергии. // Труды научной сессии МИФИ-98, часть 4, с.80, 1998.

3. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Анализ электронных процессов в реверсивной области циклотронного преобразователя энергии с тормозящим электрическим полем // Труды VII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», Московская область, Красновидово, т.1, с.84, 1999.
4. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Перспективы повышения мощности циклотронного преобразователя энергии. // Труды научной сессии МИФИ-99, том 5, с.167, 1999г.
5. Peklevskiy A.V., Savvin V.L. Modernization of Reversal Region of Cyclotron-Wave Converter. // Proc. 50th International Astronautical Congress, Amsterdam, Netherlands, 1999.
6. Пеклевский А.В., Саввин В.Л.. Модель электронного потока с парциальными пучками конечного радиуса // Труды научной сессии МИФИ-2000, часть 4, с.66, 2000г.
7. Казарян Г.М., Модебадзе Т.К., Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Влияние проводящих границ на динамику электронного потока в реверсивной области// VII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», Красновидово, 2000, Труды, часть 2, с.11.
8. Казарян Г.М., Модебадзе Т.К., Пеклевский А.В., Саввин В.Л. О динамике электронных пучков с увеличенным радиусом в реверсивных магнитных полях // VIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», Красновидово, 2001, Труды, часть 1, с. 103.
9. Казарян Г.М., Модебадзе Т.К., Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Циклотронный преобразователь энергии для передачи энергии СВЧ-пучком //27 Гагаринские чтения, МАТИ РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2001, с. 152.
10. Казарян Г.М., Ролдугина Т.К., Пеклевский А.В., Саввин В.Л., Сухоруков А.П. О динамике электронного пучка в реверсивной области циклотронного преобразователя СВЧ энергии //Межвузовская конференция «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ», Саратов, 2001, Труды, с. 23.
11. Казарян Г.М., Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Влияние пространственного заряда на динамику электронных пучков в реверсивной области циклотронного преобразователя энергии // VIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», Красновидово, 2002, Труды, часть 2, с. 98.
12. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Эффективность преобразования энергии циклотронного вращения электронного пучка в реверсивном магнитном поле // Труды научной сессии МИФИ, 2003.
13. Казарян Г.М., Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Динамика винтового электронного пучка в поле циркулярно поляризованной бегущей волны // Труды научной сессии МИФИ, 2003, том 8, с. 58.
14. Savvin V., Bugaev S., Kazarian G., Peklevskiy A. Development of 3-D Electron Beam Models for Transfer-Wave Devices.//Proceedings of 4-th IEEE IVEC, 2003, Seoul, Korea, p.358-359.

15. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. О динамике электронных потоков в расширяющихся магнитных полях. // X Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», Звенигород, 2006.
16. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Спектр скоростей и динамика электронных потоков в расширяющихся магнитных полях. // XI Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн», Звенигород, 2007.
17. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Нелинейные поперечно-волновые взаимодействия в расходящихся аксиально-симметричных магнитных полях. // XI Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», Звенигород, 2008.
18. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. О возможности увеличения КПД циклотронного преобразователя энергии // Вестник МГУ. Серия «Физика и астрономия», 1998, № 2, с.69.
19. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Анализ электронных процессов в реверсивной области циклотронного преобразователя энергии с тормозящим электрическим полем. // Известия РАН, Серия физическая, 1999, том 63, №12, стр.2368.
20. Саввин В.Л., Пеклевский А.В., Казарян Г.М., Ролдугина Т.К. О динамике электронных пучков с большим начальным радиусом в реверсивных магнитных полях. // Известия РАН, Серия физическая, 2001, том 65, №12, с. 1695-1699.
21. Ван Хуадзыон, Казарян Г.М., Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Влияние пространственного заряда на динамику электронных пучков в реверсивной области циклотронного преобразователя энергии. // Известия РАН, Серия физическая, 2003, том 67, №12, с. 1684-1687.
22. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Спектр скоростей и динамика электронных потоков в расширяющихся магнитных полях. // Известия РАН, Серия физическая, 2008, том 72, №1, с. 139-142.
23. Пеклевский А.В., Саввин В.Л., Сухоруков А.П. Нелинейные поперечно-волновые взаимодействия в расходящихся аксиально-симметричных магнитных полях //Известия РАН, Серия физическая, 2008, том 72, №12, с. 1785-1788.