

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра Физики открытых систем

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ И  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В РЕЛЯТИВИСТСКОМ  
ЭЛЕКТРОННОМ ПОТОКЕ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 214 группы  
направления 03.04.01 — Прикладные математика и физика  
факультета ФНП  
Бадарина Артема Александровича

Научные руководители

профессор, д. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_

А. Е. Храмов

доцент, к. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_

С. А. Куркин

Заведующий кафедрой

д. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_

А. А. Короновский

Саратов 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Релятивистские электронные потоки (РЭП) представляют значительный интерес для современной электроники больших мощностей. Активные исследования процессов транспортировки и развития различных типов неустойчивостей в РЭП определяется, во-первых, широтой их применения: интенсивные пучки заряженных частиц используются во многих современных генераторах и усилителях СВЧ и ТГц диапазонов [1], таких как гиротроны, виркаторы, релятивистские ЛБВ, ЛОВ и магнетроны, ЛСЭ и других. Во-вторых, РЭП в пространстве дрейфа часто демонстрируют сложную нестационарную динамику пространственного заряда и образование электронных структур [2]. В частности, при выполнении определённых условий в РЭП могут развиваться различные неустойчивости (например, диокотронная, слиппинг, пирсовская, бурсиановская неустойчивости и др.) [3–5].

Исследованию физических процессов, происходящих в РЭП при развитии данных неустойчивостей, посвящены многие теоретические и экспериментальные работы [6, 7]. Тем не менее, вопрос о взаимодействии и сосуществовании различных неустойчивостей, условия для одновременного развития которых могут выполняться при определённых параметрах системы, остается до сих пор малоизученным.

В то же время релятивистские пучково-пламенные системы, использующие для генерации электромагнитного излучения колебания виртуального катода являются перспективными устройствами вакуумной и плазменной СВЧ электроники больших мощностей [8]. Генераторы на виртуальном катоде (такие как виркаторы, редитроны, виртоды и др.) представляют особый класс СВЧ генераторов на тормозном излучении, работа которых основана на формировании ВК в электронном потоке со сверхкритическим током. В настоящее время такие устройства активно исследуются и рассматриваются в качестве источников импульсного высокомоощного СВЧ излучения, а также систем для ускорения ионов и нагрева плазмы [1]. Одним из главных достоинств данных приборов являются генерация сверхмощного электромагнитного излучения при предельной простоте конструкции. Недостатками являются низкая эффективность, обычно не превышающая одного процента, и низкая частота генерации. [9].

Из вышесказанного вытекают цели данной работы: изучение особенностей одновременного развития и взаимодействия бурсиановской и диокотронной

неустойчивостей в релятивистском электронном потоке; изучение возможности продвижения пучково-плазменных систем в более высокий частотный диапазон с сохранением высокой выходной мощности.

Для достижения данных целей при выполнении выпускной работы были решены следующие научные задачи:

- Разработка модели релятивистского виркатора в программной среде CST Particle Studio;
- Изучение особенностей одновременного развития неустойчивостей в пространстве дрейфа виркатора;
- Изучение механизмов и закономерностей образования пространственно-временных структуры в релятивистском электронном потоке со сверхкритическим током;
- Изучение режимов генерации высших гармоник в модели виркатора;
- Изучение процессов взаимодействия виртуальных катодов в пространстве дрейфа многолучевого релятивистского виркатора;
- Разработка модели релятивистского виркатора с эллиптическим резонатором;

Настоящая работа состоит из трех глав:

- **Глава 1** - Исследуемая модель.
- **Глава 2** - Исследование процессов сосуществования бурсиановской и диокотронной неустойчивостей в релятивистском электронном потоке.
- **Глава 3** - Исследование перспективных моделей генераторов на виртуальном катоде.

По результатам дипломной работы опубликованы статьи в рецензируемых таких научных журналах, как *Physics of Plasmas*, *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*, *Письма в ЖТФ*, *Известия РАН. Серия физическая*, [7, 10–14], глава в коллективной монографии [15]

## Основное содержание работы

В первой главе настоящей работы представлены особенности создания модели виркатора на пролетном токе в среде CST Particle Studio для исследования физических механизмов развития, сосуществования и взаимодействия бурсиановской/пирсовской и диокотронной неустойчивостей в релятивистском электронном потоке. Проведен численный анализ данной системы с использованием пакета CST Particle Studio.

В ходе проведенных тестовых расчетов в CST PS была обнаружена новая численная неустойчивость, свойственная моделям с интенсивными электронными пучками (особенно с РЭП), либо длинным системам. Для её анализа инжектируемый ток в систему был выбран докритическим, то есть, фактически, исследуемая модель представляет из себя вакуумную трубу дрейфа, через которую пролетает электронный поток, оседающий впоследствии на коллекторе и на стенках трубы дрейфа. На примере данной системы также продемонстрируем особенности, связанные с разделением физических и численных неустойчивостей.

Обнаруженная численная неустойчивость приводит к образованию характерной “ряби” в пучке (см. рис 1). Было установлено, что характерный размер образующихся электронных структур определяется пространственным шагом по сетке вдоль распространения пучка и практически не зависит от разбиения в перпендикулярной плоскости, что говорит о численной природе данного явления.

Последнюю особенность хорошо иллюстрирует рисунок 1, на котором изображены характерные конфигурационные портреты пучка и соответствующие им спектры колебаний электрического поля для различных шагов сетки вдоль распространения потока. Из рисунка видно, что с уменьшением шага  $\Delta z$  наблюдается уменьшение характерного размера образующихся в пучке структур. Одновременно с этим частота в спектре, связанная с развитием численной неустойчивости, возрастает обратно пропорционально  $\Delta z$ .

Обратим внимание на то, что обнаруженная численная неустойчивость схожа с численной неустойчивостью Черенкова, однако, имеет принципиальные отличия. Во-первых, её характеристики не зависят от начальной скорости электронного потока. Характерная частота неустойчивости определяется только дискретизацией пространственной сетки. Во-вторых, уменьшение шага

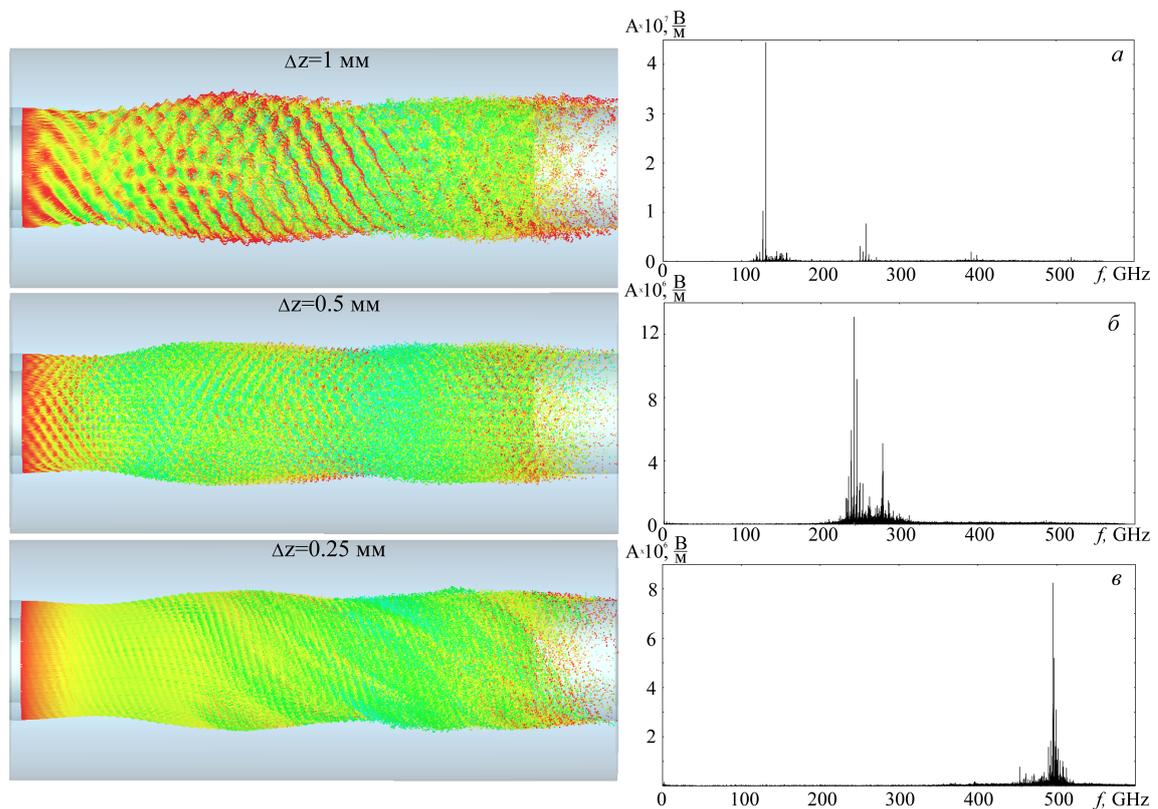


Рисунок 1 – Характерные конфигурационные портреты пучка и соответствующие им спектры продольных колебаний напряжённости электрического поля в области пучка, полученные при  $B=1$  Тл и  $I=6$  кА. Фрагменты а, б, в, соответствуют различным разбиениям пространственной сетки в продольном направлении а –  $\Delta z = 1$  мм; б –  $\Delta z = 0.5$  мм; в –  $\Delta z = 0.25$  мм.

пространственной сетки не приводит к подавлению неустойчивости. Борьба с обнаруженной неустойчивостью возможно также, как и с численной неустойчивостью Черенкова: введением подходящего дисперсионного материала, который будет способствовать затуханию электромагнитного поля на характерных частотах. Материал следует задавать таким образом, чтобы его передаточная характеристика была максимально близка к единице (как у вакуума) в области исследуемых частот, а в области частот неустойчивости стремилась к нулю.

Во второй главе представлены результаты анализа развития и взаимодействия бурсиановской и диокотронной неустойчивостей в кольцевом релятивистском электронном потоке, распространяющемся в цилиндрической камере дрейфа, в зависимости от толщины пучка, величины инжектируемого тока и внешнего однородного магнитного поля. Так, если максимальное значение тока  $I_0$  выбрано таким, что  $I_0 > I_{cr}$ , то в системе, когда  $I_{cr} < i(t) < I_0$ , где  $i(t)$  и  $I_{cr}$  – мгновенное и критическое значения силы тока соответственно, начинается развиваться бурсиановская неустойчивость, и формируется нестационарный ВК, который обычно характеризуется сложной пространственно-временной ди-

намикой [16, 17].

Одновременно, релятивистский электронный поток обладает сильным собственным магнитным полем, благодаря которому в нём создаются условия для развития диокотронной неустойчивости даже в отсутствии внешнего магнитного поля [7].

В ходе проведённых исследований были детально изучены особенности формирования ВК в рассматриваемой модели релятивистского виркатора. Обнаружено, что до образования ВК в системе возбуждается собственная мода высокого порядка с такой конфигурацией, которая вызывает азимутальное вращение пучка, при этом одна часть электронного потока (по азимуту) начинает двигаться по часовой стрелке, а другая — против [7]. Как следствие, в области по азимуту, где потоки движутся навстречу друг другу, наблюдается увеличение плотности пространственного заряда (ПЗ) (начальное возмущение плотности). Это, в свою очередь, является стартовым этапом развития диокотронной неустойчивости и последующей филаментации пучка.

Важно заметить, что образование ВК в РЭП способствует развитию диокотронной неустойчивости за счет накопления пространственного заряда в его области, которое приводит к значительному росту начального возмущения плотности пространственного заряда в азимутальном направлении и, как следствие, к формированию в некоторой области по азимуту в плоскости, перпендикулярной распространению электронного потока (плоскости  $XU$ ), выраженного электронного сгустка.

Образование электронного сгустка (структуры) в азимутальном направлении становится причиной того, что отражение потока обратно к плоскости инжекции происходит не равномерно по азимуту, а основная часть электронов отражается от области с большей плотностью пространственного заряда, т.е. от области сформировавшегося сгустка, где провисание потенциала пространственного заряда максимально. Заметим, что одновременно с появлением первых отражений, электронная структура, а вместе с ней и область отражения электронов, начинают вращаться в азимутальном направлении за счет присутствия продольного магнитного поля. При дальнейшем увеличении инжектируемого тока  $i(t)$  заряд сгустка растет, и при некотором его критическом значении, когда фокусирующие силы уже не могут скомпенсировать возросшие кулоновские силы расталкивания, сгусток разделяется на два, тем самым уменьшая на-

копленный заряд в каждом из сгустков. Это делает новую конфигурацию РЭП в азимутальном направлении устойчивой. Если же ток продолжит возрастать, то сформировавшаяся структура снова становится неустойчивой, и разделение сгустков может произойти вновь.

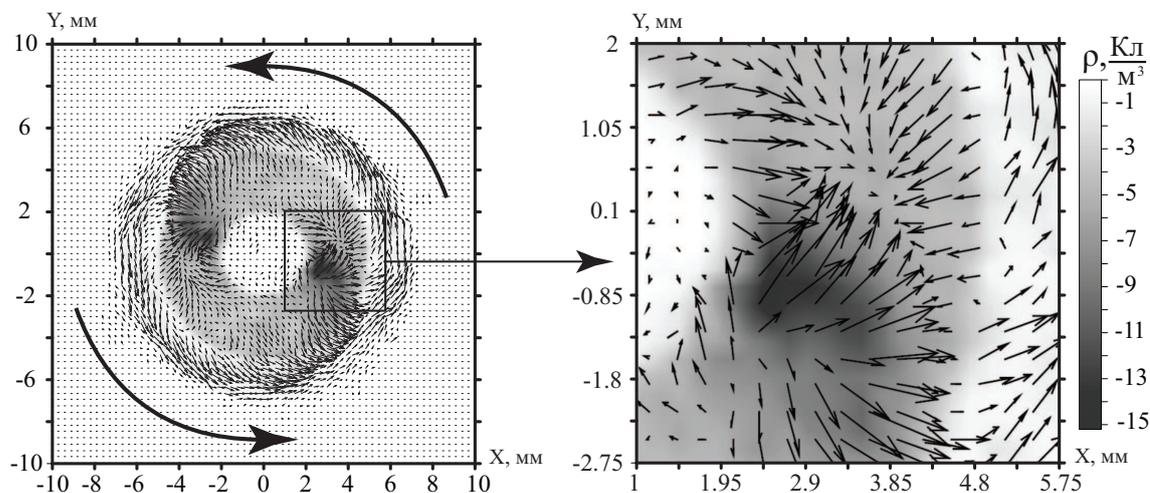


Рисунок 2 – Распределение плотности пространственного заряда в сечении плоскостью  $XU$  и наложенное на неё векторное поле скоростей электронного потока. На вставке представлен увеличенный фрагмент в области сгустка. Распределения построены при величине индукции внешнего магнитного поля  $B_0 = 1.85$  Тл и толщине пучка  $d = 3$  мм.

Подробнее остановимся на динамике РЭП в области ВК. Для этого рассмотрим рисунок 2, на котором изображена плотность пространственного заряда в плоскости  $XU$  и наложенное на неё векторное поле скоростей электронного потока. Градиентом серого показана величина плотности пространственного заряда, более тёмным областям соответствует большая плотность пространственного заряда. Стрелками показано направление вращения электронных сгустков.

Из рисунка хорошо видно, что при заданных параметрах в системе образуется два электронных сгустка в азимутальном направлении, причем движение электронов в области сгустка (см. увеличенный фрагмент на рис. 2) такое, что с одной его стороны (с нижней на увеличенном фрагменте) электроны разбегаются — происходит сброс заряда и уменьшение плотности пространственного заряда, а с другой — электроны движутся навстречу друг другу, тем самым накапливая заряд и увеличивая его плотность. Такая динамика РЭП заставляет сгустки вращаться в азимутальном направлении.

Для детального анализа происходящих в РЭП процессов при совместном развитии неустойчивостей на плоскости управляющих параметров “толщина пучка  $d$  – индукция внешнего магнитного поля  $B_0$ ” были выделены области,

соответствующие различному количеству формирующихся в РЭП электронных сгустков, показанные на карте режимов на рис. 3.

Из анализа полученной карты режимов следует, что изменение толщины пучка приводит к резким изменениям динамики РЭП при некоторых характерных значениях, а именно, с уменьшением  $d$  количество формирующихся электронных сгустков возрастает от двух до девяти через последовательность скачкообразных переключений режимов динамики. Отметим, что с уменьшением толщины пучка  $d$  для переключения между режимами требуется всё меньшее изменение  $d$ . Также видно, что влияние внешнего магнитного поля более сложное, и его изменение может приводить как к увеличению, так и к уменьшению количества формирующихся в РЭП электронных структур.

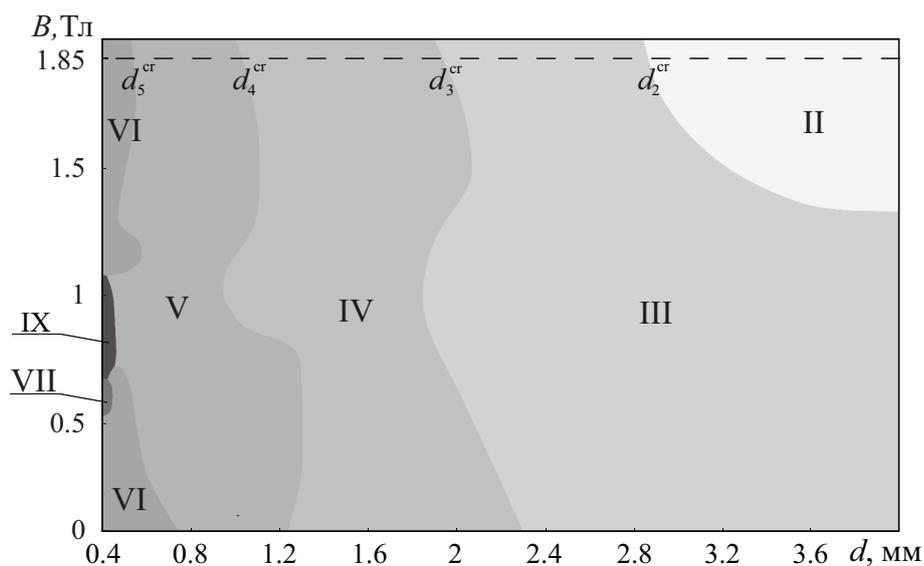


Рисунок 3 – Карта характерных режимов динамики РЭП на плоскости управляющих параметров “толщина пучка  $d$  – индукция внешнего магнитного поля  $B_0$ ”. Градиентом серого выделены области с различным количеством  $N$  электронных сгустков. Римскими цифрами обозначено количество электронных сгустков в азимутальном направлении.  $d_2^{cr}$ ,  $d_3^{cr}$ ,  $d_4^{cr}$ ,  $d_5^{cr}$  — критические величины толщины пучка для режимов  $N = 2 \div 5$ .

В третьей главе представлены результаты исследования перспективных моделей генераторов на виртуальном катоде. Так, изучены режимы СВЧ генерации высших гармоник в высокомоощном виркаторе с релятивистским электронным потоком с виртуальным катодом. Характеристики данных режимов, в частности, характерные спектры и их трансформация с изменением параметров

системы (тока пучка, индукции внешнего магнитного поля), а также физические процессы, происходящие в системе, были проанализированы с помощью трехмерного электромагнитного моделирования. Было показано, что с увеличением тока пучка исследуемая система демонстрирует тенденцию к существенному росту амплитуд высших гармоник в спектре токовых осцилляций в области виртуального катода. Полученные результаты позволяют рассматривать генераторы на виртуальном катоде, как перспективные высокомо мощные источники суб-ТГц и ТГц излучения.

Проведено численное исследование нелинейной динамики многолучевой виркаторной системы. Схема многолучевого виркатора ранее не рассматривалась, поэтому в рамках численного моделирования была проанализирована возможность эффективного взаимодействия нескольких виртуальных катодов в едином пространстве взаимодействия и определены условия, при которых реализуется эффективное сложение мощности каждого из пучков на выходной нагрузке.

Впервые обнаружен эффект синхронизации виртуальных катодов в модели многолучевого релятивистского виркатора. Данный эффект является важным не только с фундаментальной, но и с прикладной точки зрения, т.к. в перспективе может позволить продвинуть релятивистские виркаторы в более высокочастотный диапазон без существенного увеличения общего тока в системе. Такого результата возможно достигнуть, используя один РЭП с наибольшим током в качестве задающего частоту, а остальные ( $N-1$ ) с меньшими токами – в качестве поддерживающих, «накачивающих» необходимую энергию в систему. Таким образом, для повышения частоты генерации виркатора (которая определяется плазменной частотой) и мощности на данной частоте нет необходимости увеличивать общий ток, инжектируемый в систему, как в случае с одним РЭП, а достаточно увеличить лишь ток одного из  $N$  пучков (ведущего). В результате, за счет синхронизации ВК во всех электронных потоках начнут осциллировать на одной частоте, задаваемой частотой колебаний ВК в ведущем пучке, что приведет к увеличению мощности выходного сигнала на данной частоте. Образующиеся синхронно осциллирующие виртуальные катоды можно рассматривать как единую пространственно-распределенную неоднородную электронную структуру.

Разработана новая перспективная модель релятивистской виркаторной

системы и проведена её оптимизация с помощью трехмерного электромагнитного кода.

Предложенная модель представляет собой электродинамическую структуру в виде эллиптического резонатора, в которую инжектируется трубчатый моноскоростной релятивистский электронный поток со сверхкритическим током, в результате чего в системе формируется виртуальный катод (см. рис.4).

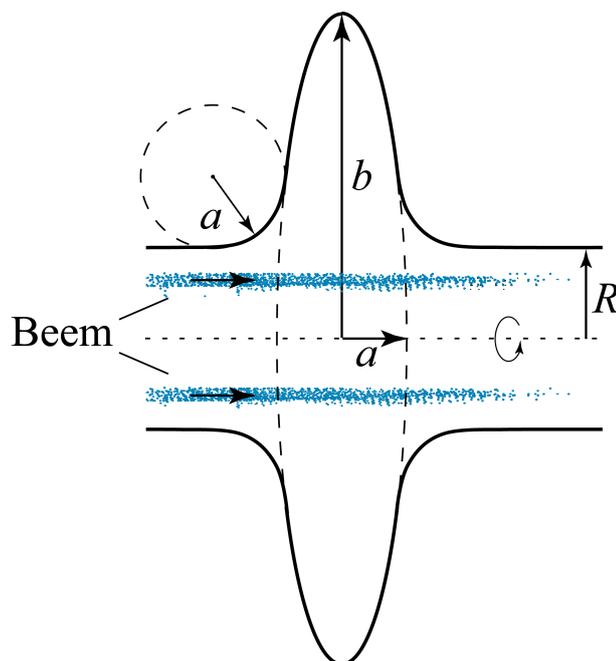


Рисунок 4 – Схема эллиптического резонатора, где  $a$ ,  $b$  – малая и большая полуоси эллипса соответственно,  $R$  – радиус трубы дрейфа.

Эллиптический резонатор является фигурой вращения эллипса вокруг одной из его полуосей. В данной работе пространство дрейфа плавно переходит, по окружности с радиусом  $a$  (где  $a$  – малая полуось эллипса, образующего резонатор) в резонатор.

Обнаружен резонансный характер взаимодействия электронного потока с полем электродинамической структуры. Проведена оптимизация вывода мощности: предложен вариант согласования цилиндрической рабочей камеры виркатора с коаксиальным выводом мощности, основанный на плавном увеличении радиуса внутреннего проводника от  $0$  в камере до  $R_c$  в волноводе ( $R_c$  – внутренний радиус коаксиала), что позволяет повысить его эффективность. Исследована зависимость выходной мощности виркатора с эллиптическим резонатором от  $R_c$  при наличии согласования. Проанализированы физические процессы, обуславливающие наличие оптимальных параметров рассматривае-

мой схемы, при которых её КПД достигает максимальных значений. Так, при оптимальных геометрических параметрах эллиптического резонатора обеспечивается наилучший энергообмен между электронным потоком с ВК и рабочей модой резонатора; при этом обнаружено, что в зависимости от параметров системы происходит взаимодействие с одной из двух мод: с модой с 2 вариациями  $E_z$ -поля по радиусу или с более высокочастотной модой с 4 вариациями. В свою очередь, выбор оптимального значения  $R_c$  реализует наилучшее согласование вывода мощности. Анализ полученных результатов показал, что эллиптический тип резонатора позволяет обеспечить лучшую эффективность взаимодействия релятивистского электронного потока и электромагнитного поля за счет лучшей локализации возбуждаемого поля в подобной электродинамической структуре, что приводит к значительному увеличению КПД системы в плоть до 5 процентов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработана модель виркатора на пролетном токе в среде CST Particle Studio для исследования физических механизмов развития, существования и взаимодействия бурсиановской/пирсовской и диокотронной неустойчивостей в РЕП. Обнаружено развитие численной неустойчивости. Проведено детальное исследование данной численной неустойчивости и предложен метод её подавления средствами среды CST Particle Studio. Борьба с обнаруженной неустойчивостью возможно введением подходящего дисперсионного материала, который будет способствовать затуханию электромагнитного поля на характерных частотах.

Исследована динамика релятивистского электронного потока с виртуальным катодом. Обнаружено, что в рассматриваемом кольцевом РЕП со сверхкритическим током начинают одновременно развиваться бурсиановская и диокотронная неустойчивости, при этом развитие бурсиановской неустойчивости способствует развитию диокотронной за счет повышения плотности пространственного заряда вблизи плоскости инжекции пучка за счет торможения потока и последующего формирования виртуального катода. В результате взаимодействия неустойчивостей в области виртуального катода образуются вращающиеся в азимутальном направлении электронные сгустки, которые являются областями отражения, то есть виртуальный катод имеет сложную структуру в азимутальном направлении. В результате вращения сгустков в пролетном промежутке вдоль пространства дрейфа формируется спиральная электронная структура. Характерной отличительной особенностью данных режимов является различие в частоте основной спектральной составляющей. Увеличение количества сгустков в азимутальном направлении приводит к росту частоты выходного СВЧ сигнала в релятивистском виркаторе.

Проведено исследование перспективных моделей генераторов на виртуальном катоде. Так, изучены режимы СВЧ генерации высших гармоник в высокомоощном виркаторе. Показано, что с увеличением тока пучка исследуемая система демонстрирует тенденцию к существенному росту амплитуд высших гармоник в спектре токовых осцилляций в области виртуального катода. Полученные результаты позволяют рассматривать генераторы на виртуальном катоде, как перспективные высокомоощные источники суб-ТГц и ТГц излучения.

Проведено численное исследование нелинейной динамики многолучевой

виркаторной системы. Схема многолучевого виркатора ранее не рассматривалась, поэтому в рамках численного моделирования была проанализирована возможность эффективного взаимодействия нескольких виртуальных катодов в едином пространстве взаимодействия и определены условия, при которых реализуется эффективное сложение мощности каждого из пучков на выходной нагрузке. Обнаружен эффект синхронизации виртуальных катодов в рассматриваемой модели. Данный эффект является важным не только с фундаментальной, но и с прикладной точки зрения, т.к. в перспективе может позволить продвинуть релятивистские виркаторы в более высокочастотный диапазон без существенного увеличения общего тока в системе.

Предложена новая перспективная модель релятивистской виркаторной системы, использующей в качестве пространства взаимодействия эллиптический резонатор, и проведено её численное исследование. Обнаружен резонансный характер взаимодействия электронного потока с полем электродинамической структуры. Оптимизирован вывод мощности. Показана возможность достижения данным генератором КПД вплоть до 5 процентов. Полученные результаты позволяют рассматривать генераторы на виртуальном катоде, как перспективные высокомошные источники СВЧ и суб-ТГц излучения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 *Benford, J. High Power Microwaves / J. Benford, J. A. Swegle, E. Schamiloglu. Series in Plasma Physics. — Third edition edition. — CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016.*
- 2 Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2. Нестационарные и хаотические процессы / Ю. П. Блюх, С. В. Гришин, Б. С. Дмитриев, Е. Н. Егоров, Ю. Д. Жарков, Ю. А. Калинин, А. А. Короновский и др. — М.: Физматлит, 2009.
- 3 *Davidson, R. C. Theory of Nonneutral Plasmas / R. C. Davidson. — W.A. Benjamin Inc., Advanced book program, 1974.*
- 4 *Кузелев, М. В. Моделирование неустойчивости неоднородного плазменного потока. Нелинейная динамика слиппинг - неустойчивости. / М. В. Кузелев, Н. Сепехри Джаван // Физика плазмы. — 2007. — Т. 33, № 8. — С. 738–749.*
- 5 *Shvets, Gennady. Nonlinear evolution of the weibel instability of relativistic electron beams / Gennady Shvets, Oleg Polomarov, Vladimir Khudik, Carl Siemon, Igor Kaganovich // Physics of Plasmas. — 2009. — Vol. 16, no. 5. — P. 056303.*
- 6 *Mikhailenko, V. V. Non-modal analysis of the diocotron instability: Cylindrical geometry / V. V. Mikhailenko, H. J. Lee, V. S. Mikhailenko, N. A. Azarenkov // Physics of Plasmas. — 2013. — Vol. 20, no. 042101. — Pp. 042101–1–042101–8.*
- 7 *Kurkin, S. A. The development and interaction of instabilities in intense relativistic electron beams / S. A. Kurkin, A. A. Badarin, A. A. Koronovskii, A. E. Hramov // Physics of Plasmas. — 2015. — Vol. 22, no. 12.*
- 8 *Benford, J. High Power Microwaves / J. Benford, J. A. Swegle, E. Schamiloglu. — CRC Press, Taylor and Francis, 2007.*
- 9 *Dubinov, A. E. Electronic devices with virtual cathodes (review) / A. E. Dubinov, V. D. Selemir // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2002. — Vol. 47, no. 6. — P. 575.*
- 10 *Бадарин, А. А. Моделирование процессов развития и взаимодействия неустойчивостей в релятивистском электронном потоке при изменении толщины пучка. / А. А. Бадарин, С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. О. Рак, А. Е. Храмов // Физика плазмы. — 2017. — Т. 43, № 3. — С. 284–292.*

- 11 *Бадарин, А. А.* Исследование влияния проводимости стенок камеры дрейфа на динамику релятивистского электронного потока с виртуальным катодом / А. А. Бадарин, С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов // *Письма в ЖТФ*. — 2015. — Т. 41, № 23. — С. 72–80.
- 12 *Бадарин, А. А.* Мультистабильность в релятивистском электронном потоке со сверхкритическим током / А. А. Бадарин, С. А. Куркин, А. Е. Храмов // *Известия РАН. Серия физическая*. — 2015. — Т. 79, № 12. — С. 1646–1649.
- 13 *Куркин, С. А.* Генерация высших гармоник в релятивистском электронном потоке с виртуальным катодом. / С. А. Куркин, А. А. Бадарин, А. А. Короновский, А. О. Рак, А. Е. Храмов // *Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика*. — 2015. — Т. 23, № 1. — С. 41–52.
- 14 *Kurkin, S. A.* Higher harmonics generation in relativistic electron beam with virtual cathode / S. A. Kurkin, A. A. Badarin, Alexey A. Koronovskii, Alexander E. Hramov // *Physics of Plasmas*. — 2014. — Vol. 21, no. 9. — P. 093105.
- 15 *Бадарин, А. А.* Мощные пучково-плазменные системы с виртуальным катодом и перспективы их продвижения в суб-ТГц и ТГц диапазоны / А. А. Бадарин, А. А. Короновский, С. А. Куркин, А. Г. Петрик, Н. С. Фролов, А. Е. Храмов // *Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона*. — 2016.
- 16 *Богданкевич, Л. С.* Устойчивость релятивистских электронных потоков в плазме и проблема критических токов / Л. С. Богданкевич, А. А. Рухадзе // *Успехи физических наук*. — April 1971. — Т. 103, № 4. — С. 609–640.
- 17 *Thode, L.* Vacuum propagation of solid relativistic electron beams / L. Thode, B. B. Godfrey, W. R. Shanahan // *Phys. Fluids*. — 1979. — Vol. 22, no. 4. — Pp. 747–763.