

На правах рукописи



РОСТУНЦОВА АЛЁНА АЛЕКСАНДРОВНА

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ УСИЛЕНИИ И ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ
В СИСТЕМАХ ТИПА
ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОТОК – ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

1.3.4. – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2025

Работа выполнена на кафедре динамических систем на базе Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Научный руководитель:

Рыскин Никита Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Пегель Игорь Валериевич

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Бочкарев Андрей Владимирович

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» физико-технического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита состоится «30» октября 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, Х корпус, 511 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич СГУ имени Н.Г. Чернышевского (г. Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/nelineynye-volnovye-processy-pri-usilenii-i-generacii>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Слепченков Михаил Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Традиционной задачей радиофизики является разработка физических основ генерации и усиления когерентного излучения микроволнового диапазона. В частности, для многих научных и практических приложений, например, в наносекундной радиолокации большой дальности, при диагностике плазмы, в ускорительной технике, биофизических исследованиях представляет интерес генерация мощных ультракоротких импульсов¹. Также для ряда приложений, например, в спектроскопии², большой интерес представляют генераторы последовательностей когерентных коротких импульсов. Актуальной задачей является повышение пиковой мощности и уменьшение эффективной длительности генерируемых импульсов, что приводит к необходимости поиска оптимальных условий для их формирования.

В основе формирования ультракоротких микроволновых импульсов могут лежать различные механизмы, причём весьма эффективным оказывается подход, основанный на перенесении в классическую электронику методов, хорошо известных в квантовой оптике и физике лазеров. В частности, особое внимание привлекают явления, связанные с резонансным взаимодействием излучения с активными или пассивными средами, например, усиление импульсов света в инвертированных двухуровневых средах, квантовый эффект сверхизлучения (СИ) Дикке³ и оптическое явление самоиндуцированной прозрачности⁴. В классической электронике подобные эффекты можно обнаружить в системах типа электронный поток – электромагнитная (ЭМ) волна⁵. Типичными примерами подобных систем являются широко распространенные в СВЧ электронике лампы бегущей и обратной волны (ЛБВ и ЛОВ, соответственно).

Возможность генерации мощных ультракоротких импульсов на начальной стадии переходного процесса в ЛОВ была обнаружена ещё в основополагающих работах конца 1970-х годов⁶. Плодотворной оказалась аналогия с квантовым эффектом СИ, которая позволила обобщить результаты исследований по генерации импульсов в ЛОВ на различные механизмы электронно-волнового взаимодействия. В совместных исследованиях ИПФ РАН (Нижний Новгород), ИЭФ УрО РАН (Екатеринбург) и ИСЭ СО РАН (Томск) были продемонстрированы циклотронное, ондуляторное и черенковское СИ и на их основе разработан новый класс генераторов импульсного излучения с рекордными характеристиками.⁷ В частности, источники одиночных импульсов на

¹Benford J., Swegle J., Schamiloglu E. High Power Microwaves. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2007.

²Benirschke D.J., Han N., Burghoff D. // Nat. Commun. 2021. Vol. 12, № 1. P. 4244.

³Dicke R.H. // Phys. Rev. 1954. Vol. 93, № 1. P. 99-110.

⁴McCall S.L., Hahn E.L. // Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 18, № 21. P. 908-911.

⁵Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8-9. С. 599-606.

⁶Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 7. С. 1037-1052.

⁷Ginzburg N.S., Zotova I.V., Cross A.W., Phelps A.D.R., Yalandin M.I., Rostov V.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. Vol. 41, № 4. P. 646-660.

основе черенковского СИ в Ка-диапазоне позволяют генерировать субнаносекундные импульсы с гигаваттной пиковой мощностью⁸. Дальнейшее увеличение пиковой мощности и сокращение длительности импульсов СИ оказалось возможным при взаимодействии с попутной волной, например, при взаимодействии черенковского типа в ЛБВ, что было продемонстрировано экспериментально⁹.

Хотя на основе эффекта СИ разработаны источники импульсов с субнаносекундной длительностью и гигаваттной пиковой мощностью, продолжают исследования, направленные на принципиальное улучшение их характеристик. Как правило, оптимизация процессов электронно-волнового взаимодействия осуществляется в ходе компьютерных экспериментов на основе моделей различного уровня сложности, что является достаточно трудоемким процессом. Для дальнейшего продвижения в этом направлении актуально использование аналитических подходов, позволяющих выявить универсальные закономерности эволюции импульсов СИ.

Анализ результатов компьютерного моделирования и натурных экспериментов, представленных в литературе, позволяет сделать вывод, что эволюция импульсов СИ носит отчетливо выраженный автомодельный (самоподобный) характер. В связи с этим перспективным подходом является поиск и анализ автомодельных решений. Такой подход позволяет получить точные решения в виде усиливающихся и сжимающихся импульсов и найти аналитические законы изменения основных характеристик импульса во времени и в пространстве. Автомодельные решения действительно были найдены для некоторых простейших моделей электронно-волнового взаимодействия^{10,11}, однако, чтобы установить пределы их применимости и выявить оптимальные условия для достижения максимальной пиковой мощности, требуется более подробное исследование, включая детальное сопоставление с результатами численного моделирования. Также очевидный интерес представляет распространение подобного подхода на ряд более сложных моделей.

Аналогия с квантовой электроникой также позволила предсказать явление самоиндуцированной прозрачности при циклотронном резонансном взаимодействии ЭМ волны со встречным, изначально прямолинейным электронным пучком в продольном магнитном поле¹². На основе этого эффекта была продемонстрирована возможность трансформации излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в когерентную последовательность наносекундных импульсов¹³, каждый из которых представляет собой солитон самоиндуцированной прозрачности. В численных экспериментах было показано, что в окрестности частоты циклотронного резонанса, когда ожидается

⁸Rostov V.V., Romanchenko I.V., Pedos M.S., et al. // Phys. Plasmas. 2016. Vol. 23, № 9. P. 093103.

⁹Яландин М.И., Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91, № 11. С. 620-625.

¹⁰Рыскин Н.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, № 9. С. 86-94.

¹¹Ryskin N.M. // Comm. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2014. Vol. 19, № 9. P. 2942-2950.

¹²Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С. // ЖЭТФ. 2011. Т. 140, № 5 (11). С. 890-899.

¹³Zotova I.V., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 113, № 14. P. 143901.

поглощение падающей ЭМ волны, при достаточно высокой мощности входного сигнала происходит нелинейное просветление среды, и гармонический сигнал преобразуется в последовательность солитонов. Актуальной задачей является определение условий реализации такого нестационарного режима.

В теории волн известно явление нелинейного или солитонного туннелирования¹⁴. Оно заключается в том, что сигнал, частота которого лежит в полосе непропускания среды, способен распространяться без затухания, если его интенсивность достаточно велика. Этот эффект обусловлен нелинейным сдвигом критической частоты при увеличении амплитуды волны. Однако распространение сигнала при нелинейном туннелировании носит нестационарный характер: он разбивается на последовательность так называемых щелевых солитонов (gap solitons), т.е. солитонов огибающей, несущая частота которых лежит в линейной полосе непропускания. Образование щелевых солитонов происходит в результате развития модуляционной неустойчивости (МН). Типичным примером является формирование последовательности щелевых солитонов при прохождении плоской ЭМ волны достаточно большой амплитуды через нелинейную брэгговскую диэлектрическую решётку¹⁵. Представляется, что имеет место аналогия между солитонным туннелированием и генерацией последовательности солитонов самоиндуцированной прозрачности при циклотронном взаимодействии волны со встречным электронным пучком. Поэтому представляет интерес теоретический анализ поведения системы с позиции теории нелинейных волн с целью получения полной картины возможных динамических режимов и выявления основных закономерностей формирования последовательности ультракоротких импульсов.

Таким образом, тема диссертационной работы является **актуальной** для современной радиофизики.

Целью диссертационной работы является выявление фундаментальных закономерностей усиления и генерации ультракоротких импульсов микроволнового излучения в нелинейных системах типа электронный поток – электромагнитная волна.

В рамках диссертационной работы решаются следующие **задачи**:

1. Поиск и анализ автомодельных решений, описывающих усиление и компрессию импульсов, для различных моделей взаимодействия электронного пучка с прямой или обратной ЭМ волной. Определение в аналитическом виде законов изменения основных характеристик автомодельного импульса во времени и пространстве.

2. Компьютерное моделирование усиления и генерации коротких импульсов в системах типа электронный поток – ЭМ волна в рамках усреднённых уравнений электронно-волнового взаимодействия. Численный расчёт ос-

¹⁴Newell A.C. Nonlinear tunneling // J. Math. Phys. 1978. Vol. 19, № 5. P. 1126-1133.

¹⁵Eggleton B.J., de Sterke M.C., Aceves A.B., et al. // Opt. Commun. 1998. Vol. 149, № 4-6. P. 267-271.

новых характеристик импульсов и их сопоставление с аналитическими законами, полученными для автомодельных решений, анализ областей их применимости.

3. Анализ условий возникновения МН при резонансном циклотронном взаимодействии ЭМ волны со встречным потоком невозбужденных циклотронных электронов-осцилляторов. Поиск точных аналитических решений в виде периодических стационарных нелинейных волн и солитонов. Установление полной картины возможных режимов распространения волны в зависимости от параметров входного сигнала, определение условий генерации последовательности солитоноподобных импульсов.

Методы исследования. В диссертации широко используются аналитические подходы теории волновых процессов в сочетании с современными методами компьютерного моделирования. Поиск автомодельных решений осуществляется путём нахождения масштабно-инвариантных преобразований, а также с помощью группового анализа симметрий Ли. Анализ характера МН проводится путём исследования асимптотической формы неустойчивых возмущений методом перевала. Аналитические результаты верифицируются при помощи численного моделирования на основе хорошо известных моделей нелинейной нестационарной теории взаимодействия электронного потока с прямой или обратной ЭМ волной. Также проводится прямое 3-D моделирование с помощью современного программного пакета CST Studio Suite, в котором реализовано так называемое «полностью электромагнитное» моделирование, основанное на непосредственном численном решении уравнений Максвелла с помощью метода конечных разностей во временной области, а движение заряженных частиц рассчитывается при помощи метода «частиц в ячейке» (“Particle in Cell”, PIC).

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Впервые показано, что эволюция короткого импульса, усиливающегося в черенковской ЛБВ, в приближении малого изменения скорости электронов проходит через две автомодельные стадии. На малых временах эволюция параметров импульса соответствует автомодельным законам, полученным в приближении малого изменения энергии электронов. С течением времени изменение энергии электронов становится значительным, и эволюция импульса выходит на новую автомодельную асимптотику, соответствующую приближению малого изменения скорости электронов.
- Впервые проведён групповой анализ симметрий уравнений нелинейной нестационарной теории черенковского взаимодействия электронного пучка с бегущей ЭМ волной. Показано, что автомодельное решение является следствием одной из базисных симметрий уравнений. На основе проведенного анализа впервые построено обобщенное автомодельное решение, которое описывает усиление частотно-модулированного импульса.
- Впервые исследован автомодельный характер генерации импульса СИ на начальной стадии переходного процесса в черенковской ЛОВ. Путём де-

тального сопоставления с результатами численного моделирования продемонстрировано, что эволюция параметров импульса СИ в процессе распространения хорошо соответствует теоретическим законам, полученным из вида автомодельного решения уравнений нелинейной нестационарной теории черенковского взаимодействия электронного пучка с обратной ЭМ волной.

- Найдены новые автомодельные решения, описывающие генерацию коротких импульсов в лазере на свободных электронах (ЛСЭ) с попутной ЭМ накачкой, когда рассеянное излучение распространяется навстречу электронному потоку.
- Впервые показано, что генерация последовательности солитоноподобных импульсов при циклотронном резонансном взаимодействии гармонической волны со встречным прямолинейным потоком электронов связана с развитием МН. Впервые проведён анализ характера МН. Найдены условия, при которых МН является абсолютной или конвективной, и построена граница смены характера МН на плоскости параметров входного сигнала.
- Найдены новые точные аналитические решения, описывающие распространение стационарных периодических волн, светлых и тёмных солитонов при взаимодействии прямолинейного электронного потока со встречной монокromaticкой волной в условиях циклотронного резонанса.

Достоверность результатов работы обоснована использованием широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя моделей электронно-волнового взаимодействия и методов теоретического анализа нелинейных волновых процессов. Результаты численного моделирования, полученные на основе различных подходов (моделирование усреднённых уравнений и 3-D PIC моделирование), согласуются как между собой, так и с теоретическими выводами. Достоверность результатов численного моделирования также подтверждается воспроизведением в качестве тестовых расчётов ряда общепризнанных результатов, известных из литературы.

Научно-практическая значимость. Результаты диссертации существенно расширяют теоретические представления о нелинейных волновых процессах в системах типа электронный поток – ЭМ волна. В частности, показано, что процессы усиления и компрессии импульсов в подобных системах носят автомодельный характер, и определены основные закономерности их эволюции. Развита теория МН при циклотронном резонансном взаимодействии ЭМ волны со встречным прямолинейным электронным пучком и определены условия генерации солитонов. Практическая значимость результатов исследования состоит в том, что на их основе могут быть улучшены характеристики усилителей и генераторов наносекундных и субнаносекундных ЭМ импульсов в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн, которые находят широкое применение.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. В черенковской лампе бегущей волны в условиях малого относительного изменения энергии электронов $\Delta E/E \ll 1$ импульс, длительность которого мала по сравнению с временем распространения l/v_g (l – длина системы,

v_g – групповая скорость волны), с течением времени асимптотически приближается к автомодельному решению, когда его пиковая амплитуда растет линейно с течением времени t , а ширина сокращается как $t^{-1/2}$.

2. В релятивистской лампе бегущей волны процесс усиления импульса на начальном этапе согласуется с автомодельными законами, полученными в приближении малого относительного изменения энергии. По мере увеличения амплитуды импульса это приближение нарушается и происходит переход на новую автомодельную асимптотику, соответствующую малому относительному изменению скорости электронов $\Delta v/v \ll 1$, когда пиковая амплитуда растет во времени по линейному закону, а ширина сокращается как t^{-2} . Переход от одной автомодельной асимптотики к другой происходит тем быстрее, чем больше релятивистский параметр $v = 2(\gamma_0^2 - 1)C$ (γ_0 – релятивистский масс-фактор, C – параметр усиления Пирса).

3. Процесс генерации коротких импульсов сверхизлучения в черенковской лампе обратной волны носит автомодельный характер, причем законы, по которым амплитуда и ширина импульса изменяются во времени, те же, что и в случае взаимодействия с попутной волной. Существует оптимальное значение длины системы l ($\beta Cl \approx 7.0$, C — параметр усиления Пирса, β — постоянная распространения волны), при котором амплитуда выходного импульса принимает максимальное значение. При большей длине системы наблюдается генерация вторичных импульсов, которые начинают формироваться прежде, чем основной импульс покидает пространство взаимодействия, что ограничивает рост его пиковой амплитуды.

4. При циклотронном резонансном взаимодействии электромагнитной волны со встречным, изначально прямолинейным электронным пучком имеет место модуляционная неустойчивость. В условиях, когда модуляционная неустойчивость является абсолютной, непрерывный входной сигнал с постоянной амплитудой трансформируется в последовательность микроволновых солитонов, распространяющихся вдоль системы. Когда модуляционная неустойчивость является конвективной, модуляционные возмущения сносятся вдоль системы и по окончании переходного процесса устанавливается стационарный режим распространения сигнала.

Апробация работы и публикации. Результаты, представленные в диссертационной работе, неоднократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях: 23rd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Monterey, CA, USA, 2022; 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Rotterdam, Netherlands, 2021; 47th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS-2020), Singapore, 2020; XXV, XXVI и XXVIII Международные школы для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике Saratov Fall Meeting. International Symposium “Optics and Biophotonics”, Саратов, 2021, 2022, 2024; 16-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения»,

Саратов, 2024; XII Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2019), Саратов, 2019; XVII Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, Саратов, 2018; XXIX и XXX Всероссийские научные конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых», Саратов, 2021, 2023; XIV–XVII, XIX Всероссийские конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, 2019-2022, 2024; XIX-XXI научные школы «Нелинейные волны», Нижний Новгород, 2020, 2022, 2024; V Школа для молодых учёных «Актуальные проблемы мощной вакуумной электроники СВЧ: источники и приложения», Нижний Новгород, 2023.

Результаты диссертации получены при выполнении научно-исследовательских работ, поддержанных грантами Российского научного фонда (проекты №19-72-10119 и №23-12-00291), а также в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

По результатам диссертации опубликовано 23 работы, из которых 5 статей в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук или индексируемых в реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 4 статьи в материалах международных конференций, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 14 тезисов докладов в сборниках трудов всероссийских и международных конференций, 10 из которых индексируются в РИНЦ.

Личный вклад соискателя. Все результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены соискателем лично: теоретический анализ моделей электронно-волнового взаимодействия, проведение численных экспериментов и анализ полученных результатов. Постановка задач, планирование проведения исследования, обсуждение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с научным руководителем, а также с соавторами опубликованных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 132 страницы, включая 61 рисунок и 2 таблицы. Список литературы состоит из 113 наименований на 9 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, перечислены методы исследования, указаны научная новизна, научно-практическая значимость и достоверность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и публикациях автора.

Глава 1 посвящена анализу автомодельных процессов усиления и компрессии импульсов при черенковском взаимодействии электронного потока с попутной ЭМ волной.

В разделе 1.1 сформулированы физические принципы, лежащие в основе усиления коротких импульсов в черенковской ЛБВ. Выдвинута гипотеза о том, что эволюция импульса на больших временах приобретает автомодельный характер. В разделе 1.2 приведены основные уравнения одномерной нестационарной теории черенковского взаимодействия электронного пучка с бегущей ЭМ волной, включая уравнение возбуждения волны

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} + \frac{\partial F}{\partial \xi} = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0 \quad (1)$$

и уравнения движения электронов в двух приближениях: в приближении малого изменения скорости

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = -\left(1 + v \frac{\partial \theta}{\partial \xi}\right)^{3/2} \text{Re}(Fe^{i\theta}) \quad (2)$$

и в приближении малого изменения энергии электронов

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = -\text{Re}(Fe^{i\theta}). \quad (3)$$

В (1)-(3) F – безразмерная амплитуда поля, θ – фаза электрона относительно волны, ξ и τ – безразмерные координата и время, соответственно, $v = 2(\gamma_0^2 - 1)C$ – релятивистский параметр, где γ_0 – релятивистский масс-фактор. Сформулированы начальные и граничные условия для решения уравнений, а также изложена методика численного интегрирования.

В разделе 1.3 проводится анализ автомодельного усиления импульсов в черенковской ЛБВ в приближении малого изменения энергии электронов. Исследовано автомодельное решение уравнений (1) и (3). Найдена автомодельная подстановка, получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих автомодельное решение, и представлены результаты её численного интегрирования. Показано, что автомодельное решение имеет вид импульса, который усиливается и сжимается в процессе движения вдоль электронного потока [рис. 1(а)]. Определены законы эволюции во времени основных параметров автомодельного импульса, включая пиковую амплитуду ($A_{peak} \sim \tau$), длительность ($\Delta \sim \tau^{-1/2}$) и положение в пространстве ($\xi_{max} = \xi_0 + \tau + \eta_0/\sqrt{\tau}$, где ξ_0 и η_0 – некоторые константы). Проведено численное моделирование распространения короткого входного импульса в ЛБВ в приближении малого изменения энергии. Выполнено детальное сопоставление зависимостей основных характеристик импульса от времени с теоретическими законами, полученными из вида автомодельного решения [см., например, рис. 1(б)]. Показано, что после короткого переходного процесса эволюция импульса выходит на автомодельную стадию.

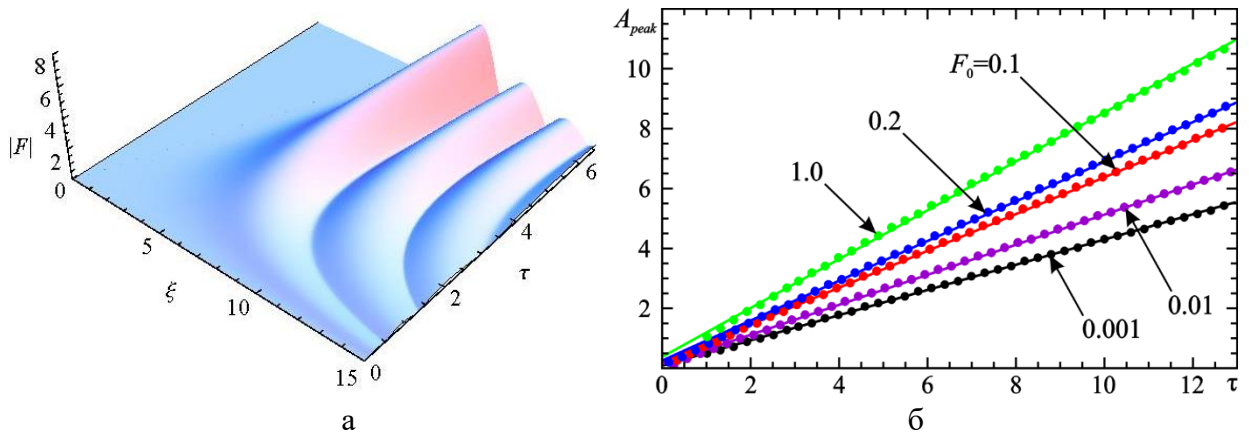


Рис. 1. Усиление импульса в приближении малого изменения энергии электронов: пространственно-временное распределение амплитуды поля автомодельного решения (а) и зависимость пиковой амплитуды импульса от времени при различных амплитудах входного импульса F_0 . Круги – численные результаты, сплошные линии – теоретические зависимости.

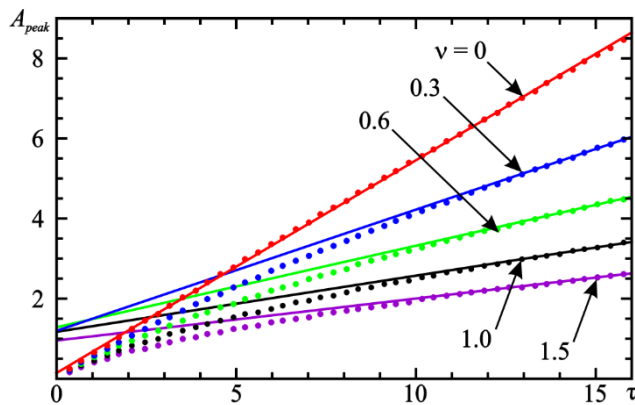


Рис. 2. Зависимости пиковой амплитуды импульса от времени при различных значениях релятивистского параметра v , полученные в приближении малого изменения скорости электронов. Круги – численные результаты, сплошные линии – теоретические зависимости.

В *разделе 1.4* анализ автомодельного усиления импульсов проводится в приближении малого изменения скорости электронов, которое представляет наибольший интерес с точки зрения получения высоких коэффициентов конверсии мощности. Найдено автомодельное решение уравнений (1) и (2), которое, как и в приближении малого изменения энергии, описывает усиление и компрессию импульса, однако законы эволюции параметров автомодельного импульса имеют иную асимптотику (в частности, $A_{peak} \sim \tau$ и $\Delta \sim \tau^{-2}$). Полученное решение

сравнивается с результатами численного моделирования усиления импульса на основе усреднённых уравнений. Показано, что на малых временах поведение импульса соответствует автомодельным законам, полученным в приближении малого изменения энергии электронов, но с течением времени эволюция импульса выходит на новую автомодельную асимптотику, соответствующую приближению малого изменения скорости (рис. 2). Определено оптимальное значение релятивистского параметра v , при котором достигается максимум коэффициента конверсии мощности.

В *разделе 1.5* представлены результаты группового анализа симметрий уравнений черенковского электронно-волнового взаимодействия (1) и (3). Определены базисные симметрии уравнений и установлен их физический смысл, в частности, показано, что одна из базисных симметрий соответствует

автомодельному решению, которое было найдено в разделе 1.3. Продемонстрировано, что базисные симметрии образуют алгебру Ли, что позволяет получать новые симметрии исследуемых уравнений путем их комбинирования. На основе такого подхода рассмотрена модификация автомодельного решения, которая описывает усиление импульса с частотной модуляцией. Найденная модификация указывает на потенциальную возможность повышения пиковой мощности импульсов, что подтверждено в численном моделировании усиления короткого входного импульса с частотой, сдвинутой относительно точки синхронизма.

В **Главе 2** представлены результаты исследования автомодельного характера генерации коротких импульсов в процессах взаимодействия электронного пучка с обратной ЭМ волной.

В разделе 2.1 изложены физические принципы, лежащие в основе генерации мощного короткого импульса СИ на начальной стадии процесса установления генерации в черенковской ЛОВ. Представлены уравнения нестационарной теории черенковского взаимодействия электронов со встречной ЭМ волной в приближении малого изменения энергии электронов, которые аналогичны уравнениям (1) и (3), отличаясь от них лишь знаком в левой части уравнений возбуждения (1). Сформулированы начальные и граничные условия, необходимые для моделирования генерации короткого импульса.

В разделе 2.2 автомодельное решение, найденное в разделе 1.3 для случая взаимодействия электронов с попутной волной, обобщено на случай взаимодействия с обратной волной. Показано, что это решение описывает усиление и компрессию импульса, который движется навстречу электронам [рис. 3(а)], и определены законы пространственно-временной эволюции его основных параметров. Представлены результаты детального сопоставления результатов численного моделирования генерации импульса и найденного автомодельного решения. Показано, что после некоторого переходного процесса решение выходит на автомодельную стадию, на которой основные параметры сформировавшегося импульса ведут себя в соответствии с автомодельными законами [рис. 3(б)]. Однако, в отличие от усиления при взаимодействии с попутной волной (глава 1), где рассматривалась по существу полубезграничная система, в данном случае система имеет конечную длину и граничные условия для электронов и поля ставятся на разных ее концах. Это существенным образом влияет на картину эволюции импульса. В частности, обнаружена оптимальная длина пространства взаимодействия, при которой выходная амплитуда импульса достигает максимального значения. Показано, что данный эффект обусловлен генерацией вторичных импульсов. Если длина пространства взаимодействия больше оптимальной, вторичные импульсы начинают формироваться прежде, чем основной импульс покидает систему, и, тем самым, ограничивают его амплитуду.

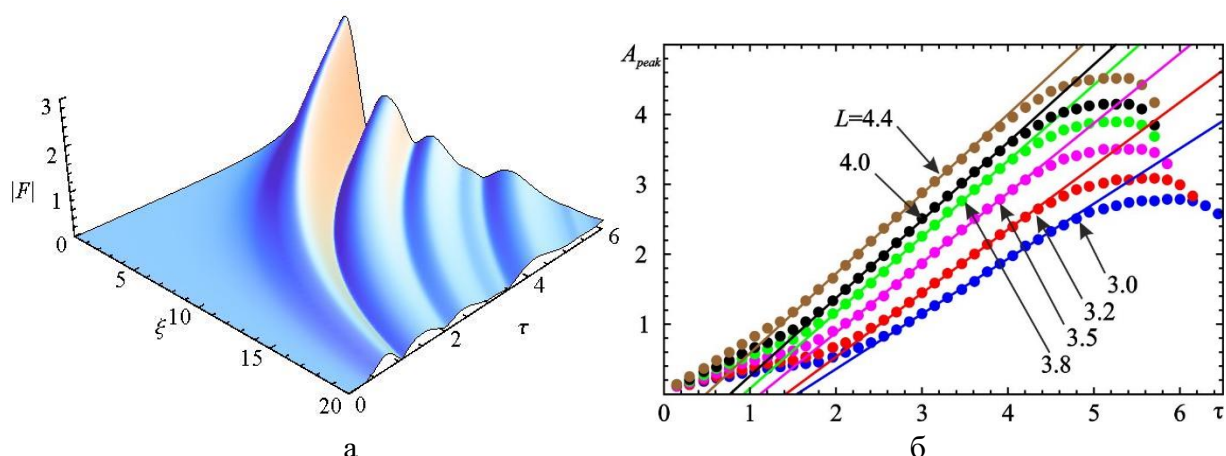


Рис. 3. Пространственно-временное распределение амплитуды поля автомодельного решения при взаимодействии с обратной волной (а) и зависимость пиковой амплитуды импульса от времени при различных значениях длины системы L (б). Кружки – численные результаты, сплошные линии – теоретические зависимости.

В разделе 2.3 рассмотрен вопрос об автомодельной эволюции импульсов в ЛОВ с профилированием сопротивлением связи. В частности, в литературе предлагалась идея повышения пиковой амплитуды импульсов, генерирующихся в ЛОВ, за счёт реализации так называемого режима пространственного накопления энергии¹⁶. При этом сопротивление связи меняется по закону $K(\xi) \sim 1/(\xi_0 - \xi)$, где ξ – безразмерная координата, ξ_0 – некоторая константа. В диссертации проведен анализ законов профилирования $K(\xi)$, при которых существуют автомодельные решения. Из вида автомодельных подстановок сделан вывод, что только один из них представляет интерес в рамках задачи о генерации коротких импульсов, причём он совпадает с законом, при котором реализуется режим пространственного накопления энергии. В соответствии с автомодельными законами пиковая мощность импульса растет линейно по мере его пробега по системе. Проведено моделирование генерации импульсов в ЛОВ, состоящей из однородного участка вблизи правой границы системы, который дополнен секцией с сопротивлением связи, профилированным по закону $K(\xi) \sim 1/(\xi_0 - \xi)$. Показано, что движение импульса по неоднородной секции является автомодельным. Найдено соотношение между длинами секций, при котором достигается максимальная пиковая амплитуда выходного импульса.

Раздел 2.4 посвящён исследованию генерации импульсов в ЛСЭ с попутной ЭМ накачкой, когда рассеянное излучение распространяется навстречу электронному пучку. Изложены основные принципы работы ЛСЭ и отмечена аналогия между процессом генерации ультракоротких импульсов в ЛСЭ с попутной накачкой и в ЛОВ. Выдвинута гипотеза, что генерация импульса в ЛСЭ

¹⁶ Ельчанинов А.А., Коровин С.Д., Пегель И.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 10. С. 874-882.

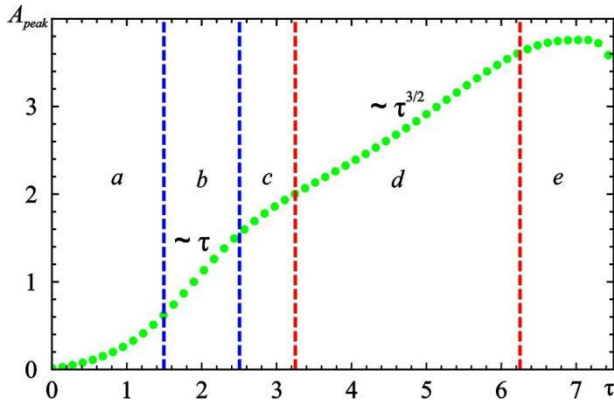


Рис. 4. Зависимость пиковой амплитуды импульса рассеянной волны от времени в ЛСЭ с попутной накачкой. Вертикальными штриховыми линиями показаны различные этапы эволюции импульса: *a* – переходный процесс формирования импульса, *b* – автомодельное распространение в режиме ЛОВ, *c* – переходный процесс между автомодельными стадиями, *d* – автомодельное распространение импульса в режиме ЛСЭ, *e* – насыщение.

ний ЛОВ (в частности, $A_{peak} \sim \tau$). С течением времени решение выходит на другую автомодельную асимптотику, соответствующую автомодельному решению уравнений ЛСЭ (в частности, $A_{peak} \sim \tau^{3/2}$).

В Главе 3 рассматривается задача о генерации последовательности коротких солитоноподобных импульсов при взаимодействии изначально прямолинейного электронного потока со встречной ЭМ волной в условиях циклотронного резонанса.

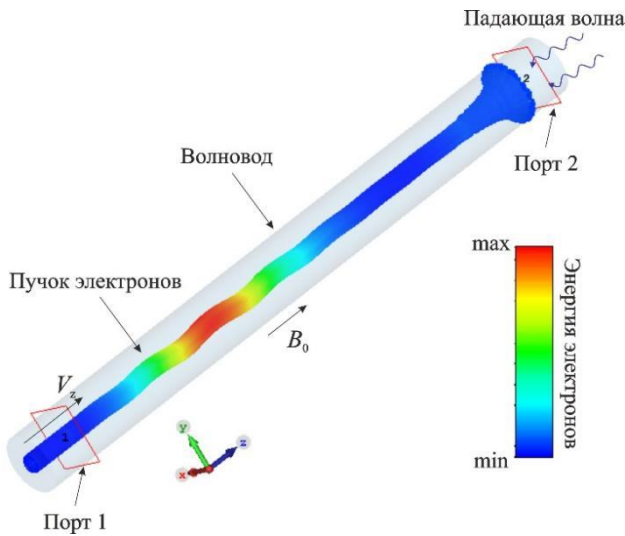


Рис. 5. Схема взаимодействия изначально прямолинейного потока электронов со встречной ЭМ волной в условиях циклотронного резонанса.

также носит автомодельный характер. Представлены уравнения нестационарного взаимодействия электронного потока с попутной волной накачки и встречной рассеянной волной, включая начальные и граничные условия, и найдено их автомодельное решение. Для рассеянной волны оно представляет собой импульс, который усиливается и сжимается в процессе распространения. При помощи численного моделирования обнаружено, что эволюция импульса проходит через две автомодельные стадии (рис. 4). На малых временах, когда истощение накачки несущественно, поведение основных параметров импульса соответствует автомодельному решению уравне-

В разделе 3.1 изложено понятие МН и указаны основные эффекты, к которым может приводить её развитие. Отмечена аналогия между МН и самоиндуцированной прозрачностью. Сформулированы физические принципы, лежащие в основе образования солитонов самоиндуцированной прозрачности при взаимодействии ЭМ волны со встречным прямолинейным потоком электронов в условиях циклотронного резонанса (схема модели представлена на рис. 5). Выдвинута гипотеза, что данный эффект следует трактовать как результат развития МН.

В разделе 3.2 представлены основные уравнения, описывающие циклотронное резонансное взаимодействие прямолинейного потока электронов со встречной ЭМ волной:

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} - \frac{\partial a}{\partial Z} = -p, \quad \frac{\partial p}{\partial Z} + i|p|^2 p = a, \quad (4)$$

где a – нормированная комплексная амплитуда поля волны, p – нормированный комплексный поперечный импульс электронов, Z и τ – безразмерные координата и время, соответственно. В разделе 3.3 для решений в виде монохроматических волн получено нелинейное дисперсионное соотношение. Его анализ показывает, что границы полосы непропускания, образующейся за счет циклотронного поглощения, сдвигаются вниз по частоте с ростом амплитуды волны. С помощью критерия Лайтхилла показано, что на верхней ветви дисперсионной характеристики имеет место МН.

Раздел 3.4 посвящён поиску решений в виде стационарных волн. Исходная система уравнений сведена к одному обыкновенному дифференциальному уравнению первого порядка, решения которого можно уподобить колебаниям осциллятора в потенциальной яме. С помощью фазовых портретов проанализировано поведение осциллятора при различных параметрах системы и для всех возможных случаев найдены точные аналитические решения, выраженные через эллиптические функции Якоби. Когда период решений стремится к бесконечности, они трансформируются в солитонные решения, включая светлые и тёмные солитоны.

В разделе 3.5 проводится анализ характера МН (конвективная или абсолютная). Представлены результаты приближенного анализа в окрестности верхней границы полосы непропускания. Для описания этой ситуации получено нелинейное уравнение Шредингера (НУШ), для которого найдена приближенная граница смены характера неустойчивости на плоскости параметров входного сигнала. Далее условия абсолютной/конвективной МН уточняются с помощью более строгого анализа асимптотической формы неустойчивых модуляционных возмущений, вычисленной методом перевала.

В разделе 3.6 представлены результаты численного моделирования на основе усреднённых уравнений. Получено разбиение плоскости параметров входного сигнала на области с различными режимами распространения волны, которое демонстрирует хорошее качественное соответствие с теоретическими выводами (рис. 6). Показано, что, когда амплитуда входного сигнала превышает амплитуду светлого неподвижного солитона, возможно распространение волны, причём сигнал разбивается на последовательность бегущих солитонов. При этом МН является абсолютной. С увеличением частоты входного сигнала МН становится конвективной и нестационарные автомодуляционные режимы сменяются стационарным одночастотным распространением сигнала. Обнаружено, что граница смены характера МН на плоскости параметров входного сигнала зависит от длины системы, что связано с наличием отражений. Однако

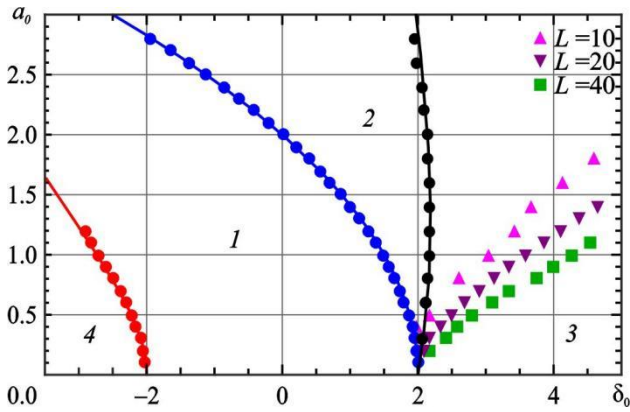


Рис. 6. Области циклотронного поглощения (1), автомодуляции (2) и стационарного прохождения волны (3,4) на плоскости параметров входного сигнала (a_0 – амплитуда, δ_0 – отстройка от частоты циклотронного резонанса). Кружки – результаты численного моделирования, сплошные линии – теоретические зависимости. Красным и синим показаны границы полосы непропускания, черным – граница смены характера МН для согласованной системы. Треугольники и квадраты – границы смены характера МН для несогласованной системы при различных L .

мами с ростом частоты падающей волны. Показана возможность генерации периодической последовательности наносекундных импульсов, пиковая мощность которых превышает мощность входного сигнала [рис. 7(а)]. Поскольку режим обусловлен абсолютной МН, спектр сигнала помимо входной частоты содержит новые независимые спектральные компоненты [рис. 7(б)].

при моделировании системы, согласованной на границе (в численном эксперименте согласование обеспечивалось плавным нарастанием магнитного поля), наблюдается хорошее соответствие с теоретической зависимостью.

В разделе 3.7 представлены результаты 3-D PIC моделирования взаимодействия прямолинейного электронного потока со встречной ЭМ волной в условиях циклотронного резонанса в программе CST Studio Suite. Схема моделируемой системы показана на рис. 5. Указаны параметры модели, соответствующие частоте циклотронного резонанса около 240 ГГц. Представлены результаты численных экспериментов, которые подтверждают теоретические выводы о переходах между различными динамическими режи-

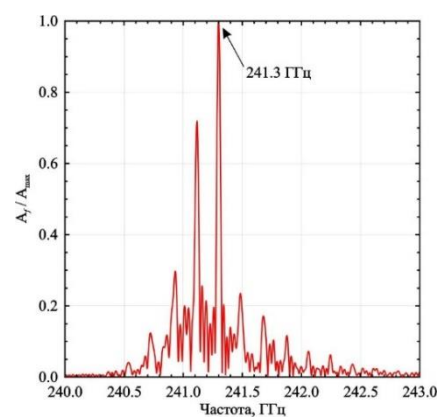
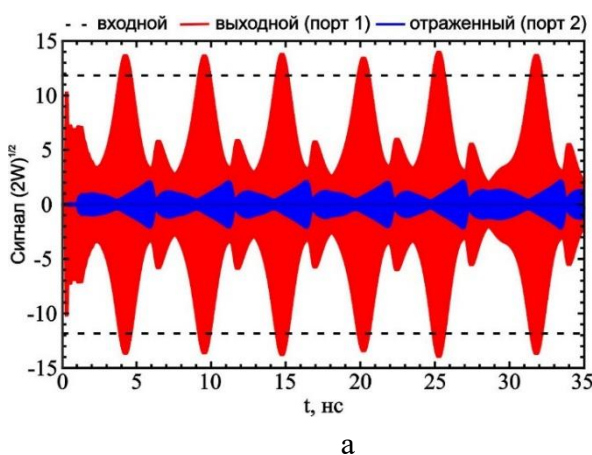


Рис. 7. Осциллограмма (а) и спектр (б) выходного сигнала в порте 2, полученные в 3-D PIC моделировании в режиме генерации последовательности импульсов (МН абсолютного характера). Частота входного сигнала 241.3 ГГц.

В **Заключении** приведены основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В настоящей диссертационной работе представлены результаты исследования фундаментальных закономерностей усиления и генерации ультракоротких импульсов микроволнового излучения в нелинейных системах типа электронный поток – ЭМ волна. Развита теория автомодельной эволюции импульсов, усиливающихся и сжимающихся в процессе распространения вдоль электронных потоков. Построена теория МН при взаимодействии ЭМ волны со встречным прямолинейным электронным пучком в условиях циклотронного резонанса и определены условия генерации последовательности солитоноподобных импульсов. Проведённое исследование позволяет с единых позиций описать процессы эволюции импульсов в широком классе систем, а применённые алгоритмы и основные выводы в дальнейшем могут быть обобщены на случай приборов с другими типами электронно-волнового взаимодействия. Полученные фундаментальные закономерности представляют практический интерес для определения оптимальных режимов генерации ультракоротких микроволновых импульсов.

Основные научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведён анализ автомодельных решений уравнений нестационарной теории черенковского взаимодействия прямолинейного электронного пучка с попутной ЭМ волной для двух различных приближений: малого изменения энергии и малого изменения скорости электронов. Найденные решения описывают усиление и компрессию импульса в процессе распространения вдоль системы. В случае малого изменения энергии электронов пиковая амплитуда импульса растёт линейно с течением времени τ , а ширина импульса уменьшается как $\tau^{-1/2}$. В случае малого изменения скорости электронов, который представляет наибольший интерес с точки зрения высоких коэффициентов конверсии мощности, пиковая амплитуда импульса также растёт линейно с ростом τ , а ширина импульса уменьшается пропорционально τ^{-2} .

2. Проведено численное моделирование усиления короткого входного импульса при черенковском электронно-волновом взаимодействии на основе уравнений нелинейной нестационарной теории ЛБВ. В случае малого изменения энергии электронов эволюция импульса после короткого переходного процесса выходит на автомодельную стадию, когда пиковая амплитуда, эффективная длительность и положение максимума ведут себя в соответствии с автомодельными законами. Чем меньше длительность входного импульса, тем короче процесс перехода к автомодельной стадии. Для приближения малого изменения скорости электронов процесс усиления импульса на малых временах совпадает с решением для случая малого изменения энергии. С течением времени изменение энергии электронов становится существенным, и решение выходит на новую автомодельную асимптотику, соответствующую случаю малого изменения скорости. С ростом релятивистского параметра пиковая амплитуда и ширина импульса уменьшаются, однако существует оптимальное

значение, при котором достигается максимум коэффициента конверсии мощности.

3. Проведен групповой анализ симметрий уравнений нелинейной нестационарной теории ЛБВ в приближении малого изменения энергии электронов. Показано, что одна из базисных симметрий соответствует автомодельному решению. Рассмотрена комбинация автомодельного решения с симметрией относительно фазового сдвига. Такое решение описывает автомодельное распространение импульса с частотной модуляцией. В численном моделировании усиления входного импульса с частотой, отличной от частоты синхронизма, показано, что наибольшую выходную амплитуду импульса можно получить при небольших положительных отстройках частоты, что согласуется с автомодельным решением.

4. Автомодельное решение, найденное для черенковского взаимодействия в приближении малого изменения энергии, обобщено на случай взаимодействия с обратной волной. В данном случае решение описывает усиление и компрессию импульса, который движется навстречу электронам, причём его амплитуда растёт линейно с увеличением времени τ , а ширина сокращается как $\tau^{-1/2}$.

5. Проведено численное моделирование генерации импульса СИ в ЛОВ-генераторе на основе уравнений нелинейной нестационарной теории. Показано, что после некоторого переходного процесса решение выходит на автомодельную стадию, когда основные характеристики импульса ведут себя в соответствии с автомодельными законами. Принципиальная ограниченность системы в пространстве накладывает определённую специфику на процесс распространения импульса. Пока длина системы L не превышает некоторого критического значения L_c , рост L сопровождается увеличением пикового значения выходного сигнала. При $L > L_c$ процесс автомодельного распространения импульса перестаёт зависеть от длины, что связано с зарождением вторичных импульсов прежде, чем первый успеет покинуть систему.

6. Рассмотрен вопрос о существовании автомодельных решений в ЛОВ с профилированием сопротивлением связи. Определены законы профилирования, при которых существуют автомодельные решения. Один из найденных законов соответствует известному из литературы [А.А. Ельчанинов А.А. и др., Изв. вузов. Радиофизика, 2003, Т. 46, С. 874] режиму пространственного накопления энергии и представляет интерес в рамках задачи о генерации высокомоощного короткого импульса СИ в ЛОВ. В численном моделировании исследована конструкция ЛОВ, в которой однородный участок, расположенный вблизи правой границы системы, дополнен секцией с сопротивлением связи, профилированным по закону $K(\xi) \sim 1/(\xi_0 - \xi)$. При движении импульса по неоднородному участку квадрат его амплитуды растёт линейно вдоль координаты, а ширина остается неизменной, что соответствует автомодельным законам. При определённом соотношении между длинами секций можно получить

существенное увеличение пиковой амплитуды выходного импульса по сравнению с однородной системой.

7. Исследован автомодельный характер генерации короткого импульса в ЛСЭ с попутной ЭМ накачкой, когда рассеянное излучение распространяется навстречу электронному потоку. Найдено автомодельное решение, которое для рассеянной волны представляет собой импульс, пиковая амплитуда которого растёт пропорционально $\tau^{3/2}$, а ширина уменьшается обратно пропорционально τ . Численное моделирование демонстрирует, что эволюция импульса проходит через несколько этапов. После переходного процесса, в результате которого из случайных флуктуаций формируется импульс, решение выходит на стадию, соответствующую автомодельному решению уравнений ЛОВ, когда пиковая амплитуда растёт пропорционально τ . С течением времени начинает сказываться истощение накачки, и эволюция импульса выходит на новую автомодельную стадию, соответствующую автомодельному решению уравнений ЛСЭ.

8. Развита теория МН при взаимодействии ЭМ волны со встречным прямолинейным электронным пучком в условиях циклотронного резонансного поглощения. Показано, что с ростом входной мощности полоса поглощения сдвигается в область более низких частот, и становится возможным незатухающее распространение волны. Это распространение сопровождается развитием МН, что приводит к режимам автомодуляции. Найдены точные аналитические решения в виде периодических стационарных волн, светлых и темных солитонов. Проведён приближенный анализ характера МН в окрестности верхней границы полосы непропускания. Для описания этой ситуации получено НУШ, для которого найдена граница смены характера неустойчивости на плоскости параметров входного сигнала. Условия абсолютной/конвективной МН уточнены на основе более строгого анализа асимптотической формы неустойчивых модуляционных возмущений, вычисленной методом перевала. При малых амплитудах сигнала границы смены характера МН, полученные на основе различных подходов, хорошо согласуются друг с другом.

9. Проведено численное моделирование циклотронного резонансного взаимодействия гармонического сигнала со встречным, изначально прямолинейным электронным пучком на основе усреднённых уравнений. Показано, что, когда амплитуда входного сигнала превышает амплитуду светлого неподвижного солитона, становится возможным распространение волны. При этом имеет место абсолютная МН, и возникает автомодуляция, в результате чего непрерывный сигнал постоянной амплитуды трансформируется в близкую к периодической последовательность бегущих светлых солитонов. Если увеличивать частоту входного сигнала, по мере удаления от границы полосы непропускания последовательность солитонов усложняется, в том числе, может становиться хаотической. При дальнейшем увеличении частоты МН становится конвективной и нестационарные автомодуляционные режимы сменяются стационарным одночастотным прохождением сигнала. Принципиальное влияние

отражений осложняет сопоставление с теоретическими выводами, в частности, граница смены характера МН зависит от длины системы. Однако при моделировании системы, согласованной на левой границе (что обеспечивается плавным нарастанием магнитного поля) полученная численно граница смены характера МН хорошо согласуется с теоретическими результатами. Также введён критерий определения нижней границы полосы непропускания, согласно которому она соответствует формированию в системе тёмного неподвижного солитона. Если входная амплитуда выше величины «хвостов» тёмного неподвижного солитона, то несмотря на рост амплитуды входного сигнала значение выходной мощности остаётся неизменным, что интерпретируется как непропускание.

10. Проведено 3-D PIC моделирование циклотронного взаимодействия ЭМ волны со встречным прямолинейным потоком электронов. Результаты моделирования подтверждают теоретические выводы о переходе между различными динамическими режимами при увеличении частоты входного сигнала. В полосе циклотронного поглощения входной сигнал затухает. С ростом частоты становится возможным прохождение волны, причём наблюдается формирование гребёнки солитонов. Продемонстрирована возможность преобразования непрерывного сигнала с частотой 241.3 ГГц в близкую к периодической последовательность импульсов с длительностью порядка 3-4 нс и пиковой амплитудой, превышающей амплитуду входного сигнала. В области более высоких частот нестационарные автомодуляционные режимы сменяются стационарным одночастотным прохождением сигнала.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Об автомодельном характере генерации импульсов сверхизлучения в электронно-волновом генераторе обратной волны // ЖЭТФ. 2018. Т. 154, № 4 (10). С. 691–697.
2. Rostuntsova A.A., Ryskin N.M., Ginzburg N.S. Self-similar amplification and self-compression of short microwave pulses during Cherenkov-type interaction with relativistic electron beams // Phys. Plasmas. 2020. Vol. 27, № 5. P. 053108.
3. Sergeev A.S., Yurovskiy L.A., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Zheleznov I.V., Rozental R.M., Rostuntsova A.A., Ryskin N.M. Entrainment, stopping, and transmission of microwave solitons of self-induced transparency in counter-propagating magnetized electron beam // Chaos. 2022. Vol. 32, № 5. P. 053123.
4. Rostuntsova A.A., Ryskin N.M., Zotova I.V., Ginzburg N.S. Modulation instability of an electromagnetic wave interacting with a counterpropagating electron beam under condition of cyclotron resonance absorption // Phys. Rev. E. 2022. Vol. 106, № 1. P. 014214.
5. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Исследование характера модуляционной неустойчивости при циклотронном резонансном взаимодействии излучения со встречным прямолинейным пучком электронов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31, №5. С. 597-609.
6. Rostuntsova A.A., Ryskin N.M., Ginzburg N.S. Self-similar analysis of short pulse amplification and generation in Cherenkov-type devices // 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Busan, South Korea, April 28–May 1, 2019. P. 1-2.

7. Rostuntsova A.A., Ryskin N.M., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Fedotov A.E., Zheleznov I.V. Formation of microwave soliton trains due to modulation instability under cyclotron resonance interaction of an initially rectilinear electron beam with a backward electromagnetic wave // 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 27-30 April 2021. P. 1-2.
8. Rostuntsova A.A., Ryskin N.M. Interaction of an electromagnetic wave with a counter-propagating electron beam under the condition of cyclotron resonance absorption: nonlinear periodic waves, modulation instability, and generation of solitons // 2022 23rd International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 25-29 April 2022. Monterey CA, USA. P. 292-293.
9. Rostuntsova A.A., Ryskin N.M. 3-D Particle-in-Cell Simulation of an Electromagnetic Wave Cyclotron Resonance Interaction with a Counterpropagating Electron Beam // 2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE'2024). Materials of the International Scientific and Technical Conference. Saratov State Technical University, September 26-27, 2024. Saratov, Russia. P. 29-32.
10. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Об автомодельном характере генерации коротких импульсов в лампе обратной волны // Материалы XVII международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. 05-10 февраля 2018 г. Саратов. С. 97.
11. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Автомодельные режимы усиления и генерации коротких импульсов электронными потоками // Материалы XII Международной школы-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2019), 1–6 октября 2019, Саратов. Саратов: ООО «Издательский центр «Наука». С. 42.
12. Ростунцова А.А. Автомодельные режимы усиления и компрессии коротких импульсов в приборах черенковского типа // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIV Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2019. С. 210-211.
13. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Анализ автомодельных процессов усиления и генерации импульсов в приборах черенковского типа // Нелинейные волны – 2020. XIX научная школа. 29 февраля – 6 марта 2020 года, Нижний Новгород. Тезисы докладов. Ниж. Новгород: ИПФ РАН. С. 206-207.
14. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Исследование модуляционной неустойчивости при циклотронном резонансном взаимодействии излучения со встречным электронным пучком // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XV Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2020. С. 216-217.
15. Rostuntsova A.A., Ginzburg N.S., Ryskin N.M. Self-similar character of short pulse amplification and generation by rectilinear electron beams // 2020 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS). 6-10 Dec. 2020.
16. Rostuntsova A.A., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Fedotov A.E., Rozental R.M., Zheleznov I.V., Zaslavsky V.Yu., Ryskin N.M. Formation of microwave solitons trains due to modulation instability under cyclotron resonance interaction of initially rectilinear electron beam with backward electromagnetic wave // 2020 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS). 6-10 Dec. 2020.
17. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Формирование солитонов самоиндуцированной прозрачности в потоке циклотронных электронов-осцилляторов при возбуждении непрерывным сигналом // В сб. Нелинейные дни в Саратове для молодых. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2021. Вып. 29: Материалы XXIX Всероссийской научной конференции, 26–29 апреля 2021. С. 86-87.
18. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Модуляционная неустойчивость и формирование солитонов самоиндуцированной прозрачности в потоке циклотронных электронов осцилляторов при возбуждении непрерывным сигналом // «Наноэлектроника, нанофотоника и

нелинейная физика»: тез. докл. XVI Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2021. С. 155-156.

19. Ростунцова А.А., Торгашов Р.А., Рыскин Н.М. 3D PIC моделирование распространения электромагнитной волны при взаимодействии со встречным прямолинейным потоком электронов в условиях циклотронного резонанса // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: Докл. XVII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2022. С. 165-166.
20. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Взаимодействие электромагнитной волны со встречным пучком электронов в условиях циклотронного резонанса: нелинейные волны, модуляционная неустойчивость и генерация солитонов // Нелинейные волны–2022. XX Научная школа. Тезисы докладов. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 7–13 ноября 2022 г. С. 218-219.
21. Ростунцова А.А. Исследование характера модуляционной неустойчивости при циклотронном резонансном взаимодействии излучения со встречным прямолинейным пучком электронов // Нелинейные дни в Саратове для молодых: сборник научных трудов. Саратов: Изд-во СГУ, 2023. 162 с. Вып. 17: материалы XXX Всероссийской научной конференции, 15–19 мая 2023, Саратов. С. 73-74.
22. Ростунцова А.А., Рыскин Н.М. Генерация солитонных частотных гребенок в процессе нелинейного циклотронно-резонансного взаимодействия электромагнитной волны со встречным потоком электронов // Нелинейные волны–2024. XXI Научная школа. Тезисы докладов. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 5–11 ноября 2024 г. С. 205-206.
23. Ростунцова А.А. Автомодельный характер генерации импульсов сверхизлучения в лазерах на свободных электронах с электромагнитной накачкой // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: Докл. XIX Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2024. С. 99-100.