

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики

**Усиление и генерация ультракоротких микроволновых импульсов
в некоторых системах типа электронный поток – электромагнитная волна**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 2211 группы

направления 03.04.01 «Прикладные математика и физика»

Института физики

Ростунцовой Алёны Александровны

Научный руководитель
зав. кафедрой динамических систем,
профессор, д.ф.-м.н.

подпись, дата

Н.М. Рыскин

Зав. кафедрой нелинейной физики
доцент, к.ф.-м.н.

подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Саратов 2021 г.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из центральных задач релятивистской СВЧ электроники является разработка методов генерации ультракоротких микроволновых импульсов (УКИ) и их периодических последовательностей. Источники УКИ, в зависимости от уровня мощности, длительности, спектра генерации и других параметров импульсов, актуальны для решения различных задач как исследовательского, так и прикладного характера [1], например, в наносекундной радиолокации большой дальности [2], при диагностике плазмы [3], в ускорительной технике [4] и др. В частности, периодические последовательности когерентных по фазе импульсов субмиллиметрового излучения, спектр которых формирует так называемую «частотную гребенку», находят применение в широкодиапазонной резонаторной спектроскопии [5].

В основе формирования УКИ могут лежать различные механизмы, причем весьма эффективным оказывается подход, основанный на перенесении в классическую электронику методов, хорошо известных в квантовой оптике и физике лазеров. В частности, стоит отметить оптическое явление самоиндуцированной прозрачности [6] и квантовый эффект сверхизлучения Дикке [7], которые реализуются при резонансном взаимодействии излучения с неинвертированными (пассивными) и инвертированными (активными) средами. В классической электронике подобные явления можно обнаружить в системах типа электронный поток – электромагнитная (ЭМ) волна, поскольку пучки электронов представляют собой движущиеся активные или пассивные среды.

В работах [8-10] исследовался классический аналог явления самоиндуцированной прозрачности при резонансном циклотронном взаимодействии излучения со встречным пучком невозбужденных электронов-осцилляторов. В частности, численное моделирование показало, что в такой системе существует возможность преобразования непрерывного сигнала постоянной амплитуды в близкую к периодической последовательность УКИ — солитонов самоиндуцированной прозрачности. Очевидный интерес представляет определение условий реализации такого нестационарного режима, причем важно не только получить

их из численного эксперимента, но и подтвердить теоретически путем проведения детального анализа режимов распространения волны. Такой анализ позволит дать ответ на вопрос, почему в одних случаях наблюдаются нестационарные режимы, а в других — стационарные, и как устроены области существования различных типов динамики системы в пространстве управляющих параметров. Представляется, что на процессы распространения волны в такой системе значительное влияние должна оказывать модуляционная неустойчивость (МН). Под МН понимают неустойчивость стационарной периодической нелинейной волны относительно медленных пространственных и временных модуляций [11]. Как было показано в [11-13] на примере систем, которые описываются модельными уравнениями типа нелинейных уравнений Шредингера (НУШ) и Клейна–Гордона, при возбуждении нелинейной среды с МН гармоническим сигналом картина его распространения определяется характером неустойчивости. При абсолютной МН наблюдаются нестационарные режимы с образованием солитонов, а при конвективной МН переходный процесс заканчивается установлением стационарного прохождения сигнала с постоянной амплитудой.

Также получил широкое распространение метод генерации УКИ с гигаваттной пиковой мощностью и субнаносекундной длительностью, основанный на использовании сверхизлучения электронных сгустков [14] в черенковской лампе обратной волны (ЛОВ) [15,16]. Однако при таком подходе существуют эффекты, ограничивающие пиковую амплитуду генерируемых импульсов. В ряде работ (например, [17-19]) для преодоления этих ограничений было предложено дополнить однородную ЛОВ секцией с уменьшающимся вдоль пространства взаимодействия сопротивлением связи. Однако нетривиальной задачей является выбор закона, по которому должно происходить профилирование, что, как правило, делается из эвристических соображений. В наших работах [20,21] было показано, что усиление и генерация импульсов в черенковских приборах носит автомодельный (самоподобный) характер. Поэтому предполагается, что закон профилирования следует выбирать таким образом, чтобы рас-

пространение импульса в дополнительной секции также оставалось автономным. Это позволяет установить аналитические законы, по которым во времени и пространстве меняются параметры импульса, что интересно для определения оптимальных режимов работы прибора.

Таким образом, тема магистерской работы является **актуальной**.

Целью работы является теоретическое исследование методов генерации и оптимизации параметров мощных микроволновых УКИ при взаимодействии электронных потоков со встречной (обратной) электромагнитной волной. Основными **задачами** для её достижения являются:

- Определение условий генерации периодической последовательности УКИ при взаимодействии гармонического сигнала со встречным потоком невозбужденных циклотронных электронов-осцилляторов: анализ характера МН в такой системе; нахождение точных аналитических стационарных решений (в частности, солитонных); определение параметров системы, при которых происходят переходы между различными режимами распространения волны.
- Исследование автономного распространения импульсов в пространственно-неоднородной ЛОВ с профилированием сопротивления связи: определение возможных законов профилирования, при которых существуют автономные решения, описывающие усиливающийся и сжимающийся в процессе распространения импульс; анализ физического смысла найденных решений; сопоставление теоретических выводов с результатами численного моделирования.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Для системы, в которой реализуется резонансное циклотронное взаимодействие непрерывной гармонической волны со встречным, изначально прямолинейным потоком электронов, найдены точные аналитические решения, описывающие стационарное распространение сигнала, причем обнаружены как периодические решения, так и решения в виде светлых и

темных солитонов. Также для такой системы впервые проведен анализ характера МН и определены аналитические границы между различными режимами распространения волны на плоскости параметров амплитуда – частота входного гармонического сигнала, причем показано их качественное и количественное соответствие результатам численного моделирования.

- Найдены автомодельные решения, описывающие режимы генерации импульсов в черенковской ЛОВ с изменяющимся вдоль пространства взаимодействия сопротивлением связи, и по ним установлены соответствующие законы профилирования. Один из таких законов совпадает с найденным в работах [17,18] из эвристических соображений. В численном эксперименте, моделирующем работу однородной ЛОВ с дополнительной секцией, в которой сопротивление связи меняется по найденному автомодельному закону, показана возможность увеличения пиковой амплитуды выходных импульсов как минимум в 2 раза по сравнению с однородным прибором. Установлены аналитические зависимости параметров сгенерированного импульса от координаты при движении по пространственно-неоднородной системе.

Научно-практическая значимость работы обусловлена возможностью использования полученных теоретических выводов и аналитических соотношений для выбора оптимальных параметров и режимов работы исследуемых приборов с целью генерации мощных микроволновых УКИ и их последовательностей.

Работа состоит из введения, двух глав, заключения и списка используемой литературы. **Глава 1** посвящена исследованию формирования последовательности солитонов самоиндуцированной прозрачности при циклотронном резонансном взаимодействии излучения со встречным потоком невозбужденных электронов-осцилляторов. В **главе 2** рассматриваются автомодельные режимы генерации импульсов при черенковском электронно-волновом взаимодействии в приборах типа ЛОВ с изменяющимся вдоль пространства взаимодействия сопротивлением связи.

Результаты работы были представлены на ряде конференций:

- 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 27-30 April 2021;
- 47th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS-2020) and 2nd ASIA Pacific Conference on Plasma and Terahertz Science (APCOPTS-2020), December 6-10, 2020;
- Международная конференция «XIX научная школа “Нелинейные волны – 2020”», 29 февраля – 6 марта 2020 г., Нижний Новгород, Россия;
- 12-я Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2019), 1-6 октября 2019 г., Саратов, Россия;
- XIV и XV Всероссийские научные конференции молодых учёных «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 17-19 сентября 2019 г. и 8-10 сентября 2020 г., Саратов, Россия;
- Школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2021», 26-29 апреля 2021 г., Саратов, Россия;
- XI научно-практическая конференция “Presenting Academic Achievements to the World”, 18-19 мая 2020, СГУ, Саратов, Россия.
- Студенческая научная конференция Института физики СГУ, 2021. Доклад награжден Дипломом I степени.

Результаты, полученные в магистерской работе, опубликованы в работах [20-27], а также были использованы при выполнении гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10119).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обсуждается актуальность и мотивация проводимых исследований, формулируются цели и задачи магистерской работы, описаны её научная новизна и практическая ценность, представлены апробация и публикации по результатам выполненных исследований.

Глава 1 посвящена резонансному циклотронному взаимодействию излучения со встречным потоком невозбужденных электронов-осцилляторов.

В *Разделе 1.1.* описано оптическое явление самоиндуцированной прозрачности, при котором короткий световой импульс в двухуровневой неинвертированной среде в условиях резонанса принимает вид солитона [6,11]. Сформулированы физические принципы, лежащие в основе аналогии, проводимой между такой квантовой системой и прямолинейным пучком электронов в продольном магнитном поле, который взаимодействует со встречной волной постоянной амплитуды в условиях циклотронного резонанса.

В *Разделе 1.2.* рассмотрена принципиальная схема системы, в которой реализуется исследуемое электронно-волновое взаимодействие, а также приведены уравнения [8-10], которые его описывают:

$$\frac{\partial a}{\partial t} - \frac{\partial a}{\partial z} = -p, \quad \frac{\partial p}{\partial z} + ip(\delta + |p|^2) = a. \quad (1)$$

Здесь t, z — безразмерные время и координата, p — нормированный поперечный импульс электронов, a — безразмерная комплексная амплитуда поля волны, δ — начальная расстройка циклотронного резонанса. Сформулированы граничные условия, дополняющие уравнения (1): электронный поток обладает нулевой вращательной скоростью на входе в систему, а входной гармонический сигнал постоянной амплитуды подается с её коллекторного конца (безразмерная длина системы обозначена как l):

$$p(z=0) = 0, \quad a(z=l) = a_0 \exp[i\omega_0 t]. \quad (2)$$

В *Разделе 1.3.* для решений уравнений (1) в виде монохроматических волн с частотой ω и волновым числом k получено нелинейное дисперсионное соотношение, зависящее от амплитуды волны импульса P_0 ,

$$(\omega + k)(k - \delta - |P_0|^2) = -1 \quad (3)$$

и вид дисперсионной диаграммы (Рис. 1а). Обнаружено, что в системе существует полоса непропускания, границы которой движутся вниз по частоте с ростом амплитуды волны. С помощью критерия Лайтхилла [11] показано, что на верхней ветви дисперсионной характеристики имеет место МН.

В *Разделе 1.4.* получено НУШ, которое описывает динамику системы вблизи верхней частоты отсечки. Известный для НУШ критерий смены характера МН с конвективного на абсолютный при изменении амплитуды волны [12] применен в контексте рассматриваемой модели.

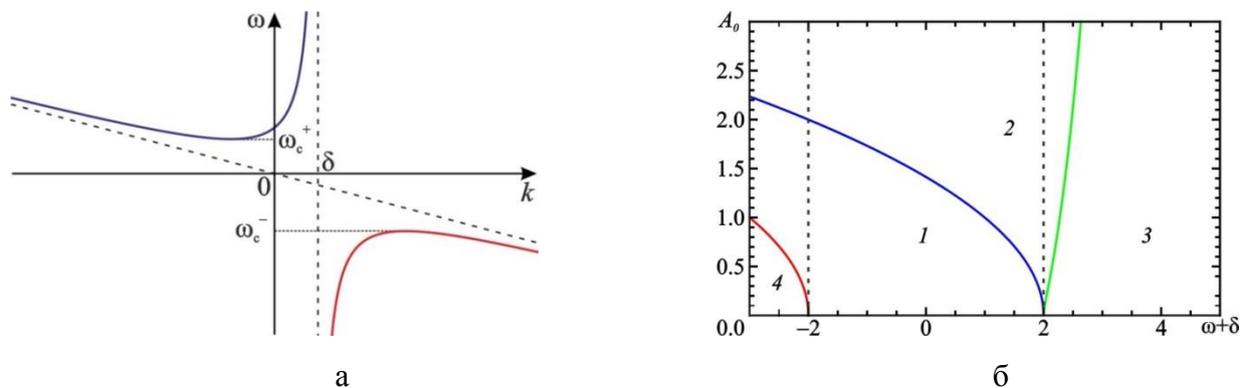


Рис. 1. Вид дисперсионной диаграммы (а) и теоретическое разбиение плоскости параметров амплитуда – частотная расстройка волны на области различных режимов (б): 1 – непропускание; 2 – абсолютная МН; 3 – конвективная МН; 4 – отсутствие МН.

В *Разделе 1.5.* на основе проведенного рассмотрения сделан вывод о существовании 4-х возможных режимов распространения волны: непропускание, когда волна полностью поглощается; абсолютная МН, где ожидается генерация периодических и хаотических последовательностей импульсов; конвективная МН и отсутствие МН, которые соответствуют стационарному прохождению сигнала. Получено теоретическое разбиение плоскости параметров амплитуда – частотная расстройка волны на области различных режимов (Рис. 1б).

В *Разделе 1.6.* для стационарных решений, которые искались в виде

$$a(z,t) = a(z)e^{i\omega t}, \quad p(z,t) = p(z)e^{i\omega t}, \quad (4)$$

получена динамическая система 2-го порядка, аналогичная колебаниям консервативного нелинейного осциллятора в потенциальной яме. Проанализировано поведение осциллятора при различных параметрах системы, и для всех возможных случаев найдены точные аналитические решения. Они выражаются через эллиптические функции Якоби и являются периодическими. Когда период решений стремится к бесконечности, они описывают неподвижные солитоны. Показано, что одно из таких решений представляет собой «светлый» солитон

(описывает максимум поля) (см. Рис. 2а), причем его амплитуда линейно зависит от параметра частотной расстройки $\Delta = \omega + \delta$:

$$I_{\max} = 4 - 2\Delta, \quad (5)$$

где I — интенсивность поля волны. Также обнаружена ещё одна предельная ситуация, соответствующая «темным» неподвижным солитонам (описывают минимум поля) (см. Рис. 2б). При удалении от минимума интенсивность поля стремится к постоянным значениям, которые также зависят только от Δ :

$$I_{\max} = \frac{(\Delta^2 - 6)\sqrt{12 + \Delta^2} - \Delta^3}{27}. \quad (6)$$

Найденные решения также обобщены на случай стационарных бегущих волн.

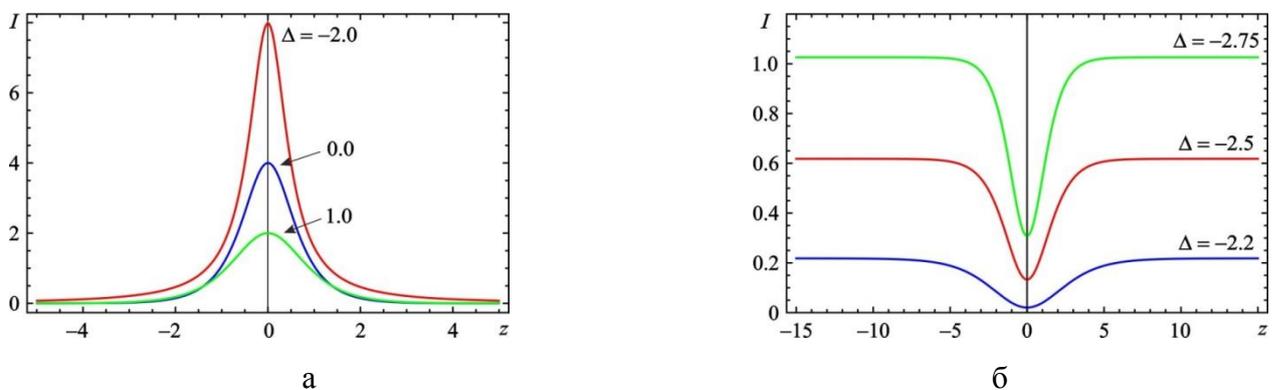


Рис. 2. Решения в виде «светлого» (а) и «темного» (б) неподвижного солитона при различных значениях параметра частотной расстройки Δ .

В Разделе 1.7. проведено сопоставление теоретических результатов с численным моделированием. Полученное в численном эксперименте разбиение плоскости параметров амплитуда – частотная расстройка входного сигнала на области различных режимов (Рис. 3а) демонстрирует хорошее качественное соответствие теоретическим выводам для безграничного случая, но принципиальная ограниченность системы приводит к количественным различиям. При этом верхняя граница полосы непропускания в точности совпадает с зависимостью (5) для амплитуды «светлого» неподвижного солитона, а нижняя – с зависимостью (6) для амплитуды хвостов «темного» неподвижного солитона. Обе границы не зависят от длины системы в отличие от границы смены характера МН, что связано с присутствием в системе отражений при $z = 0$. Результаты моделирования согласованной системы, когда в уравнения (1) при $z < l/2$ вво-

дится коэффициент, ослабляющий взаимодействие между электронами и волной, значительно лучше совпадают с теоретическим критерием (см. Рис. 3а).

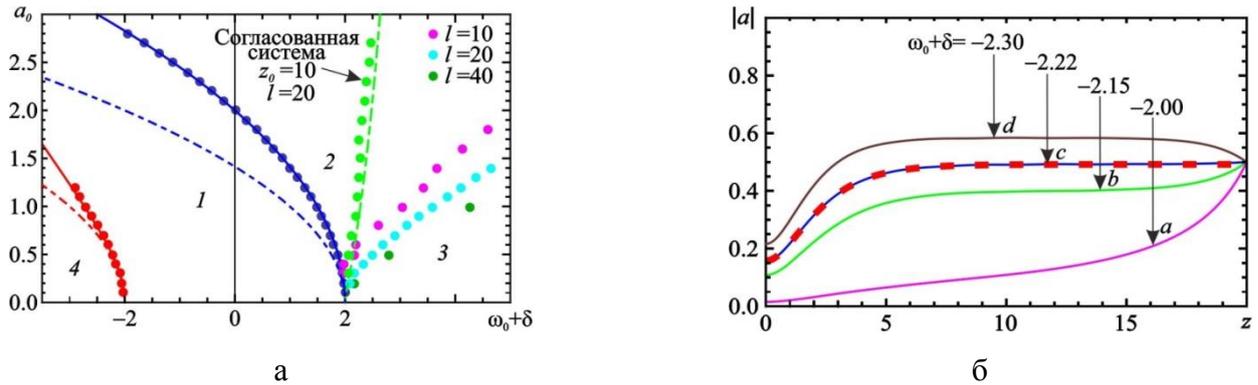


Рис. 3. а — разбиение плоскости параметров амплитуда – расстройка частоты входного сигнала на области различных режимов: 1 – непропускание, 2 – генерация последовательности импульсов, 3,4 – стационарное прохождение (кружками отмечены результаты численного моделирования, штриховыми линиями – теоретические границы для безграничного случая); б — численные стационарные распределения амплитуды поля вдоль системы при различных частотах вблизи нижней границы полосы непропускания, $a_0 = 0.5$.

Показано, что на нижней границе полосы непропускания распределение амплитуды поля вдоль системы имеет вид половины темного неподвижного солитона (кривая 3 на Рис. 3б), совпадающий с аналитическим решением. Правее неё, в области непропускания, устанавливается монотонно спадающее распределение поля (кривые 1,2 на Рис. 3б). Левее нее распределение также стационарно (МН отсутствует), но носит немонотонный характер, что и считалось началом пропускания (кривая 4 на Рис. 3б).

Продемонстрировано, что при пересечении верхней границы возникают нестационарные режимы генерации последовательности импульсов (абсолютная МН), причем именно вблизи границы последовательность близка к периодической (Рис. 4), а при увеличении частоты становится хаотической. При больших частотах происходит переход к стационарному распространению сигнала (конвективная МН), причем в системе устанавливается периодическое распределение амплитуды поля, которое хорошо описывается аналитическими стационарными решениями. Практически интересна область вблизи верхней границы полосы непропускания. Формула (5) фактически определяет соотношение между амплитудой и частотой входного сигнала, когда он трансформи-

руется в близкую к периодической последовательность бегущих справа налево солитонов самоиндуцированной прозрачности (Рис. 4б).

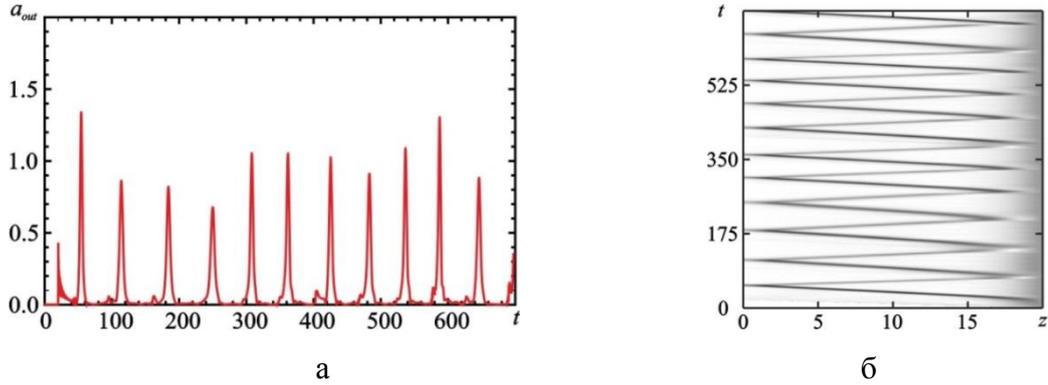


Рис. 4. Осциллограмма выходного сигнала (а) и пространственно-временное распределение амплитуды поля (б) (белый цвет соответствует амплитуде 0, черный – 2.5) в режиме генерации близкой к периодической последовательности импульсов, $a_0 = 1.0$, $\omega_0 + \delta = 1.48$.

Глава 2 посвящена черенковскому электронно-волновому взаимодействию в приборах типа ЛОВ с изменяющимся вдоль пространства взаимодействием сопротивлением связи.

В *Разделе 2.1.* описано явление сверхизлучения электронных сгустков, приводящее к генерации коротких импульсов в черенковской ЛОВ.

В *Разделе 2.2.* описана система уравнений нелинейной нестационарной теории ЛОВ [15-21]

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} - \frac{\partial F}{\partial \xi} = -\chi(\xi) \langle e^{-i\theta} \rangle, \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = -\chi(\xi) \text{Re}(F e^{i\theta}), \quad (7)$$

где F — безразмерная амплитуда синхронной гармоники поля, ξ и τ — безразмерные координата и время соответственно, θ — фаза электрона относительно волны, $\langle \dots \rangle$ — усреднение по начальным фазам электронов, $\chi(\xi) = \sqrt{K(\xi)/K(L)}$, $K(\xi)$ — сопротивление связи, L — безразмерная длина системы, причем в однородном случае $\chi(\xi) = 1$. Указаны начальные и граничные условия, отражающие невозмущенный пучок электронов на входе в волноводную систему и малое начальное возмущение поля.

В *Разделе 2.3.* исследуется однородная ЛОВ. Путем численного моделирования показано, что пиковая амплитуда выходного импульса растет с увели-

чением длины прибора до некоторого предельного значения, при котором рост прекращается в силу генерации вторичных импульсов [20]. Чем больше начальное возмущение, тем меньше значение амплитуды «насыщения» и длина, при которой оно достигается. Обсуждается физический смысл дополнения однородной ЛОВ секцией с уменьшающимся в направлении распространения импульса сопротивлением связи с целью подавления вторичной генерации [17-19].

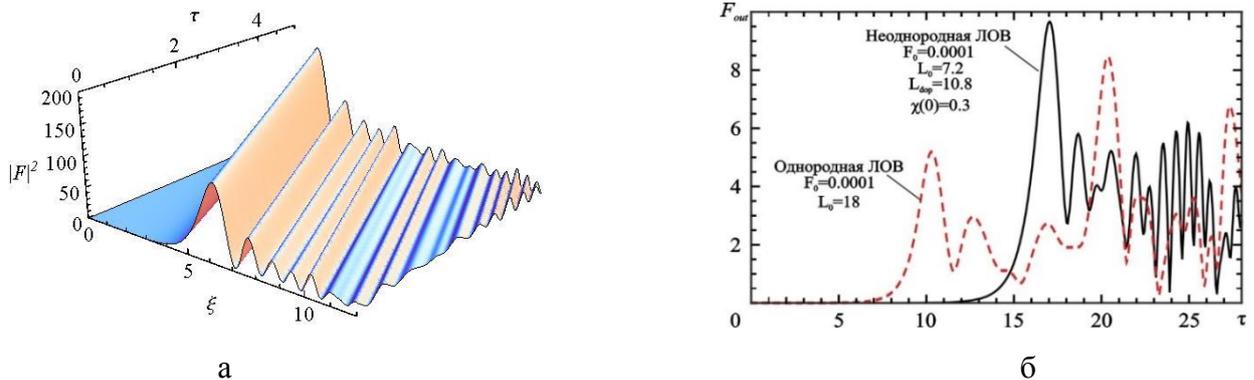


Рис. 5. а — вид автомодельного решения, $\chi_0 = 1$, $\xi_0 = 20$; б — сравнение осциллограмм выходного сигнала однородной и пространственно-неоднородной ЛОВ одной и той же суммарной длины при численном моделировании.

Раздел 2.4. посвящен поиску автомодельных решений в пространственно-неоднородной ЛОВ, что возможно, когда зависимость $\chi(\xi)$ степенная. Обнаружено два варианта степенного закона, которые допускают автомодельное решение уравнений (7). Первый вариант соответствует сопротивлению связи, которое падает в направлении распространения волны обратно пропорционально координате $\chi = \chi_0 / \sqrt{\xi_0 - \xi}$. В этом случае автомодельное решение имеет вид импульса, за которым следуют быстрые, но менее интенсивные осцилляции (Рис. 5а). Его пиковая амплитуда растет пропорционально квадратному корню из координаты $F \sim \sqrt{\xi_0 - \xi}$, а ширина остается постоянной. Такой закон изменения сопротивления связи аналогичен найденному в [18] из эвристических соображений. Второй же вариант не представляет физического интереса в рамках исследуемой модели, т.к. в нём направления уменьшения сопротивления связи и амплитуды автомодельного решения совпадают.

В *Разделе 2.5.* представлены результаты численного моделирования пространственно-неоднородной ЛОВ, в которой однородная область дополнена

начальной секцией, в которой сопротивление связи уменьшается по найденному автомодельному закону. Показано, что когда импульс достигает дополнительной секции, квадрат его амплитуды действительно начинает зависеть от координаты по линейному закону (Рис. 6а), а ширина практически остается постоянной (Рис. 6б). В целях оптимизации длину однородной секции следует выбирать соответствующей насыщению пиковой амплитуды выходного импульса в однородном приборе, что зависит от величины начального возмущения. Также представлено исследование зависимости пиковой амплитуды выходного импульса от сопротивления связи в начале системы и длины неоднородной секции. Для реалистичных длин прибора продемонстрирована возможность увеличения пиковой амплитуды импульса практически в два раза по сравнению с однородной ЛОВ (Рис. 5б).

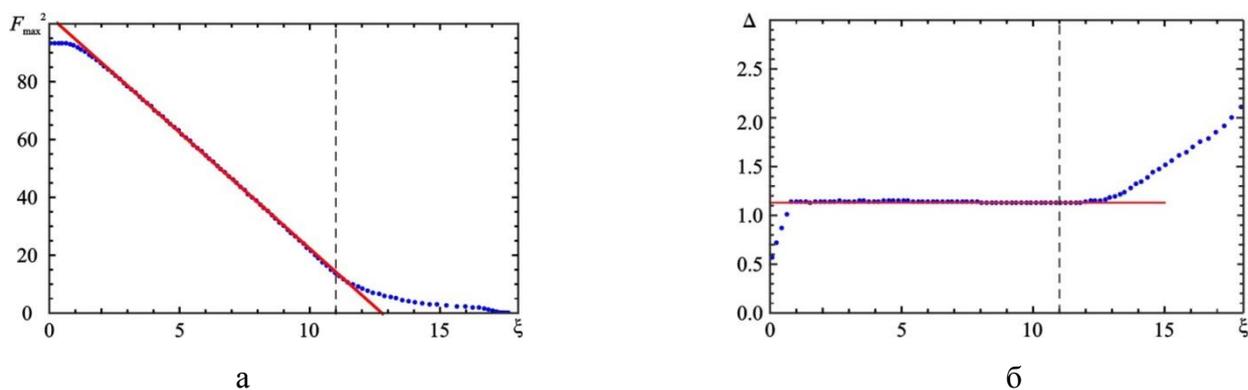


Рис. 6. Пример зависимости квадрата пиковой амплитуды импульса (а) и его ширины (б) от координаты в пространственно-неоднородной ЛОВ. Вертикальная пунктирная линия разделяет секции с постоянным и изменяющимся вдоль длины сопротивлением связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской работы были получены следующие основные результаты.

- Для резонансного циклотронного взаимодействия непрерывного гармонического сигнала со встречным потоком невозбужденных осцилляторов:

1. Показано, что в системе существует полоса непропускания частот, границы которой зависят от амплитуды распространяющейся волны. Найдены условия, при которых в системе возможно развитие МН. Определено прибли-

женное соотношение между параметрами волны, при которых происходит смена характера этой неустойчивости с конвективного на абсолютный.

2. Указана возможность реализации в системе различных динамических режимов в зависимости от соотношения между амплитудой и частотой волны: непропускание; автомодуляция волны, приводящая в том числе к генерации периодической или хаотической последовательности солитонов (развитие абсолютной МН); стационарный одночастотный режим распространения волны (развитие конвективной МН или отсутствие неустойчивости).

3. Найдены точные аналитические решения, описывающие стационарное распространение сигнала. Они выражаются через эллиптические функции Якоби и являются периодическими. Определены предельные ситуации, когда периодические решения переходят в «светлые» и «темные» солитоны.

4. В ходе численного моделирования обнаружено, что верхняя граница полосы непропускания на плоскости параметров амплитуда – частотная расстройка входного сигнала в точности описывается зависимостью амплитуды «светлого» неподвижного солитона от частоты. Выше этой границы имеет место абсолютная МН, и непрерывный входной сигнал разбивается на последовательность бегущих солитоноподобных импульсов, причем эта последовательность вблизи границы близка к периодической, а при удалении от неё становится хаотической. Таким образом, определено соотношение между параметрами входного сигнала, когда генерируется близкая к периодической последовательность солитонов. Также показано, что нижняя граница полосы непропускания на плоскости параметров соответствует зависимости амплитуды «темного» неподвижного солитона от частоты.

5. Показано, что границы полосы непропускания не зависят от длины системы, в то время как граница смены характера МН существенным образом сдвигается при её вариации, что связано с присутствием отражений. Проведено моделирование согласованной системы и показано, что граница смены характера МН в таком случае гораздо лучше согласуется с теоретической кривой.

- *Для черенковского электронно-волнового взаимодействия в приборах типа пространственно-неоднородной ЛОВ:*

1. Определены возможные законы изменения сопротивления связи вдоль пространства взаимодействия ЛОВ, при которых существуют автомодельные решения.

2. В численном моделировании рассмотрена конструкция ЛОВ, в которой классический прибор дополнен секцией с сопротивлением связи, изменяющимся вдоль длины по одному из обнаруженных законов, допускающих автомодельное решение. Продемонстрировано, что на этапе распространения импульса по секции с изменяющимся сопротивлением связи поведение его основных характеристик хорошо описывается аналитическими законами, полученными из автомодельного решения. Так, квадрат амплитуды импульса растет линейно в зависимости от его положения, а ширина при этом остается неизменной.

3. Показано, что длина однородной секции, при которой в однородном приборе происходит насыщение пиковой амплитуды генерируемого импульса, зависит от величины начального возмущения. При его увеличении насыщение выходного импульса происходит при всё меньших длинах системы и соответствует всё меньшим пиковым амплитудам.

4. Построены зависимости пиковой амплитуды выходного импульса от значения сопротивления связи в начале системы и длины неоднородной секции. Продемонстрировано, что эти зависимости обладают явно выраженным максимумом, причем увеличение длины дополнительной секции при уменьшении сопротивления связи на входе в пространство взаимодействия приводит к росту пиковой амплитуды выходного импульса. Для параметров, примерно соответствующих реальным приборам, продемонстрирована возможность увеличения пиковой амплитуды импульса практически в два раза по сравнению с однородной ЛОВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
2. *Бердышев В.П., Гарин Е.Н., Фомин А.Н. и др.* Радиолокационные системы. Красноярск: СФУ, 2011. 400 с.
3. *Хилд М., Уортон С.* Микроволновая диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1968. 392 с.
4. *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
5. *Третьяков М. Ю.* Высокоточная резонаторная спектроскопия атмосферных газов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2016. 320 с.
6. *McCall S.L., Hahn E.L.* Self-induced transparency by pulsed coherent light // *Phys. Rev. Lett.* 1967. Vol. 18, No. 21. P. 908-911.
7. *Dicke R. H.* Coherence in Spontaneous Radiation Processes // *Phys. Rev.* 1954. Vol. 93. P. 99.
8. *Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С.* Самоиндуцированная прозрачность, компрессия и остановка электромагнитных импульсов при взаимодействии с пучками невозбужденных классических осцилляторов // *ЖЭТФ.* 2011. Т. 140, № 5(11). С. 890-899.
9. *Зотова И.В., Гинзбург Н.С., Железнов И.В., Сергеев А.С.* Модуляция интенсивного СВЧ-излучения при резонансном взаимодействии со встречным потоком невозбужденных циклотронных осцилляторов // *Письма в ЖТФ.* 2014. Т. 40, № 12. С. 1-10.
10. *Zotova I.V., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Kocharovskaya E.R., Zaslavsky V.Yu.* Conversion of an Electromagnetic Wave into a Periodic Train of Solitons under Cyclotron Resonance Interaction with a Backward Beam of Unexcited Electron-Oscillators // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 113. 143901.
11. *Рыскин Н.М., Трубецков Д.И.* Нелинейные волны. М: URSS, 2017. 312 с.

12. *Балякин А.А., Рыскин Н.М.* Смена характера модуляционной неустойчивости вблизи критической частоты // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, № 5. С. 6-13.
13. *Balyakin A.A., Ryskin N.M.* Modulation instability in a nonlinear dispersive medium near cut-off frequency // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2004. Vol. 7, No. 1. P. 34-42.
14. *Гинзбург Н.С.* Об эффекте сверхизлучения сгустков релятивистских электронов-осцилляторов // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14, №. 5. С. 440-444.
15. *Eltchaninov A.A., Korovin S.D., Mesyats G.A., Pegel I.V., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I.* Review of studies of superradiative microwave generation in X band and Ka band relativistic BWOs // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, № 3. P. 1093-1099.
16. *Ginzburg N.S., Zotova I.V., Cross A.W., Phelps A.D.R., Yalandin M.I., Rostov V.V.* Generation, amplification, and nonlinear self-compression of powerful superradiance pulses // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41, № 4. P. 646-660.
17. *Korovin S. D., Eltchaninov A. A., Rostov V. V., Shpak V.G., Yalandin M.I., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V.* Generation of Cherenkov superradiance pulses with a peak power exceeding the power of the driving short electron beam // Phys. Rev. E. 2006. V. 74, 016501.
18. *Ельчанинов А.А., Коровин С.Д., Пегель И.В., Ростов В.В., Яландин М.И.* Генерация мощных сверхкоротких импульсов СВЧ-излучения // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 8-9. С. 1-9.
19. *Rostov V.V., Savilov A.V.* Super-radiant backward-wave oscillators with enhanced power conversion // Physics of Plasmas. 2013, V. 20, 024501.
20. *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.
21. *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 // Physics of Plasmas. 2020, V. 27, 053108.

22. *Ростунцова А.А.* Автомодельные режимы усиления и компрессии коротких импульсов в приборах черенковского типа // Сборник трудов XIV Всероссийской конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 17-19 сентября 2019 г., Саратов. С. 210-211.
23. *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. С. 42.
24. *Ростунцова А.А., Рыскин Н.М.* Анализ автомодельных процессов усиления и генерации импульсов в приборах черенковского типа // Сборник тезисов докладов международной XIX научной школы «Нелинейные волны – 2020», Нижний Новгород, 29 февраля – 6 марта 2020 г. С. 206-207.
25. *Ростунцова А.А., Рыскин Н.М.* Исследование модуляционной неустойчивости при циклотронном резонансном взаимодействии излучения со встречным электронным пучком // Сборник трудов XV Всероссийской конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 8-10 сентября 2020 г., Саратов. С. 216-217.
26. *Ростунцова А.А., Рыскин Н.М.* Формирование солитонов самоиндуцированной прозрачности в потоке циклотронных электронов-осцилляторов при возбуждении непрерывным сигналом // Материалы XXIX Всероссийской научной конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых», 26–29 апреля 2021, Саратов. С. 86-87.
27. *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 // Proc. 22nd International Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2021), 27-30 April 2021, Virtual Event.