

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Ростунцовой Алёны Александровны
«Нелинейные волновые процессы при усилении и генерации ультракоротких импульсов в
системах типа электронный поток – электромагнитная волна»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по научной специальности 1.3.4. – Радиофизика

Диссертация А. А. Ростунцовой «Нелинейные волновые процессы при усилении и генерации ультракоротких импульсов в системах типа электронный поток – электромагнитная волна» представлена на 132 страницах, содержит 61 рисунок и две таблицы. Список литературы включает 113 наименований.

Основная часть диссертации включает введение, три главы и заключение.

Выбор темы диссертационной работы обоснован во введении. Здесь же дан обзор состояния исследований по выбранному направлению, определены задачи работы, обозначены использованные методы.

Тема диссертационного научного исследования актуальна. В практическом плане актуальность связана с необходимостью в разработках источников СВЧ-импульсов гигаваттной пиковой мощности и малой (наносекундной и субнаносекундной) длительности, а также источников высокочастотных последовательностей таких импульсов. Такие разработки важны, в том числе, для создания новых средств дистанционного воздействия на электронику. В физическом аспекте, малая длительность импульсов, от нескольких циклов колебаний, приводит к тому, что в механизмах генерации таких импульсов возникает специфика, отличающая их от хорошо известных механизмов квазистационарной генерации. Один из подходов к получению ультракоротких импульсов опирается на использование различных нестационарных электронно-волновых процессов в системах с протяжёнными электронными пучками, реализация которых становится возможной за счет эксплуатации различных нелинейностей. Тема диссертации как раз и посвящена теоретическому исследованию таких процессов.

Работа выполнена в Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н. Г. Чернышевского, где исследования в обозначенной области ведутся на высоком уровне.

Методы физического исследования, использованные в диссертации, включают теорию и численные расчеты. Теоретическое описание опирается на хорошо разработанный подход в электронике, когда уравнения движения электронов в поле электромагнитной волны (в том числе с поперечным движением в присутствии транспортирующего магнитного поля) и уравнения возбуждения волноводных мод с возможным переходом в сопровождающую систему отсчета могут быть сведены к обобщенным уравнениям переноса той или иной сложности, описывающих пространственно-временную структуру волновых импульсов. В зависимости от того, какой симметрией обладают эти уравнения, из решения при подходящих граничных и начальных условиях могут обладать теми или иными свойствами автомодельности (самоподобия). Анализом таких уравнений и их решений, поиском условий существования решений с определенным характером автомодельного поведения и занимался автор диссертации.

Глава 1 диссертации посвящена анализу автомодельных процессов усиления и компрессии импульсов при черенковском взаимодействии электронного потока с попутной электромагнитной волной. Сформулированы физические принципы, лежащие в основе усиления коротких импульсов в черенковской лампе бегущей волны. Приведены основные

уравнения одномерной нестационарной теории. Проведен анализ автомодельного усиления импульсов в приближении малого изменения энергии электронов. Определены законы эволюции параметров автомодельного импульса, проведено численное моделирование. Проведен анализ автомодельного усиления импульсов в черенковской ЛБВ в приближении малого изменения скорости электронов, которое представляет наибольший интерес с точки зрения получения высокого коэффициента преобразования мощности. Показано, что на малых временах поведение импульса соответствует автомодельным законам, полученным в приближении малого изменения энергии электронов, но с течением времени происходит переход на другую автомодельную асимптотику, соответствующую приближению малого изменения скорости. Определено условие максимального преобразования мощности. Представлены результаты группового анализа симметрий уравнений черенковского электронно-волнового взаимодействия в приближении малого изменения энергии электронов. Определены базисные симметрии уравнений взаимодействия в черенковской ЛБВ и установлен их физический смысл. Продемонстрировано, что базисные симметрии образуют алгебру Ли, что позволяет формировать их комбинации и получать новые симметрии исследуемых уравнений. С помощью такого подхода получено известное решение в виде бегущих волн, решение, соответствующее усилению гармонического входного сигнала, а также рассмотрена модификация автомодельного решения, которая описывает усиление импульса с частотной модуляцией.

В главе 2 представлены результаты исследования автомодельного характера генерации коротких импульсов в процессах взаимодействия электронного пучка с обратной электромагнитной волной. Изложены физические причины генерации фронтального всплеска на импульсе черенковской ЛОВ, приведена аналогия из квантовой электроники. Представлены уравнения нелинейной нестационарной теории черенковского взаимодействия электронов со встречной волной в приближении малого изменения энергии электронов. Сформулированы начальные и граничные условия, необходимые для моделирования генерации короткого импульса. Автомодельное решение для случая взаимодействия электронов с попутной волной обобщено на случай взаимодействия с обратной волной. Выполнено сравнение автомодельного решения с численным расчетом. Обнаружена оптимальная длина пространства взаимодействия, при которой выходная амплитуда импульса достигает максимального значения. Показано, что существование оптимума обусловлено генерацией вторичных импульсов. Рассмотрен вопрос об автомодельной эволюции импульсов в ЛОВ с профилированием сопротивления связи, показано существование двух возможных законов профилирования сопротивления связи, при которых существуют автомодельные решения. Рассмотрена генерация импульсов в лазере на свободных электронах с накачкой попутной волной и встречным рассеянием. Представлены уравнения, найдено их автомодельное решение, соответствующее усиливающемуся и сжимающемуся импульсу, и это подтверждено в численном моделировании. Показано, что эволюция импульса проходит через две автомодельные стадии, когда решение типа ЛОВ с течением времени асимптотически выходит на решение типа ЛСЭ.

В главе 3 рассматривается задача о генерации последовательности коротких солитоноподобных импульсов при взаимодействии изначально прямолинейного электронного потока со встречной волной в условиях циклотронного резонанса. Эта часть работы в силу наличия дополнительной степени свободы в движении электронов наиболее сложна для анализа, но и наиболее богата физическими эффектами. Сформулированы физические принципы, лежащие в основе образования солитонов самоиндуцированной

прозрачности при взаимодействии электромагнитной волны со встречным прямолинейным потоком электронов в условиях циклотронного резонанса, представлены основные уравнения. Для решений в виде монохроматических волн получено и проанализировано нелинейное дисперсионное соотношение. Показано, в каком месте дисперсионной характеристики имеет место модуляционная неустойчивость. Выполнен поиск решений в виде стационарных волн. Найдены точные решения, в том числе приобретающие солитонный характер. Проанализирован характер неустойчивости (конвективная или абсолютная). Представлены результаты численного моделирования на основе усредненных уравнений. Определены области параметров, где наблюдается тот или другой характер неустойчивости. Представлены результаты трехмерного численного моделирования взаимодействия прямолинейного электронного потока со встречной волной в условиях циклотронного резонанса. Показана возможность генерации периодической последовательности наносекундных импульсов, пиковая мощность которых превышает мощность входного сигнала.

По содержанию диссертационной работы можно заключить, что она соответствует следующим направлениям исследований, определенным в паспорте научной специальности 1.3.4. – Радиофизика (отрасль науки – физико-математические): 1. Разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы (в части электромагнитных волн); поиски путей создания высокоэффективных источников когерентного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

В числе важнейших научных результатов диссертанта, обладающих новизной, отмечу следующие.

Впервые показано, что эволюция короткого импульса, усиливающегося в черенковской лампе бегущей волны, 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 электромагнитной 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 показано, что генерация последовательности солитоноподобных импульсов при циклотронном резонансном взаимодействии гармонической волны со встречным прямолинейным потоком электронов связана с развитием модуляционной неустойчивости. Найдены условия, при которых эта неустойчивость является абсолютной или конвективной, и построена граница смены ее характера на плоскости параметров входного сигнала. Найдены новые точные аналитические решения, описывающие распространение стационарных периодических волн, светлых и темных солитонов при взаимодействии прямолинейного электронного потока со встречной монохроматической волной в условиях циклотронного резонанса.

Таким образом, автором диссертационной работы развиты теоретические подходы к описанию волновых импульсов, эволюционирующих в соответствии с определенными

законами самоподобия (например, сжатие или увеличение амплитуды с сохранением формы), при распространении вдоль протяженных электронных пучков при черенковском и циклотронном механизмах взаимодействия. Получены новые и подтверждены известные автомодельные решения для черенковских ЛБВ и ЛОВ, получены решения для ЛСЭ, а для случая циклотронного взаимодействия электромагнитной волны со встречным электронным пучком построена теория модуляционной неустойчивости и определены условия генерации последовательности солитоноподобных импульсов.

Фундаментальная ценность выполненной работы, заключается, на мой взгляд, в том, что выработан единый подход к описанию процессов электронно-волнового взаимодействия в широком классе электронных приборов с длительной инерционной группировкой (пока что в рамках черенковского и циклотронного механизма), допускающий перенос на устройства с другими типами взаимодействия.

С практической точки зрения, достигнутое в работе углубленное понимание физических процессов принесет пользу в решении задач оптимизации при разработке мощных (гигаваттного уровня) источников ультракоротких импульсов излучения в СВЧ- и более коротковолновых диапазонах с протяженными электронными пучками: черенковского, гирорезонансного и смешанного типов.

Достоверность полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Исползованные автором методы теоретического описания взаимодействия между протяженными электронными потоками и бегущими электромагнитными волнами являются общепризнанными, и начиная с 1970-х годов успешно апробированы на множестве задач релятивистской высокочастотной электроники. С опорой на эти методы в ряде отечественных и зарубежных исследовательских организаций были разработаны источники мощных импульсных источников излучения черенковского и гирорезонансного типов, работающие в различных диапазонах от дециметрового до терагерцового. Методы, используемые автором диссертации для поиска автомодельных решений соответствующих уравнений, включая методы их группового анализа, также являются общепризнанными. То же можно сказать и о методах, использованных при определении типов модуляционной неустойчивости в задаче о генерации последовательности солитоноподобных импульсов в рамках циклотронного механизма (запись нелинейного уравнения Шредингера, асимптотический анализ методом перевала). Далее, автор сопровождает свой теоретический анализ расчетами различных уровней сложности – от численного решения тех модельных уравнений, которые подвергаются анализу, до полностью электромагнитного вычислительного эксперимента с использованием трехмерного кода CST Studio Suite, широко используемого в мировой практике разработок в области вакуумной электроники. Кроме того, проводится сопоставление получаемых результатов с экспериментальными данными во всех случаях, где таковые имеются.

Основные положения, выносимые на защиту, подробно обоснованы в тексте диссертации в соответствующих ее разделах: первое и второе положения – в главе 1 (п. 1.3, п. 1.4), третье – в главе 2 (п. 2.2, п. 2.3), четвертое положение – в главе 3 (п. 3.3 – 3.6).

Диссертация обладает внутренним единством и, судя по цельному авторскому стилю, написана автором самостоятельно. Личный вклад диссертанта в проведенные исследования, а также его вклад в написание научных статей, четко обозначен. Признаков неправомерных заимствований в тексте диссертации не обнаруживается.

Автор диссертации, с одной стороны, демонстрирует мастерство теоретического анализа с применением нестандартных для практического физика, но привычных для математика приемов решения дифференциальных уравнений и их группового анализа, с

другой стороны – не отходит от физического понимания процессов в исследуемых системах.

Материалы диссертационной работы должным образом опубликованы. Имеется пять статей в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК (в том числе ЖЭТФ, Physics of Plasmas, Chaos, Phys. Rev. E; Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. Имеется четыре 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. Таким образом, публикационные требования, предъявляемые к кандидатской диссертации, выполнены. Результаты работы 19 раз представлялись на профильных научных конференциях и научных школах, в том числе трижды за рубежом: на конференциях IVEC в Канаде и Нидерландах, ICOPS в Сингапуре.

Диссертация оформлена аккуратно и в соответствии с ГОСТ.

Существенных замечаний, которые бы снижали оценку диссертационной работы, у оппонента не имеется.

Имеется, однако, несколько замечаний методического характера.

1. В применяемой автором модели описания электронно-волнового взаимодействия электронный пучок представляется «траекторным» способом как совокупность частиц, инжектированных в пространство взаимодействия с равномерным распределением по фазам высокочастотного колебания. Траектория каждого электрона проходит через пространство взаимодействия от начала до конца, при этом недопустимо обращение в ноль скорости какой-либо частицы. Поэтому отсутствует возможность для описания ситуаций с остановкой или отражением частиц. Вместе с тем, возникновение таковых – достаточно частое явление в высокоэффективных СВЧ-приборах, в особенности, когда существенен объемный заряд электронного пучка. Было бы полезно диссертанту пояснить, возникали ли такие случаи в рассматриваемых задачах, и если да, то как они обрабатывались.

2. В используемом автором подходе отсутствует возможность описания ситуаций, когда в систему инжектируется фронт электронного тока, перед которым частицы отсутствуют. В используемой автором диссертации модели это означает обрыв электронной траектории. Вместе с тем, в большинстве приборов мощной импульсной релятивистской СВЧ-электроники используются электронные пучки с током, длительность фронта которого может быть достаточно малой: зачастую сопоставимой с временем пробега электромагнитной волны через пространство взаимодействия или даже меньшей. В таких ситуациях именно фронт тока электронного пучка является носителем тех достаточно мощных высокочастотных колебаний в широкой полосе частот, которые выступают затравкой для дальнейшей генерации импульса излучения в приборе. Автор диссертации в рамках своего подхода не имеет возможности описывать подобные ситуации. Поэтому рассматривая, например, генерацию импульсов «сверхизлучения» (СИ) в релятивистской ЛОВ, автор вынужден ограничиваться ситуацией, когда «Импульс СИ формируется из случайных шумов и распространяется с групповой скоростью навстречу потоку электронов, который не модулирован ни по плотности, ни по скорости». Начальные возмущения, всё же необходимые для того, чтобы электронно-волновая система пришла в движение, приходится задавать искусственно. Можно ожидать, что названная проблема наиболее остро проявляется именно в системах с обратной волной. Поэтому автору диссертации, давая оценку оптимальной длины системы при описании процесса генерации в ЛОВ вторичных импульсов, которые начинают формироваться прежде, чем основной импульс покидает пространство взаимодействия, следовало бы уточнить, к какому способу

возбуждения прибора относится эта оценка, и как она может видоизмениться при других способах возбуждения.

3. При интерпретации результатов исследования применительно к случаям генерирования и распространения ультракоротких импульсов (с числом колебаний порядка 10 или менее — что является яркой тенденцией в сегодняшней релятивистской высокочастотной электронике) следует принимать во внимание, что сами по себе уравнения возбуждения волноводных мод, которые являются второй основной составляющей использованных в работе моделей, предполагающие известную медленность изменения амплитуды волны, фиксированность ее поперечной структуры и волновой скорости (которые автор диссертации отмечает), в таких случаях «работают» на пределе своей применимости. Было бы полезно оценить уровень связанных с этим неточностей в условиях рассмотренных в диссертации задач.

Высказанные выше замечания лишь уточняют возможности и ограничения диссертационной работы. Альтернативным инструментом для описания самосогласованной динамики частиц и электромагнитных волн, лишенным названных выше недостатков, являются, по-видимому, уже кинетические методы описания пучков и полностью электромагнитные волновые методы, но они не дают столь хороших возможностей для аналитических построений. Если ставится задача математически отыскивать автомодельные решения, то использованный автором подход, скорее всего, не имеет альтернативы. С другой стороны, автор диссертации при необходимости прибегает и к кинетическим методам расчета с помощью программ, основанных на FDTD- и PIC-методе.

Имеется еще один вопрос к автору диссертации, скорее дискуссионного плана. Не вызывает сомнения, что если характеристики электронно-волновой системы таковы, что происходящие в ней процессы проявляются в форме самоподобных зависимостей для некоторых физических величин, то эти зависимости могут быть найдены использованными в диссертации методами. Однако верно ли обратное, всегда ли возникновение некоторой автомодельной конструкции при анализе системы уравнений, описывающих физическую систему, означает существование самоподобной конфигурации определенной наблюдаемой физической величины?

В диссертации, которая в целом написана профессиональным языком, встречаются отдельные неточности в терминологии. Например, на стр. 20 уравнение (1.4), названное уравнением движения, строго говоря, таковым не является, поскольку записано для скалярной величины, всегда положительной и большей единицы. Вызывает сомнение корректность использования термина «уравнения движения» применительно к уравнениям для фаз различного вида.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. В диссертации представлено обширное, трудоемкое и результативное исследование по одному из актуальных вопросов современной радиофизики, выполненное на высоком научном уровне. Изучив представленную диссертацию, официальный оппонент приходит к следующему заключению.

Диссертация А. А. Ростунцовой «Нелинейные волновые процессы при усилении и генерации ультракоротких импульсов в системах типа электронный поток — электромагнитная волна» представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, вносящее значительный вклад в развитие физических основ генерации, усиления и преобразования ультракоротких СВЧ-импульсов в системах с протяженными электронными пучками. Диссертация соответствует критериям,

установленным для кандидатских диссертаций в разделе 2 (п. 9 – п. 14) «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), а автор диссертации Ростунцова Алёна Александровна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент:



Пегель Игорь Валериевич,

доктор физико-математических наук (01.04.04 – физическая электроника),
главный научный сотрудник отдела теоретической физики Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной
электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

Почтовый адрес: 634055, гор. Томск, проспект Академический, дом 2/3

Тел.: +7 (3822) 900-215. Адрес электронной почты: pegel@lfe.hcei.tsc.ru

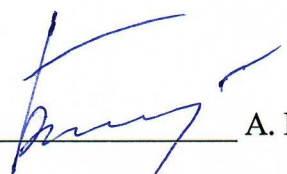
Я, Пегель Игорь Валериевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Ростунцовой Алёной Александровной, и их дальнейшую обработку.



И. В. Пегель

Подпись Пегеля Игоря Валериевича удостоверяю.

Заместитель директора по научной работе
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института сильноточной электроники
Сибирского отделения
Российской академии наук
к.ф.-м.н.



А. В. Батраков

08 октября 2025 г.

М. П.

