

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики

**Анализ автомодельных процессов усиления и генерации импульсов в
системах типа электронный поток – электромагнитная волна**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 411 группы

направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»
факультета нелинейных процессов

Ростунцовой Алёны Александровны

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н.

Дата, подпись

Н.М. Рыскин

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

Дата, подпись

Е.Н. Бегинин

Саратов 2019

ВВЕДЕНИЕ

Генерация мощных ультракоротких микроволновых импульсов является одной из центральных задач релятивистской сильноточной СВЧ-электроники. В основе формирования подобных импульсов лежат различные явления, в частности, эффект сверхизлучения электронных сгустков [1]. Например, в работе [2] было указано на возможность получения за счет этого эффекта резкого всплеска амплитуды поля на начальной стадии переходного процесса в лампе обратной волны (ЛОВ), благодаря которому возможна генерация мощного импульсного излучения при использовании электронных пучков (ЭП) минимальной длительности. Такие импульсы были получены экспериментально в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн [3], причем удалось достичь пиковых значений мощности, значительно превышающих постоянную мощность ЭП.

Короткие высокомоощные импульсы представляют интерес для ряда научных и практических приложений [4], таких как радиолокация большой дальности, рентгенография взрывов и баллистических процессов, создание установок для быстрого нагрева термоядерной плазмы, коллективные методы ускорения заряженных частиц, различные биофизические исследования и многое другое. В частности, в радиолокации, являющейся основной областью применения мощного СВЧ-излучения, уменьшение эффективной длительности используемого импульса при сохранении общей энергии сигнала дает возможность увеличения пространственного разрешения и как результат точности радиолокационных данных [5]. В связи с этим, большой интерес представляет изучение взаимодействия мощных ультракоротких СВЧ-импульсов с ЭП, что связано с перспективами повышения пиковой мощности их излучения при одновременном уменьшении эффективной длительности.

В последние годы появился ряд работ (см., например, [6-8]), посвященных изучению усиления и компрессии коротких электромагнитных (ЭМ) импульсов, распространяющихся вдоль квазистационарных прямолинейных ЭП при различных механизмах электронно-волнового взаимодействия, которые

показывают, что эти процессы носят явно выраженный автомодельный (самоподобный) характер. В связи с этим актуальным становится исследование аналогичного автомодельного поведения в других, ранее не рассматривавшихся случаях. Кроме того, большая часть выполненных ранее исследований основывалась на численном моделировании и натурных экспериментах, в то время как для поиска универсальных физических закономерностей представляется перспективным теоретический анализ с помощью современных методов нелинейной физики. В частности, нахождение автомодельных решений может позволить аналитически установить законы, по которым во времени и пространстве меняются ширина и амплитуда импульса, что после дополнительного анализа позволит определить оптимальные режимы и параметры работы приборов.

Таким образом, тема выпускной квалификационной работы является **актуальной**.

Целью работы является построение автомодельных решений, описывающих процессы усиления и генерации ультракоротких микроволновых импульсов при взаимодействии прямолинейного ЭП с прямой или обратной ЭМ волной и сопоставление с результатами численного моделирования.

Основными **задачами** для достижения поставленной цели являлись:

1. Нахождение автомодельной подстановки для уравнений нелинейной нестационарной теории взаимодействия ЭП с прямой или обратной ЭМ волной в рамках приближений малого изменения скорости или энергии электронов;
2. Компьютерное моделирование процесса усиления и компрессии импульса в усилителе на основе лампы бегущей волны (ЛБВ) и процесса генерации импульса в ЛОВ, исследование зависимости основных характеристик импульса от времени и управляющих параметров системы, сопоставление полученных результатов с теоретическими выводами;
3. Исследование специфики распространения импульса в ЛОВ, связанной с принципиальной ограниченностью системы в пространстве.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы. **Глава 1** посвящена основным уравнениям теории приборов О-

типа с длительным взаимодействием, в **Главе 2** рассматриваются автомодельные режимы усиления и компрессии импульсов в ЛБВ, в **Главе 3** исследуется автомодельный характер генерации импульсов в ЛОВ.

Результаты выпускной квалификационной работы докладывались на XVII Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2018), на XXII Международной школе для студентов и молодых ученых «Saratov Fall Meeting» (Саратов, 2018), на 9-й научно-практической конференции “Presenting Academic Achievements to the World” (Саратов, 2018), на II научно-практической студенческой конференции “Science Kaleidoscope” (Саратов, 2017), на студенческих конференциях Факультета нелинейных процессов СГУ (2017-2019), на школе-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (2017, 2018) и опубликованы в работах [9-12].

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** описывается актуальность работы и основные сферы применения коротких высокомоощных микроволновых импульсов, указываются возможные способы их генерации, усиления и компрессии, формулируются цели и задачи данной работы.

Глава 1 посвящена теоретическим основам приборов О-типа с длительным взаимодействием, а также вопросам численного моделирования нестационарных процессов в таких приборах.

В *Разделе 1.1* сформулированы физические принципы, лежащие в основе взаимодействия прямолинейного ЭП с прямой или обратной ЭМ волной, кратко описаны устройство и принцип действия усилителей на основе ЛБВ и генераторов на основе ЛОВ.

В *Разделе 1.2* обсуждаются уравнения нелинейной нестационарной теории ЛОВ/ЛБВ О-типа [2,13], исследуемые в данной работе. В частности,

- указаны основные предположения, при которых строится математическая модель;

- получено уравнение движения электрона в поле синхронной волны в безразмерной форме для случая малого изменения скорости электронов

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

и для случая малого изменения как скорости, так и энергии электронов

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} = -\operatorname{Re}(Fe^{i\theta}), \quad (2)$$

где ξ и τ — безразмерные координата и время соответственно, θ — фаза электрона относительно волны, F — безразмерная амплитуда поля, $v = 2(\gamma_0^2 - 1)C$ — релятивистский параметр, зависящий от начального масс-фактора электрона γ_0 и параметра усиления Пирса C ;

- представлено уравнение возбуждения ЭМ волны конвекционным током

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} \pm \frac{\partial F}{\partial \xi} = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0, \quad (3)$$

где θ_0 — начальная фаза электрона, знак «+» соответствует взаимодействию ЭП с прямой ЭМ волной в ЛБВ, а «−» — взаимодействию с обратной ЭМ волной в ЛОВ;

- сформулированы начальные и граничные условия для решения уравнений (1)-(3). Так, предполагалось, что на вход системы поступает невозмущенный поток электронов, поэтому ставилось граничное условие

$$\theta(\xi = 0) = \theta_0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \xi}(\xi = 0) = 0. \quad (4)$$

В случае ЛБВ рассматривалось усиление входного импульса, заданного в виде начального распределения поля

$$F(\xi, \tau = 0) = \begin{cases} F_0 \sin^2(\pi\xi/\Delta), & 0 \leq \xi \leq \Delta, \\ 0, & \Delta \leq \xi \leq L, \end{cases} \quad (5)$$

где Δ — длина импульса, L — нормализованная длина системы. В самовозбуждающейся ЛОВ исследовалась эволюция начального возмущения, заданного, следуя [2], в виде:

$$F(\xi, \tau = 0) = \begin{cases} F_0, & 0 \leq \xi \leq 0.9L, \\ F_0 \sin^2 \left[\frac{5\pi}{L}(L - \xi) \right], & 0.9L \leq \xi \leq L. \end{cases} \quad (6)$$

Также для ЛОВ-генератора было необходимо добавить условие $F(\xi = L) = 0$, отражающее отсутствие сигнала на правом конце системы.

В *Разделе 1.3* изложена методика компьютерного моделирования уравнений (1)-(3) с начальными и граничными условиями (4)-(6), более подробно описанная в [14]. Уравнения движения интегрировались методом «крупных» частиц с помощью классического подхода «предиктор-корректор» (вариация метода Рунге-Кутты 2-го порядка), а уравнение возбуждения решалось с помощью явной схемы Лакса-Вендроффа 2-го порядка.

Глава 2 посвящена анализу автомодельных процессов усиления и компрессии импульсов в ЛБВ.

В *Разделе 2.1* вводится понятие автомодельного решения [15] и даются его основные характеристики. Под автомодельным понимают решение, зависящее от независимых переменных ξ и τ не произвольным образом, а в определенной комбинации $\eta = \eta(\xi, \tau)$, например, следующим образом:

$$u(\xi, \tau) = \tau^a U(\eta), \quad \eta = x\tau^b. \quad (7)$$

В *Разделе 2.2* с помощью поиска масштабно-инвариантных преобразований независимых переменных и неизвестных функций системы, состоящей из уравнения движения электрона в приближении малого изменения энергии (2) и уравнения возбуждения (3) для случая взаимодействия с прямой волной (знак «+»), найдена автомодельная подстановка, оставляющая исследуемые уравнения неизменными:

$$\eta = \sqrt{\tau}(\xi - \tau), \quad F(\xi, \tau) = \tau A(\eta), \quad \theta(\xi, \tau) = \vartheta(\eta). \quad (8)$$

Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих найденное автомodelное решение. Приведены примеры численных решений этой системы. Они имеют вид импульса, за которым тянется шлейф в виде затухающих осцилляций (Рис. 1а). В исходных переменных найденное решение описывает усиливающийся и сжимающийся импульс (Рис. 1б). Согласно подстановке (8), амплитуда импульса растет линейно с течением времени τ , его ширина сокращается пропорционально $\tau^{-1/2}$, а координата максимума изменяется по закону

$$\xi_{\max} = \xi_0 + \tau + \frac{\eta_0}{\sqrt{\tau}}, \quad (9)$$

где ξ_0 , η_0 — некоторые константы.

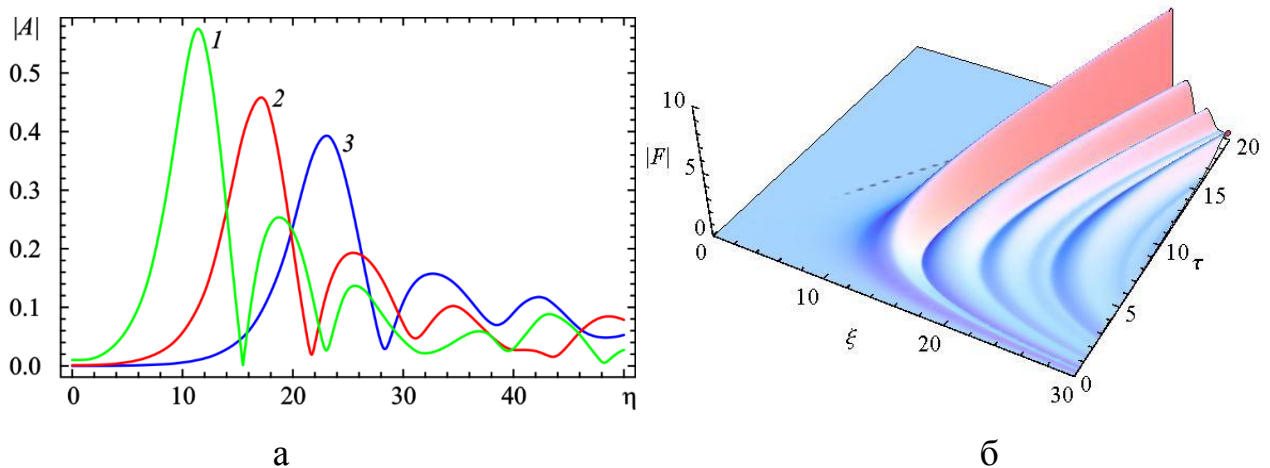


Рис. 1. Вид автомodelного решения для ЛБВ в автомodelных переменных (а) при различных начальных возмущениях $A_0 = 10^{-2}$ (кривая 1), 10^{-3} (2) и 10^{-4} (3) и в исходных переменных (б) при $A_0 = 10^{-3}$.

В Разделе 2.3 представлены результаты численного моделирования процесса усиления и компрессии импульса в ЛБВ на основе уравнений (2), (3) (знак «+») с начальными и граничными условиями (4), (5) (Рис. 2а). Построенные зависимости основных характеристик этого импульса от времени согласуются с аналитическими зависимостями, соответствующими автомodelному решению (8). В частности, амплитуда импульса действительно линейно растет с

течением времени (Рис. 2б), причем, скорость роста тем выше, чем больше амплитуда начального импульса F_0 . Таким образом, подтверждается гипотеза о том, что эволюция импульса носит автомодельный характер.

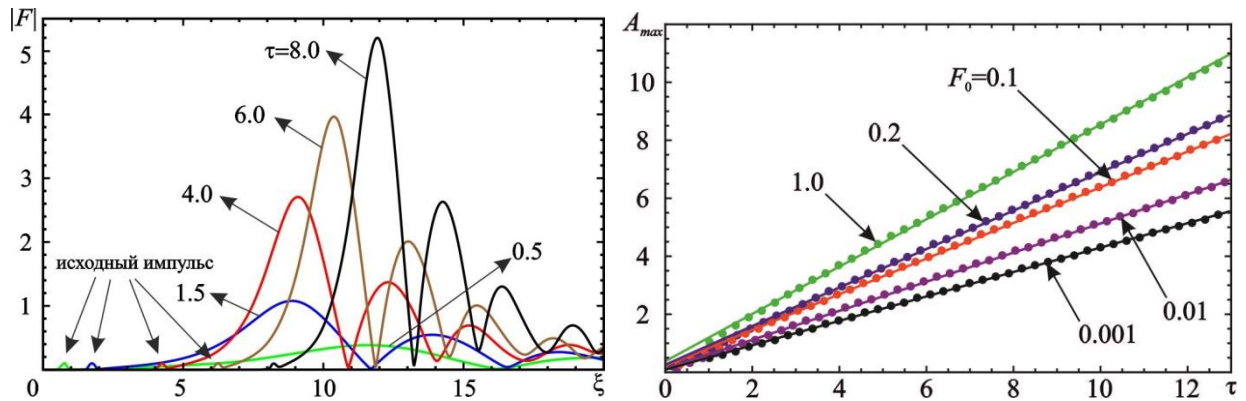


Рис. 2. Распределение амплитуды поля в различные моменты времени τ (а) и зависимость величины максимума импульса от времени при различных начальных амплитудах F_0 (б) в ЛБВ.

В Разделе 2.4 анализируется случай, когда изменение энергии электрона в процессе взаимодействия в ЛБВ уже нельзя считать малым и необходимо использовать уравнение движения (1), записанное в приближении малого изменения скорости. Найдена автомодельная подстановка, аналогичная (8):

$$\eta = \tau^2 (\xi - \tau), \quad F(\xi, \tau) = \tau A(\eta) \exp \left[i \frac{1}{v} (\xi - \tau) \right], \quad \theta(\xi, \tau) = \vartheta(\eta) - \frac{1}{v} (\xi - \tau). \quad (10)$$

Автомодельное решение качественно имеет тот же вид, что и в предыдущем случае (см. Рис. 1а). Согласно (10), амплитуда импульса растет линейно с течением времени τ , а его ширина сокращается пропорционально τ^{-2} .

В Разделе 2.5 представлены результаты численного моделирования уравнений (1), (3) (знак «+») с начальными и граничными условиями (4), (5). Показано, что процесс усиления импульса в ЛБВ в приближении малого изменения скорости электронов при малых амплитудах и временах τ соответствует решению для приближения малого изменения энергии, а с течением времени выходит на новую асимптотику, отвечающую найденной подстановке (10).

Глава 3 посвящена исследованию автомодельного процесса генерации импульсов сверхизлучения в ЛОВ.

В *Разделе 3.1* показано, что система, состоящая из уравнения движения (2) и уравнения возбуждения (3) при взаимодействии с обратной волной (знак « $\rightarrow$ ») допускает подстановку (8), в которой автомодельная переменная вводится следующим образом: $\eta = \sqrt{\tau}(\xi + \tau)$. При этом вид автомодельного решения $A(\eta)$ остается неизменным (см. Рис. 1а), а решение в исходных переменных $F(\xi, \tau)$ трансформируется (Рис. 3): импульс движется от правой границы системы к её началу. В связи с этим, также изменяется вид зависимости (9): $\xi_{\max} = \xi_0 - \tau + \eta_0/\sqrt{\tau}$. При этом максимум и ширина импульса зависят от τ по прежним законам.

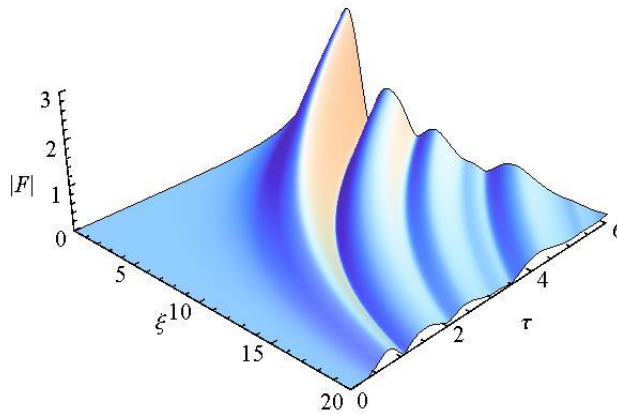


Рис. 3. Пространственно-временное распределение амплитуды поля для автомодельного решения в ЛОВ при $A_0 = 10^{-3}$.

В *Разделе 3.2* представлены результаты численного моделирования формирования, усиления и компрессии импульса в ЛОВ на основе уравнений (2), (3) (знак « $\rightarrow$ ») с начальными и граничными условиями (4),(6) (Рис. 4а). Показано, что после переходного процесса решение выходит на автомодельную стадию, где характеристики импульса зависят от времени по найденным автомодельным законам. Поскольку ЛОВ является принципиально ограниченной системой, то существенным параметром становится её длина L , что накладывает определенную специфику на поведение автомодельного решения. Пока L

меньше некоторого критического значения, скорость роста амплитуды импульса тем больше, чем длиннее система (см. Рис. 4б). Но когда L превышает критическое значение (зависящее от начального возмущения F_0), процесс распространения импульса перестает зависеть от длины системы. Показано, что это связано с формированием вторичных импульсов (ср. [16]) прежде, чем первый импульс покинет систему.

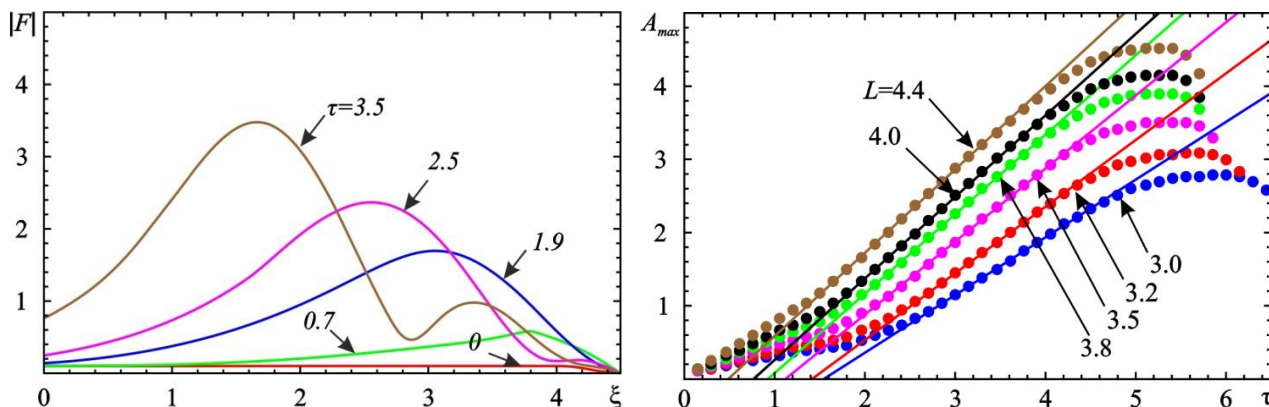


Рис. 4. Распределение амплитуды поля в различные моменты времени τ (а) и зависимость величины максимума импульса от времени при различных длинах системы L (б) в ЛОВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие основные результаты.

1. Показано, что система уравнений нелинейной нестационарной теории взаимодействия прямолинейного ЭП с прямой или обратной ЭМ волной в приближении малого изменения энергии электронов допускает автомодельное решение, описывающее импульс, усиливающийся и сжимающийся в процессе распространения вдоль системы. Согласно найденной автомодельной подстановке, амплитуда этого импульса растет линейно с течением времени τ , а его ширина сокращается пропорционально $\tau^{-1/2}$.

2. Путем численного моделирования продемонстрировано, что полученное автомодельное решение соответствует процессу усиления импульса в ЛБВ,

поскольку его характеристики зависят от времени по предсказанным аналитическим законам. В частности, величина максимума импульса растет прямо пропорционально времени τ , причем, чем больше его начальная амплитуда, тем быстрее происходит рост.

3. Сопоставление с результатами численного моделирования также показало, что найденное автомодельное решение описывает генерацию коротких импульсов сверхизлучения в ЛОВ: после некоторого переходного процесса решение выходит на автомодельную стадию, на которой характеристики сформированного импульса ведут себя в соответствии с полученной автомодельной подстановкой.

4. Показано, что принципиальная ограниченность ЛОВ в пространстве накладывает определенную специфику на процесс распространения импульса, который в связи с этим зависит от длины системы L . Пока L меньше критического значения, увеличение длины системы сопровождается ростом амплитуды выходного импульса и увеличением угла наклона прямой, соответствующей автомодельной стадии. При превышении критической длины скорость роста импульса и выходное значение его амплитуды, наоборот, несколько уменьшаются, а затем стремятся к постоянному значению, не зависящему от L .

5. Установлено, что с ростом начального возмущения F_0 «насыщение» зависимостей в ЛОВ происходит при всё меньших длинах системы, при этом уменьшаются и сами значения, к которым стремится выходная амплитуда импульса.

6. Показано, что физический смысл наблюдаемых в ЛОВ явлений заключается в том, что в достаточно длинных системах формирование вторичных импульсов начинает происходить прежде, чем первый успевает покинуть систему.

7. Найдена автомодельная подстановка, описывающая усиление и компрессию импульса для системы уравнений ЛБВ в приближении малого изменения скорости электронов. В данном случае амплитуда импульса по-прежнему

растет линейно с течением времени τ , а ширина сокращается пропорционально τ^{-2} .

8. Проведено численное моделирование усиления импульса в ЛБВ в приближении малого изменения скорости. Результаты хорошо совпали с найденными автомодельными зависимостями. При этом на начальной стадии, когда амплитуда импульса еще мала, энергия электронов изменяется мало, вследствие чего основные характеристики импульса не зависят от параметра ν и совпадают с результатами моделирования в приближении малого изменения энергии ($\nu=0$). Однако с течением времени изменение энергии электронов становится значительным и решение выходит на другую асимптотику, соответствующую приближению малого изменения скорости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гинзбург Н.С.* Об эффекте сверхизлучения сгустков релятивистских электронов-осцилляторов // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14, №. 5. С. 440-444.
2. *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ // Изв. Вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 7. С. 1037–1052.
3. *Eltchaninov A.A., Korovin S.D., Mesyats G.V., et al.* Review of studies of superradiative microwave generation in X band and Ka band relativistic BWOs (review) // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. Vol. 32, №3. P. 1093-1099.
4. *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
5. *Вдовин В.А., Кулагин В.В., Митрофанов Е.В., Черепенин В.А.* Исследование характеристик экспериментального макета радара с наносекундной длительностью зондирующего радиоимпульса // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2012. №12.
URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec12/18/text.html> (дата обращения: 15.05.2019).
6. *Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С. и др.* Эффекты усиления, компрессии и самоиндуцированной прозрачности при распространении ультракоротких электромагнитных импульсов вдоль квазистационарных электронных потоков // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. LIV, №. 8-9. С. 588-606.
7. *Рыскин Н.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В.* Автомоделные режимы усиления и компрессии электромагнитных импульсов при взаимодействии с электронными потоками // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, В.9, С. 86-94.
8. *Яландин М.И., Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р. и др.* Эффект нелинейной компрессии ультракоротких микроволновых импульсов в процессе усиления квазистационарными электронными потоками // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т.91, №11. С. 620–625.

9. 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.
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. Саратов: ООО «Издательский центр «Наука». 2018. С. 91-92.
11. *Rostuntsova A.A., Ryskin N.M., Ginzburg N.S.* Self-Similar Analysis of Short Pulse Amplification and Generation in Cherenkov-type Devices // 20th International Vacuum Electronics Conf. April 28 – May 1, 2019, Busan, South Korea.
12. *Ростунцова А.А.* Об автомодельном характере генерации коротких импульсов в лампе обратной волны. // Научные исследования студентов Саратовского государственного университета: материалы итоговой студенческой научной конференции. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 2017. С. 37-38.
13. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: в 2 т. Т.1. М.: Физматлит, 2005. 495 с.
14. *Рыскин Н.М., Балякин А.А., Дмитриева Т.В. и др.* Нелинейная динамика распределенных систем: системы с запаздыванием, вакуумные микроволновые приборы, системы взаимодействующих нелинейных волн. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 504 с.
15. *Баренблатт Г.И.* Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. 256 с.
16. *Bandurkin I.V, Savilov A.V.* Super-radiant Cherenkov backward-wave oscillator with cyclotron absorption. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99, No. 19. P. 193506.