



**УТВЕРЖДАЮ:**

Проректор по НИР

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Алексей Александрович Короновский

« 9 » декабря 2020 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

по диссертации **Титова Алексея Владимировича** «Волновые и колебательные явления в системах с двумя взаимодействующими электронными потоками» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — «Радиофизика», выполненной на кафедре электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ от 02.03.2020 №33-Д.

**Титов Алексей Владимирович** с отличием окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» в 2010 г. по специальности «Радиофизика и электроника» с присвоением квалификации «Радиофизик».

Дубликат удостоверения о сдаче кандидатских экзаменов № 388 выдан 25.11.2020 Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

С 2010 по 2014 год являлся аспирантом кафедры электроники, колебаний и волн ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

В настоящее время Титов А.В. работает ассистентом на кафедре электроники, колебаний и волн ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель — Трубецков Дмитрий Иванович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой

электроники, колебаний и волн ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» (утвержден приказом ректора СГУ от 02.03.2020 № 33-Д) представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ и других образовательных учреждений высшего образования и научных организаций.

На заседании присутствовали:

1. *Аникин Валерий Михайлович*, доктор физико-математических наук, профессор, декан физического факультета СГУ.
2. *Караваяев Анатолий Сергеевич*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ.
3. *Мельников Леонид Аркадьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.
4. *Москаленко Ольга Игоревна*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики открытых систем СГУ.
5. *Шараевский Юрий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры нелинейной физики СГУ.
6. *Слепченков Михаил Михайлович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и электродинамики физического факультета СГУ.
7. *Гришин Сергей Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн СГУ.
8. *Бегинин Евгений Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой нелинейной физики СГУ.
9. *Вдовина Галина Михайловна* кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ.
10. *Егоров Евгений Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ.
11. *Журавлев Максим Олегович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.

12. *Каретникова Татьяна Андреевна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нелинейной физики СГУ.
13. *Мельникова Мария Михайловна*, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры нелинейной физики СГУ.
14. *Ремпен Ирина Сергеевна*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. *Садовников Александр Владимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
15. *Савин Алексей Владимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры нелинейной физики СГУ.
16. *Савин Дмитрий Владимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
17. *Садовников Александр Владимирович*, физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
18. *Сельский Антон Олегович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
19. *Титов Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
20. *Шешукова Светлана Евгеньевна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.

Рецензенты диссертации:

*Шараевский Юрий Павлович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры нелинейной физики факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» представил положительный отзыв.

*Москаленко Ольга Игоревна*, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики открытых систем факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» представила положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее **заключение**:

В диссертации Титова А.В. на основе метода связанных волн проведен последовательный анализ процессов, протекающих при взаимодействии двух разноскоростных попутных электронных потоков. Обоснована целесообразность использования режима усиления входного сигнала в системе двух попутных электронных

потоков за счет интерференции парциальных волн постоянной амплитуды в коротковолновой области СВЧ диапазона. Проанализированы возможные режимы взаимодействия в модели двух попутных электронных потоков с бегущей электромагнитной волной. Также на основе волнового метода построена приближенная нелинейная теория взаимодействия двух попутных электронных потоков. На её основе развита приближенная нелинейная теория двухпотоковой лампы бегущей волны.

### **Научная новизна результатов работы**

1) Впервые в терминах взаимодействия волн пространственного заряда построена последовательная линейная теория процессов, протекающих при взаимодействии двух разнородных попутных электронных потоков. Проведенный анализ двух-, трех- и четырехволнового взаимодействия волн пространственного заряда показывает, что в основе механизма излучения в двухпотоковой системе лежат эффект Вавилова-Черенкова и аномальный эффект Доплера.

2) Впервые аналитически в трехволновом приближении на основе метода дисперсионных характеристик и метода связанных волн показана прямая аналогия между процессом взаимодействия двух попутных электронных потоков и процессом взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной.

3) Обоснован и предложен новый режим усиления электронно-волновой лампы, названный интерференционным. В данном режиме работы усиление достигается не за счет явления двухпотоковой неустойчивости, а благодаря интерференции четырех парциальных волн постоянной амплитуды.

4) Обоснован и предложен новый интерференционно-крестатронный режим усиления лампы бегущей волны с двумя электронными потоками, в котором усиление достигается за счет интерференции пяти парциальных волн постоянной амплитуды.

5) На основе нелинейной теории группировки электронного потока конечного радиуса в собственном поле пространственного заряда и волнового метода построена приближенная полуаналитическая теория взаимодействия двух попутных разнородных электронных потоков. Также на её основе построена приближенная нелинейная теория взаимодействия двух попутных электронных потоков с бегущей электромагнитной волной. В рамках этой теории проанализированы новые режимы усиления в системе «два электронных потока – электромагнитная волна», проведены расчеты выходных характеристик.

## **Научно-практическая значимость**

Построенная аналитическая теория систем с двумя взаимодействующими электронными потоками, её математический аппарат и её результаты рекомендуются к использованию в конструкторской деятельности на начальном этапе моделирования для расчета выходных параметров приборов О-типа с двумя потоками. Предлагаемая модель электронно-волнового усилителя представляет интерес в коротковолновой части СВЧ диапазона. Результаты диссертации рекомендуются к использованию в лекционных курсах, читаемых студентам-радиофизикам, в частности в курсах «Физика микроволн», «Электроника СВЧ и телекоммуникационные технологии», «Нелинейная динамика активных сред» и «Динамическое моделирование и диагностика».

**Ценность научных работ** соискателя определяется тем, что опубликованные в них результаты диссертации развивают теорию взаимодействия двух электронных потоков, в том числе, с точки зрения присутствующих механизмов излучения. Важным результатом является построение полуаналитической нелинейной теории двухпотоковой неустойчивости. На основе анализа, проведенного в рамках построенных теорий, показано, что механизм взаимодействия двух электронных потоков может быть использован в коротковолновой области СВЧ диапазона для повышения выходных характеристик уже существующих усилителей О-типа.

**Личный вклад.** Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично соискателем. Соискателем были разработаны аналитические модели двух-, трех- и четырехволнового взаимодействия попутных электронных потоков, модель интерференционного взаимодействия двух потоков. Также им были разработаны нелинейные модели взаимодействия двух электронных потоков между собой и с полем бегущей электромагнитной волны. Постановка задач, обсуждение методов их решения и интерпретация полученных результатов проведены совместно с научным руководителем.

**Достоверность полученных результатов** определяется следующим:

1. Используются традиционные для радиофизики и электроники СВЧ методы исследования процессов взаимодействия электронных потоков и электромагнитной волны: метод дисперсионного уравнения, метод связанных волн и волновой метод.

2. Результаты теории взаимодействия двух потоков в терминах взаимодействия связанных волн пространственного заряда согласуются с уже известными результатами линейной теории двухпотоковой неустойчивости в областях применимости обеих теорий.

3. Результаты построенной полуаналитической нелинейной теории взаимодействия двух электронных потоков согласуются с уже известными результатами более ранних работ исследователей в этой области.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В рамках развитой на основе метода связанных волн (в терминах взаимодействия волн пространственного заряда) последовательной теории двухпотоковой неустойчивости модель двух попутных взаимодействующих электронных потоков демонстрирует все виды индуцированного излучения, имеющие место в приборах типа О: излучение за счет аномального эффекта Доплера (модель двухволнового взаимодействия), Черенковское излучение и интерференционное усиление (модель трехволнового и четырехволнового взаимодействия).

2. В приближении линейной одномерной модели в системе двух взаимодействующих попутных, предварительно модулированных, разнородных, ионно-компенсированных электронных потоков при значениях параметров системы, соответствующих отсутствию двухпотоковой неустойчивости (при значении параметра неоднородности  $\chi > \sqrt{2}$ ) имеет место режим усиления, увеличение мощности входного сигнала в котором достигается за счет интерференции четырех парциальных волн постоянной амплитуды.

3. В приближении линейной одномерной модели в системе «два взаимодействующих электронных потока – бегущая электромагнитная волна» при значениях параметров, соответствующих случаю отсутствия в решении нарастающих парциальных волн, существует режим усиления, в котором увеличение мощности выходного сигнала осуществляется вне области неустойчивости за счет интерференции пяти парциальных волн постоянной амплитуды.

4. В нелинейной модели добавление к системе «электронный поток – бегущая электромагнитная волна» второго электронного потока позволяет увеличить ширину частотной области конвективной неустойчивости, а также повысить коэффициент усиления вне области неустойчивости по сравнению с однолучевой моделью за счет интерференционно-крестатронного взаимодействия.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих школах, семинарах и конференциях:

- Научная школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2010» (Саратов, 2010),
- XIII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» (Звенигород, 2011),
- VI научная конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2011),
- 5-я Всероссийская молодежная конференция «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (Москва, 2011),
- XIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» (Звенигород, 2012),
- XIV Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» (Можайск, 2013),
- «Всероссийская научная конференция «Проблемы СВЧ электроники» (Москва, 2013),
- XIV Всероссийская научная школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» (Можайск, 2014),
- XV Всероссийская научная школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени профессора А.П. Сухорукова (Можайск, 2016),
- 11-я Международная школа «Хаотические колебания и образование структур» (Саратов, 2016),
- XVI Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова (Можайск, 2017),
- Научно-техническая конференция «Электронные приборы и устройства СВЧ» (Б/О «Луч», АО «НПП «Алмаз», 2017),
- XVII Международная Зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2018),
- XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова (Можайск, 2019),
- на объединенных научных семинарах кафедр факультета нелинейных процессов СГУ (Саратов, июнь 2017, апрель 2018, сентябрь 2020).

Материалы диссертации использовались при выполнении научно-исследовательских работ по грантам Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты № 13-02-01209-а, № 16-02-00238-а, 16-32-00468-мол\_а, 18-02-00666-а).

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано 15 работ, из них 5 статей в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук и индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 1 статья в материалах V Всероссийского конкурса молодых ученых, 9 статей в сборниках трудов научных конференций и семинаров.

1. **Титов А.В.** Приближенная нелинейная теория двухпучковой неустойчивости // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, №3. С. 132–139.
2. Трубецков Д.И., **Титов А.В.**, Фунтов А.А. Об интерференционном усилении в электронно-волновой лампе (линейная теория) // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 21. С. 86–94.
3. Трубецков Д. И., **Титов А. В.** Теория электронно-волновых приборов для коротковолновой части сверхвысокочастотного диапазона // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 8. С. 736–744.
4. **Титов А.В.** Двухпоточковая неустойчивость – волновые линейные и нелинейные явления на сверхвысоких частота. Часть I // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, №1. С. 37–74.
5. **Титов А.В.** Двухпоточковая неустойчивость – волновые линейные и нелинейные явления на сверхвысоких частота. Часть II // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, №2. С. 41–63.
6. **Титов А.В.** Линейная и приближенная нелинейная теории двухпучковой неустойчивости (метод связанных волн и волновой метод Солнцева). Итоги диссертационных исследований. Том 1. – Материалы V Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2013. – 131с. С. 3–13.
7. **Титов А.В.**, Фунтов А.А. Об интерференционном усилении в модели двух взаимодействующих электронных потоков // Ученые записки Физического факультета МГУ. 2013, №5. С. 48–51.
8. **Титов А.В.** Некоторые вопросы линейной теории двухлучевой неустойчивости. Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2010: Сборник материалов



научной школы-конференции. Саратов, 6 октября, 24, 26 ноября 2010. Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2011. 124 с. С. 40–43.

9. **Титов А.В.** Некоторые вопросы линейной теории двухлучевой неустойчивости // Сборник трудов участников XIII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» («Волны-2011»). – Секция 1. Микроволновая электроника (генераторы и приемники). Москва, 2011. С. 64–66.
10. **Титов А.В.** Нелинейные волновые и колебательные процессы при взаимодействии двух электронных потоков. «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тезисы докладов VI Всероссийской конференции молодых ученых. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 2011. – 180 с. С. 164–165.
11. **Титов А.В.** Приближенная нелинейная теория двухпучковой неустойчивости // Сборник трудов участников XIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2012»). – Секция 6. Микроволновая электроника и электродинамика. Москва, 2012. С. 26–29.
12. **Титов А.В., Фунтов А.А.** Об интерференционном усилении в модели двух взаимодействующих однонаправленных электронных потоков // Сборник трудов участников XIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2013»). – Секция 11. Микроэлектроника и электродинамика. Москва, 2013. С. 54–57.
13. Трубецков Д.И., **Титов А.В., Фунтов А.А.** Теория электронно-волновых приборов для коротковолновой части СВЧ диапазона // «Всероссийская научная конференция «Проблемы СВЧ электроники». Труды конференции. 24-25 октября 2013 года, Москва. МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 113–117.
14. Трубецков Д.И., **Титов А.В., Вдовина Г.М.** Забытые приборы возвращаются. Часть 2. Двухлучевые лампы. Электронные приборы и устройства СВЧ: Материалы научн.-техн. конф., посвящ. 60-летию АО «НПП «Алмаз»- Саратов, 2017. – 196с. С. 11–14.
15. **Титов А.В., Трубецков Д.И., Фунтов А.А.** Волновой метод Овчарова-Солнцева в теории нетрадиционных СВЧ приборов. III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы СВЧ электроники» им. В.А. Солнцева 2017. М.: ИД Медиа Паблшер, 2017. С. 5–6.

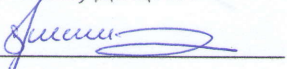
**Общая оценка диссертации.** Диссертационная работа «Волновые и колебательные явления в системах с двумя взаимодействующими электронными

потоками» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной задачи радиопизики, заключающейся в создании аналитической теории волновых и колебательных процессов (как линейной, так и нелинейной), протекающих в предварительно модулированных взаимодействующих электронных потоках, движущихся в попутном направлении. Диссертация выполнена на высоком уровне с применением современных методов теоретического анализа и компьютерного моделирования. Основные положения и результаты диссертации в полной мере опубликованы в научных статьях и материалах конференций. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 01.04.03—«Радиофизика». Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Волновые и колебательные явления в системах с двумя взаимодействующими электронными потоками» Титова Алексея Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика» как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского». На заседании присутствовало 20 человек, из них 5 докторов наук и 15 кандидатов наук по профилю диссертации. Результаты голосования: «за» – 20 чел., «против» – нет, воздержались – нет (протокол № 9 от 1 декабря 2020 г).

И.о. заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн  
факультета нелинейных процессов  
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,  
к.ф.-м.н., доцент

  
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83  
Тел.: 8(8452)210726  
e-mail: [sergrsh@yandex.ru](mailto:sergrsh@yandex.ru)

**Гришин Сергей Валерьевич**

