



**МИНОБНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию

**Григорьевой Александры Андреевны «Трансформация мод и излучение зарядов в круглом волноводе с однородной и двухслойной областями»,**  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика»

В диссертационной работе Григорьевой А.А. в строгой математической постановке решено несколько задач о генерации излучения в круглом волноводе с идеально проводящими стенками при наличии определенной диэлектрической неоднородности. В качестве неоднородности рассматривается резкий переход от однородной (по поперечной координате) области волновода к области, заполненной диэлектриком и имеющей центральный канал («двухслойная область»). В основном в работе рассматривалась ситуация, когда однородная область и канал не заполнены какой-либо средой. В первой главе диссертации волновод возбуждается падающей на неоднородность волноводной модой (либо распространяющейся, либо местной), а вторая и третьи главы посвящены анализу излучения при возбуждении структуры точечным зарядом или пучком частиц (вытянутым в продольном направлении), который вылетает из двухслойной области или влетает в нее. Аналитическое решение обозначенных проблем представляет интерес, в первую очередь, для развития метода кильватерного ускорения заряженных частиц, а также для создания источников электромагнитного излучения. Кроме того, исследование электромагнитных полей зарядов, движущихся внутри диэлектрических волноводов, способствует разработке методов неразрушающей диагностики характеристик пучков частиц. Следует отметить, что ранее подобные задачи решались в основном для регулярных слоистых волноводов или же при наличии границы раздела между однородно



заполненными областями волновода. Учёт наличия центрального канала приводит к возникновению принципиально новых эффектов. На основании вышеотмеченного можно заключить, что тематика диссертационной работы А.А. Григорьевой является **актуальной**.

**Целью диссертационной работы** является создание методов теоретического анализа процессов генерации волнового поля зарядом, движущимся по оси круглого кусочно-регулярного волновода, включающих получение аналитических выражений и численного моделирования.

Для этого автором был проведен теоретический и численный анализ отраженного и проходящего поля, генерируемых при взаимодействии падающей волноводной ТМ-моды с поперечной границей в волноводе; анализ излучения в вакуумной области волновода, генерируемого при движении заряда из двухслойной области в вакуумную; анализ структуры волнового поля в двухслойной области волновода в случае влета заряда в данную область.

**Наиболее важные результаты** диссертационной работы заключаются в следующем:

1) Получены аналитические выражения, описывающие взаимодействие волноводной моды с неоднородностью «вакуум – двухслойная область». Показана и обоснована возможность генерации распространяющихся мод в отраженном и проходящем полях не только в случае распространяющейся падающей моды, но и в случае, когда падающая мода является местной. Полученные результаты показывают хорошее согласование с результатами численного моделирования. Приведенные графики зависимостей коэффициентов отражения и прохождения мод от различных параметров задачи наглядно демонстрируют сложные эффекты трансформации падающей моды.

2) Получены аналитические выражения электромагнитного поля заряда (или тонкого гауссова пучка), движущегося из двухслойной области волновода в вакуумную. Анализ сфокусирован на описании так называемого черенковско-переходного излучения (ЧПИ). Отмечена возможность как мультиспектрального и мультимодового, так и практически односпектрального и одномодового режимов излучения (в зависимости от параметров волновода и пучка частиц).

3) Получены аналитические выражения, описывающие возбуждение волновода зарядом (или тонким гауссовым пучком), движущимся из вакуумной области в двухслойную. Основное внимание уделено



«редуцированному кильватерному полю». Показана возможность сложной (непоследовательной) «редукции» мод, когда моменты «отрезания» мод с большими и меньшими номерами чередуются.

Представленные в диссертации результаты являются оригинальными и не были ранее рассмотрены в литературе. Они относятся к теории дифракции и теории дифракционного излучения в волноведущих структурах с резкими неоднородностями. Как известно, решение таких задач в случае диэлектрических неоднородностей представляет существенные математические трудности. Последнее обстоятельство подчеркивает высокую степень их **научной новизны и значимости** для развития теории волноводов с резкими продольными и поперечными неоднородностями.

**Практическая значимость результатов** состоит в том, что исследование излучения, генерируемого в вакуумной области волновода, представляется важным для развития методов генерации электромагнитного излучения в диапазоне частот от десятков гигагерц до единиц Терагерц, а результаты исследования волнового поля в двухслойной области могут найти применение для развития перспективного метода кильватерного ускорения заряженных частиц.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов** не вызывает сомнений, т.к. в работе использовались корректные известные математические подходы. Кроме того, для всех рассмотренных задач диссертант представил сравнение полученных результатов с результатами численных экспериментов в современных («симуляционных») пакетах. Высокая точность совпадения результатов дает дополнительное подтверждение верности алгоритмов, разработанных диссертантом на основании аналитических исследований.

### **Замечания**

1. При обсуждении практической значимости диссертации представляются уместными ссылки на эксперименты, соответствующие проведённому теоретическому исследованию. Автор отмечает хорошее совпадение с результатами расчётов в пакете CST Particle Studio, однако не сообщает, каким условиям эксперимента отвечают эти расчёты и насколько точно они описывают результаты эксперимента.

2. В диссертации не обсуждаются физические причины, обуславливающие дискретность частотного спектра черенковско-переходного излучения, генерируемого при перелёте заряда из двухслойной области в вакуумную.

3. Не анализируются физические причины и механизмы, приводящие к изменению количества мод редуцированного кильватерного поля, распространяющегося в продольно-однородной двухслойной области.

4. Автором изначально постулируется пренебрежение азимутальными модами, которые, тем не менее, могут распространяться в волноводе с осесимметричным профилем показателя преломления. При этом отсутствуют какие-либо количественные оценки, оправдывающие такое предположение.

5. В работе описано возбуждение проходящего и отражённого излучения при падении эванесцентной моды. Была бы уместна оценка эффекта эванесцентных мод, и в частности, по сравнению с исключёнными из рассмотрения азимутальными модами.

6. В процессе аналитического описания свойств мод в различных частях волновода существенно используется свойство самосопряжённости поперечного оператора задачи. В то же время автором проведен учёт диссипативных эффектов, без обсуждения такой возможности в рамках принятой аналитической модели.

7. Замечания к изложению материала:

а) Компоненты электромагнитного поля выражаются через азимутальную компоненту магнитного поля ( $H_\phi$ ). Эта компонента описывается уравнением Бесселя порядка 1, что вносит ненужное усложнение в изложение материала (тем более, что азимутальные моды изначально не рассматриваются). Кроме того, дифференциальный оператор, выписанный сразу после формулы (1.1.10), назван оператором Лапласа ошибочно.

б) При задании граничных условий на внутренней границе (например, в (1.1.17) и др.) двухслойной области не указывается в явном виде, что диэлектрическая проницаемость имеет различные значения по разные стороны от границы.

в) К формуле (2.1.7) необходим комментарий о выражении электромагнитного поля во внутреннем слое двухслойной области посредством сингулярных цилиндрических функций.

г) Неясно, для чего введён и как используется стремящийся к нулю параметр смещения оси  $\delta$  в формуле (2.5.1).

Отмеченные замечания не снижают общей ценности работы и не затрагивают суть основных полученных результатов, сделанных выводов и защищаемых положений.



## Заключение

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Григорьевой Александры Андреевны «Трансформация мод и излучение зарядов в круглом волноводе с однородной и двухслойной областями» представляет собой законченное научное исследование, вносящее существенный вклад в развитие теории волноведущих структур, возбуждаемых движущимися зарядами.

Результаты, представленные в диссертационной работе, отражены в 10 публикациях, в том числе в 2 статьях в высокорейтинговых журналах, входящих в базы «Web of science» и «Scopus», и 1 статье в журнале, входящем в базу РИНЦ. Материал диссертации изложен последовательно и понятным языком. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа «Трансформация мод и излучение зарядов в круглом волноводе с однородной и двухслойной областями» соответствует всем критериям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации (п.9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (ред. от 02.08.2016)). Её автор, Григорьева Александра Андреевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика».

Доктор физико-математических наук, профессор  
Высшей школы прикладной физики  
и космических технологий ИФНиТ  
Санкт-Петербургского политехнического  
университета Петра Великого, профессор



О.И. Котов

Адрес СПбПУ Петра Великого:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

E-mail: [office@spbstu.ru](mailto:office@spbstu.ru), сайт <http://www.spbstu.ru>

Телефон: 8(812) 775-05-30

