

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ”

На правах рукописи

Воробьев Виктор Викторович

**ВЫСОКОНАПРАВЛЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПРИСУТСТВИИ
ПЛАНАРНЫХ И ОБЪЁМНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
СТРУКТУР ИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОВОДНИКОВ**

Специальность 01.04.03 —
«Радиофизика»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Тюхтин Андрей Викторович

Санкт-Петербург — 2016

Оглавление

| | Стр. |
|---|-----------|
| Введение | 4 |
| Глава 1. Излучение пучка заряженных частиц в присутствии планарных периодических структур из тонких параллельных проводников | 20 |
| 1.1 Модель планарной периодической структуры из тонких параллельных проводников и метод усреднённых граничных условий | 20 |
| Глава 2. Длинное название главы, в которой мы смотрим на примеры того, как будут верстаться изображения и списки | 22 |
| 2.1 Одиночное изображение | 22 |
| 2.2 Длинное название параграфа, в котором мы узнаём как сделать две картинки с общим номером и названием | 22 |
| 2.3 Пример вёрстки списков | 23 |
| 2.4 Традиции русского набора | 24 |
| 2.4.1 Пробелы | 24 |
| 2.4.2 Математические знаки и символы | 25 |
| 2.4.3 Кавычки | 25 |
| 2.4.4 Тире | 26 |
| 2.4.5 Дефисы и переносы слов | 26 |
| 2.5 Текст из панграмм и формул | 27 |
| Глава 3. Вёрстка таблиц | 31 |
| 3.1 Таблица обыкновенная | 31 |
| 3.2 Таблица с многострочными ячейками и примечанием | 32 |
| 3.3 Параграф - два | 33 |
| 3.4 Параграф с подпараграфами | 33 |
| 3.4.1 Подпараграф - один | 33 |
| 3.4.2 Подпараграф - два | 33 |

| | |
|---|----|
| Заключение | 35 |
| Список сокращений и условных обозначений | 36 |
| Словарь терминов | 38 |
| Список литературы | 39 |
| Список рисунков | 40 |
| Список таблиц | 41 |
| Приложение А. Примеры вставки листингов программного кода | 42 |
| Приложение Б. Очень длинное название второго приложения, в котором продемонстрирована работа с длинными таблицами | 48 |
| Б.1 Подраздел приложения | 48 |
| Б.2 Ещё один подраздел приложения | 50 |
| Б.3 Использование длинных таблиц с окружением <i>longtabu</i> | 54 |
| Б.4 Форматирование внутри таблиц | 57 |
| Б.5 Очередной подраздел приложения | 59 |
| Б.6 И ещё один подраздел приложения | 60 |

Введение

Эффекты излучения равномерно движущихся зарядов в присутствии различных сред и объектов были обнаружены и объяснены отечественными физиками в середине прошлого века. Плеяда выдающихся открытий началась с того, что П. А. Черенков обнаружил [1] необычное (по ряду свойств) свечение при наблюдении люминесценции солей урана, а его научный руководитель С. И. Вавилов предпринял попытку объяснить этот эффект [2]. Первое правильное теоретическое описание было представлено И. Е. Таммом и И. М. Франком несколькими годами позже [3]. Были получены выражения для электромагнитного поля, возбуждаемого зарядом, движущимся равномерно и прямолинейно в изотропной негиротропной среде с частотной дисперсией, а также формула для потерь энергии на излучение на единицу пройденного зарядом пути (формула Тамма-Франка). В 1958 году П. А. Черенкову, И. Е. Тамму и И. М. Франку была присуждена Нобелевская премия по физике за открытие и истолкование излучения, названного излучением Вавилова-Черенкова [4–6].

Вслед за открытием нового эффекта, его изучением занялись многие выдающиеся физики. В частности, В. Л. Гинзбургом был рассмотрен случай анизотропной среды [7] и развита квантовая теория эффекта [8]. Все те же И. Е. Тамм и И. М. Франк в другой совместной работе попытались объяснить природу эффекта на микроскопическом уровне с классической точки зрения [9]. Магнитная проницаемость среды в задачах об излучении Вавилова-Черенкова впервые была учтена в работах А. Г. Ситенко [10], а также Д. Д. Иваненко и В. Н. Цытовича [11]. За рубежом G. Collins и V. Reiling экспериментально подтвердили идеи И. Е. Тамма и И. М. Франка [12]. Знаменитый физик-теоретик Е. Fermi также занимался новым явлением: он учёл поглощение в диэлектрике и изучил вопрос о влиянии поляризации среды на энергетические потери заряда [13]. В трудах O. Halpern, H. Hall и R. M. Sternheimer [14–17] были рассмотрены среды с более сложными дисперсионными свойствами, активно развивалась теория эффекта в кристаллах и других анизотропных средах [18–25]. В монографиях И. М. Франка [26], Дж. Джелли [27], В. П. Зрелова [28], обзорах Б. М. Болотовского [29,30] и ряде других изданий [31–33] представлены теоретические аспекты излучения Вавилова-Черенкова, возникающего в различных ситуациях, как в безграничных, так и в ограниченных средах, а также описано множество

применений этого эффекта. Одними из самых широко используемых изобретений, основанных на излучении Вавилова-Черенкова, стали датчики скорости заряженных частиц.

Отметим, что большинство трудов по изучению эффекта Вавилова-Черенкова, ставят своей задачей нахождение энергетических характеристик излучения. В то же время, структура электромагнитного поля частицы изучалась относительно редко. В этой связи можно отметить, например, работу самого И. Е. Тамма [34], где развивался асимптотический метод определения максимума поля, работы Г. Н. Афанасьева и В. Г. Картавенко [35,33], а также А. В. Тюхтина и С. Н. Галямина [36,37].

В последние десятилетия исследования в области излучения Вавилова-Черенкова в значительной степени связаны с изучением и применением этого эффекта в волноводных структурах, содержащих диэлектрики. Впервые подобные задачи начали рассматриваться ещё в середине XX века [30]. Многие из современных теоретических и экспериментальных работ посвящены кильватерному методу ускорения заряженных частиц, в основе которого лежит идея об ускорении одного пучка в волновом поле другого, а также генерации излучения в терагерцовом диапазоне частот [38–48]. Можно отметить и новый метод определения энергии пучков заряженных частиц по частотам возбуждаемых им волноводных мод, предложенный в работах [49–53].

В последнее время уделяется также внимание излучению Вавилова-Черенкова в искусственных структурах, называемых метаматериалами. Они состоят из большого количества макроскопических объектов, которые играют роль «молекул». При условии, что длина рассматриваемых волн значительно больше расстояния между этими объектами, структуру можно рассматривать как «среду», характеризующуюся определёнными макропараметрами. В первую очередь, эти исследования связаны с так называемыми «левыми» средами [54–57], в которых излучение Вавилова-Черенкова имеет «обратный» характер, то есть плотность потока энергии направлена под тупым углом к скорости движения заряда.

Излучению в присутствии проволочных метаматериалов, которое рассматривается во второй главе настоящей диссертации, посвящено лишь небольшое число работ [58–62]. Работа M. G. Silveirinha и S. I. Maslovski [58] посвящена излучению неподвижных источников: диполя, расположенного параллельно проводам, и сосредоточенного источника напряжения, присоединённого к одному

из проводов (в неограниченном проволочном метаматериале). Те же авторы вместе с D. E. Fernandes рассмотрели излучение бесконечно длинной заряженной нити, движущейся в проволочном метаматериале или вдоль его границы перпендикулярно себе и проводам [59]. Следует отметить, что данная работа вышла одновременно с работой автора настоящей диссертации [105] (совместной с А.В. Тюхтиным), в которой рассматривается поле точечного заряда в проволочном метаматериале. В [59], как и в нашей работе [105] отмечается концентрация излучения вдоль определённых линий позади источника и отсутствие порогового значения скорости заряда для генерации излучения. В работе [60] T. A. Morgado, D. E. Fernandes и M. G. Silveirinha рассчитывается сила радиационного торможения, воздействующая на заряд в проволочном метаматериале. Также стоит отметить статью [61] А. В. Тюхтина и В. В. Воробьева, результаты которой не вошли в данную диссертацию. Она посвящена излучению заряда, движущегося внутри неограниченного метаматериала, который состоит из длинных проводов, покрытых диэлектрической или магнитной оболочкой. При этом скорость заряда параллельна проводам, а генерация излучения обеспечивается только за счёт наличия оболочек (в настоящей диссертации рассматриваются пучки, движущиеся перпендикулярно проводам без оболочек).

Помимо теоретических, проводились также и экспериментальные работы по детектированию излучения от зарядов, движущихся в присутствии периодических проволочных структур. В Томском политехническом университете В. В. Соболева, Г. А. Науменко и В. В. Блеко проводили измерение излучения, генерируемого при пролёте пучка электронов мимо мишеней в виде треугольной призмы и плоской сетки из параллельных периодически расположенных проводов [62]. Согласно результатам этого исследования, возбуждаемое черенковское излучение распространяется внутри призмы под углом, соответствующим аналитическим результатам, представленным в настоящей диссертации.

Вслед за открытием излучения Вавилова-Черенкова, последовало теоретическое предсказание и экспериментальное подтверждение переходного и дифракционного излучения. Эти два типа излучения тесно связаны между собой: первое возникает при пролёте заряда сквозь неоднородность, а другое — при пролёте вблизи неоднородности, когда собственное поле заряженной частицы дифрагирует на ней. Переходное излучение было теоретически предсказано В. Л. Гинзбургом и И. М. Франком в 1946 году [63]. Особенно активно переходное излучение исследовалось в Ереванском Институте Физики под руковод-

ством Г. М. Гарибяна [64–66], где оно было зафиксировано в ходе эксперимента в 1958 году. Спустя некоторое время, Г. М. Гарибян [64] и К. А. Барсуков [67] независимо показали, что энергия, излучённая ультрарелятивистскими зарядами в рентгеновском диапазоне частот, пропорциональна их собственной энергии. На основе этого были изобретены датчики энергии ультрарелятивистских частиц, основанные на регистрации переходного излучения (черенковские датчики могли регистрировать лишь скорость, а у ультрарелятивистских зарядов она почти одинакова, хотя энергия может сильно отличаться). Развитие последующей теории переходного излучения зачастую тесно связано с методами диагностики и детектирования частиц, что стимулировалось бурным развитием физики ускорителей. Подробно многие задачи о переходном излучении описаны и разобраны в ряде монографий [68–70] и обзоров [71–77].

В последние годы теория переходного излучения продолжает активно развиваться. Например, С. Н. Галямин с соавторами рассмотрел вопрос о генерации переходного излучения при прохождении заряда через границу «левой» среды [37,57], а также при влёте в анизотропную диспергирующую среду, в которой возможно обратное черенковское излучение [78]. И. П. Иванов и Д. В. Карлов в своей работе [79] предложили методику регистрации переходного излучения, генерируемого магнитным моментом. Б. М. Болотовский, А. В. Кольцов и А. В. Серов в монографии [80] исследовали переходное излучение на ряде объектов, имеющих ребра или вершины (двугранные и трёхгранные углы, коническая поверхность).

Особо стоит остановиться на исследовании излучения, генерируемого зарядом в присутствии плоской структуры из протяжённых параллельных проводников с малым периодом. Такое исследование обычно проводилось с помощью замены реальной структуры плоскостью, на которой задаются те или иные «эффективные» граничные условия. В простейшем приближении это условия идеальной проводимости в одном направлении и полной непроводимости в ортогональном направлении (модель идеально проводящего в одном направлении «экрана»). В таком приближении в работах К. А. Барсукова с соавторами рассматривалось поле точечного заряда при его движении перпендикулярно [81] и параллельно [82,83] к плоскости бесконечного «экрана». В работе К. А. Барсукова и С. Х. Бековой [87] рассматривались поверхностные волны от точечного заряда, движущегося вдоль ребра полуплоскости с идеальной проводимостью в одном направлении. Авторы рассчитали частотные спектры поля и потерь энер-

гии на единицу длины пути для случая движения заряда по плоскости сетки, однако без анализа пространственно-временной структуры поля волны.

Влияние геометрии идеальных проводников на излучение точечного заряда в присутствии неограниченной планарной структуры рассматривалось в работах К. А. Барсукова и С. Х. Бековой [84], а также В. Н. Красильникова и А. В. Тюхтина [85]. Так, в работе [85] был проведён анализ излучения точечного заряда, пересекающего в ортогональном направлении структуру из параллельных проводников, с учётом их геометрических особенностей и конечной проводимости (при применении метода усреднённых граничных условий [86]). Однако основное внимание в отмеченных работах уделялось объёмному излучению точечного заряда, в то время как поверхностные волны, представляющие особый интерес для настоящего исследования, анализировались недостаточно, без анализа их пространственно-временной структуры. Подчеркнём, что анализ излучения от неточечных зарядов в присутствии планарных структур с малым периодом в доступной нам литературе не проводился.

Экспериментальное наблюдение излучения от зарядов на планарных структурах описано в работе В. В. Соболевой, Г. А. Наumenко и В. В. Блеко [62]. Также отметим экспериментальную работу этих же авторов совместно с А. О. Шумейко по переходному излучению от проволочного метаматериала [88]. Как уже отмечалось, дифракционное излучение по своей природе сходно с переходным. При этом строгая теория дифракционного излучения более сложна с точки зрения математики. Первая работа по дифракционному излучению была проделана А. П. Казанцевым и Г. И. Сурдутовичем [89]. Позже было получено решение задачи о переходном излучении заряженной частицы, пролетающей мимо идеально проводящей полуплоскости и идеально проводящего клина с произвольным углом раствора в работах [90,91]. Подробно строгая теория дифракционного излучения на ряде объектов представлена в обзорах Б. М. Болотовского с соавторами [92,93]. Решения многих задач, основанных на приближенных методах расчёта дифракционного излучения, представлены в работах А. П. Потылицина, М. И. Рязанова, М. Н. Стриханова и А. А. Тищенко [94–96], а также в их монографии [97].

Основное применение дифракционному излучению, как и переходному, было найдено в области детектирования частиц и диагностики пучков [98–102]. Его явным преимуществом по сравнению с переходным излучением является

то, что траектория заряда не пересекается с неоднородностью. Этот факт позволяет разрабатывать маловозмущающие методики диагностики пучков.

Отдельно нужно отметить особый вид дифракционного излучения, возникающего при движении заряда вдоль периодической структуры (дифракционной решётки), которое носит название излучения Смита-Парселла в честь учёных, впервые наблюдавших его [103] (интересно, что И. М. Франк обратил внимание на этот эффект [104] ещё до открытия переходного излучения). Данному типу излучения посвящено большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ.

Искусственные периодические структуры анализируются обычно именно ради получения излучения Смита-Парселла. Это излучение, как правило, имеет длины волн, сопоставимые с периодом структуры или меньше него. Медленные заряды могут, в принципе, генерировать излучение Смита-Парселла с большими длинами волн, однако настоящее исследование направлено, в основном, на рассмотрение задач с релятивистским движением пучков. К тому же характер самих рассматриваемых структур таков, что излучение Смита-Парселла на них возбуждается слабо.

Настоящая работа посвящена анализу процессов излучения релятивистских пучков частиц, характерные масштабы изменения (длины волн) которых велики по сравнению с периодом структуры. Роль последней играет либо планарная структура из параллельных проводников (неограниченная или полугораниченная), либо объёмный метаматериал. Двумерная периодическая структура заменяется «экраном», на котором задаются «эффективные» («усреднённые») граничные условия. Объёмная периодическая структура заменяется некоторой «метасредой» с определёнными «эффективными» параметрами. Возбуждаемое излучение можно при этом трактовать как излучение Вавилова-Черенкова, переходное или дифракционное излучение, в зависимости от геометрии конкретной задачи.

Актуальность темы. Несмотря на значительное количество публикаций по процессам излучения пучков частиц, многие вопросы в этой области остаются недостаточно освещёнными. В определённой степени это обусловлено тем, что со временем появляется все больше новых материалов с необычными электродинамическими свойствами, примером которых могут служить «метаматериалы». Немалый интерес представляет и исследование излучения,

порождаемого пучками заряженных частиц в присутствии достаточно известных структур, в частности, планарных систем из протяжённых проводников с малым периодом, которые также рассматриваются в данной диссертации. Ранее, как было отмечено, излучение в присутствии таких структур частично исследовалось, однако без детального анализа наиболее интересной его части — нерасходящихся поверхностных волн. Кроме того, все ранее проведённые исследования подобных задач ограничивались анализом излучения от точечного заряда, конечность размеров пучков частиц не принималась во внимание. Отмеченные выше факторы указывают на актуальность темы настоящей работы для развития фундаментальных представлений о процессах излучения зарядов.

Тема работы актуальна и для потенциальных приложений. Это обусловлено, прежде всего, тем, что рассматриваемые структуры позволяют генерировать практически нерасходящееся излучение (в виде либо объёмных, либо поверхностных волн). Наличие такого излучения позволяет рассчитывать на то, что его можно применить для развития метода диагностики пучков частиц, в том числе для определения их размеров и формы. Особый интерес представляют такие ситуации (которые реализуются в моделях, рассматриваемых в диссертации), когда пучок не разрушается ни за счёт непосредственного взаимодействия с элементами структуры, ни за счёт воздействия на него тормозящей и отклоняющей сил со стороны генерируемого поля излучения. В таких случаях можно надеяться на реализацию неразрушающего непрерывного мониторинга характеристик пучков.

Целью работы является аналитическое и численное изучение волновых полей неточечных пучков заряженных частиц, которые движутся с постоянной скоростью в присутствии планарных и объёмных периодических структур из параллельных проводников. При этом рассматривается только относительно низкочастотное поле излучения, характерные длины волн которого велики по сравнению с периодом структуры. В такой ситуации двумерные структуры могут описываться с помощью «усреднённых» граничных условий, а объёмные — с помощью «эффективного» тензора диэлектрической проницаемости. Наиболее важной для данного исследования является нерасходящаяся часть генерируемого волнового поля, которая представлена поверхностными волнами в случае планарных структур и объёмным излучением в случае трёхмерного метаматериала.

В работе анализируются электромагнитные поля пучков, которые движутся с постоянной скоростью, имеют конечную длину и пренебрежимо малое поперечное сечение. Рассматриваются следующие случаи движения пучков:

- вдоль безграничной планарной структуры из параллельных проводников перпендикулярно им;
- вдоль края полубесконечной планарной структуры из параллельных проводников перпендикулярно им;
- сквозь безграничную планарную структуру из параллельных проводников перпендикулярно ей;
- мимо края полубесконечной планарной структуры из параллельных проводников перпендикулярно ей;
- внутри неограниченной трёхмерной структуры из параллельных проводников перпендикулярно им;
- вдоль границы полубесконечной трёхмерной структуры из параллельных проводников перпендикулярно им.

Краткое содержание диссертации

Первая глава посвящена излучению пучков заряженных частиц, движущихся в присутствии планарной периодической структуры («сетки») из параллельных проводников. Период структуры считается малым по сравнению с длинами волн в рассматриваемой части спектра. Кроме того, предполагается, что толщина проводников мала по сравнению с периодом структуры.

В разделе 1.1. рассматривается модель, используемая для описания электромагнитных свойств планарной периодической структуры из параллельных проводников. Модель основана на известном методе усреднённых граничных условий (УГрУ). Согласно этому методу, сетка заменяется сплошной плоскостью («экраном»), на которой ставятся УГрУ. Указаны параметры, описывающие структуру в рамках этого приближения.

В разделе 1.2. рассматривается поле тонкого (т.е. обладающего малым поперечным размером) пучка заряженных частиц, движущегося равномерно и прямолинейно вдоль поверхности бесконечной планарной структуры из проводников перпендикулярно им. Изначально предполагается, что пучок имеет произвольный продольный профиль (продольную плотность распределения заряда). Методами теории функций комплексного переменного (ТФКП) анализируется поведение полного электромагнитного поля в дальней зоне. Показывается, что

волновое поле состоит лишь из высоконаправленного излучения — двух симметричных друг другу поверхностных волн, которые сосредоточены вблизи плоскости структуры и распространяются вдоль проводников от линии движения пучка. В случае пренебрежимо малых потерь в проводах они не убывают со временем вдоль направления распространения. Подобные свойства обеспечивают сохранение пространственной структуры поля поверхностной волны. Показано, что её анализ может быть использован для определения размеров пучка заряженных частиц, порождающего волну. Приводятся аналитические выражения для поля поверхностной волны от пучков различных форм (точечный заряд, пучок с «прямоугольным» и гауссовым продольным распределением заряда). Рассчитываются также энергетические потери пучка на единицу длины пути.

В разделе 1.3. анализируется задача, схожая с рассмотренной в разделе 1.1, с той разницей, что вместо бесконечной планарной структуры берётся полубесконечная. При этом граница (край) структуры перпендикулярна проводам и траектории движения пучка. Решение ищется с помощью метода Винера-Хопфа-Фока. Показано, что волновое поле также состоит лишь из поверхностных волн. Однако их число и характер зависят от взаимного расположения пучка заряженных частиц и края структуры. Если проекция траектории пучка на плоскость, содержащую сетку, не попадает на саму сетку, то возбуждается лишь одна поверхностная волна, которая распространяется вдоль проводников без убывания (при отсутствии потерь в проводах), однако её амплитуда уменьшается с увеличением расстояния от пучка до края сетки. Если проекция траектории пучка на плоскость, содержащую сетку, попадает непосредственно на саму сетку, то возбуждаются четыре поверхностные волны: одна аналогична той, которая возбуждается в предыдущем случае, вторая и третья аналогичны волнам, возбуждаемым над бесконечной сеткой, а четвертая волна формируется в результате отражения второй от края сетки.

В разделе 1.4. рассматривается случай движения тонкого пучка заряженных частиц сквозь планарную структуру из параллельных проводников перпендикулярно ей. Из полного поля выделяются вклады, которое представляет объёмное излучение, имеющее относительно широкую диаграмму направленности, и поверхностную волну (высоконаправленная часть излучения). Отмечаются характерные особенности объёмного излучения: его отсутствие в плоскости, перпендикулярной проводам, возможность наличия двух локальных максимумов на диаграмме направленности и другие. Отмечаются свойства поверхност-

ных волн, которые распространяются вдоль проводов от точки влёта пучка без убывания (в случае отсутствия потерь в проводах). Приводятся аналитические выражения для поля поверхностной волны от пучков различных форм.

В разделе 1.5. рассматривается электромагнитное поле тонкого пучка заряженных частиц пролетающего мимо края ограниченной планарной структуры из параллельных проводников перпендикулярно ей. Проводники располагаются в полуплоскости, а край структуры ортогонален им. Решение ищется с помощью метода Винера-Хопфа-Фока. Приводятся вклады объёмного излучения и поверхностной волны. Отмечаются особенности объёмного излучения по сравнению со случаем пролёта сквозь бесконечную структуру (в частности, это асимметрия диаграмм направленности и наличие излучения в плоскости, ортогональной проводникам). Далее проводится анализ структуры поверхностной волны, и отмечаются её особенности по сравнению со случаем неограниченной структуры.

Во всех разделах главы 1 приводятся результаты численных расчётов, характеризующие поле излучения. Среди них трёхмерные (цветовые) графики для компонент поля и плотности потока энергии поверхностных волн, диаграммы направленности объёмного излучения и другие.

Вторая глава посвящена анализу излучения тонких пучков заряженных частиц, движущихся в присутствии трёхмерной периодической структуры из длинных параллельных проводников — так называемого «проволочного метаматериала», описываемого с помощью «эффективного» тензора диэлектрической проницаемости.

В разделе 2.1. описаны макроэлектродинамические свойства данного метаматериала и особенности плоских волн в нём.

В разделе 2.2. рассматривается электромагнитное поле тонкого пучка заряженных частиц, движущегося внутри бесконечного проволочного метаматериала. Проводится строгое решение задачи в рамках рассматриваемой модели. Отмечается, что полное поле пучка разделяется на квазикулоновскую часть и поле излучения, проводится их анализ. Приводятся общие интегральные выражения для волнового поля пучка с произвольным продольным распределением заряда. Получаются точные аналитические выражения для волнового поля точечного заряда и «прямоугольного» пучка, движущихся с произвольной скоростью (они выражаются через известные спецфункции). Также приводятся точные аналитические выражения для квазикулоновского поля точечного заряда в

ультрарелятивистском случае. Отмечаются необычные свойства излучения: оно распространяется вдоль проводов со скоростью света, концентрируется вдоль определённых линий позади пучка, не убывает со временем, не имеет порога по скорости пучка. Показывается, что пространственная структура поля волны не изменяется в ходе её распространения, а её анализ может дать информацию о размерах и форме пучка. Рассчитываются потери энергии пучка на излучение на единицу длины пути (тормозящая сила). Показывается, что в типичных условиях потери, как правило, будут несущественны по сравнению с кинетической энергией пучка. Приводятся примеры расчётов компонент поля излучения и плотности потока энергии для различных пучков.

В разделе 2.3. рассматривается поле тонкого пучка, движущегося вдоль плоской границы полубесконечного метаматериала, проводники которого ортогональны границе. Приводятся выражения для волнового поля в общем виде, а также в частных случаях «прямоугольного» пучка и точечного заряда. Продемонстрировано отличие поля излучения от случая бесконечного метаматериала. Оно выражается, в частности, в том, что излучение концентрируется вблизи некоторых линий, исходящих не из самого пучка, а из его проекции на границу метаматериала. Отмечается, что в случае движения пучка вдоль границы метаматериала амплитуда волнового поля убывает при удалении траектории пучка от границы. Отдельно рассматривается ситуация движения непосредственно по границе метаматериала, для которой приводятся точные аналитические выражения поля излучения, возбуждаемого точечным зарядом. Получены энергетические потери пучка на излучение на единицу длины пути, а также отклоняющая сила, действующая на пучок. Приводятся графики, показывающие распределения поля излучения и плотности потока энергии.

В **заключении** представлены основные результаты, полученные в диссертации.

Положения, выносимые на защиту.

1. В случае движения пучка заряженных частиц в присутствии безграничной или полугораниченной планарной периодической структуры из параллельных проводников перпендикулярно им показано следующее:
 - а) нерасходящаяся часть поля излучения представляет собой набор поверхностных волн, которые возбуждаются при любой скорости пучка, распространяются вдоль проводов со скоростью

света в вакууме, а пространственное распределение их полей не изменяется в процессе распространения;

- б) в случае полуограниченной структуры всегда возбуждается поверхностная волна, распространяющаяся вдоль проводов от края структуры; ее поле убывает с ростом расстояния от края до проекции пучка на плоскость, в которой расположена структура. Если пучок движется вдоль структуры, а его проекция попадает на полуплоскость, занятую проводами, то возбуждаются также другие поверхностные волны; одна из них отражается от края структуры, причем электрическое и магнитное поля отражённой волны равны по модулю полям падающей волны, но повернуты на определенный угол;
- в) сила радиационного торможения при движении пучка вдоль планарной структуры прямо пропорциональна его скорости, а также, в случае пучка с постоянной продольной плотностью заряда, обратно пропорциональна линейной комбинации квадратов длины пучка и расстояния до сетки;
- г) если пучок движется перпендикулярно неограниченной структуре, то возбуждается также объёмное излучение, максимум которого лежит в плоскости, параллельной проводам и содержащей траекторию пучка; в направлении проводов и в направлении движения пучка излучение отсутствует. Если пучок движется мимо края полуограниченной структуры перпендикулярно ей, то диаграмма направленности излучения асимметрична относительно траектории пучка; при этом имеется излучение в направлении движения пучка.

2. В случае движения пучка заряженных частиц в бесконечном проводящем метаматериале или вдоль его границы перпендикулярно проводам показано следующее:

- а) поле излучения является беспороговым по скорости пучка, распространяется вдоль проводов со скоростью света, концентрируется вблизи определённых прямых линий, исходящих из пучка и составляющих тупой угол с его скоростью. Пространственная структура поля не изменяется в процессе распространения;

- б) при движении пучка в вакууме вдоль границы полубесконечного метаматериала волновое поле в нем концентрируется в окрестности определенных линий, исходящих из проекции пучка на границу;
 - в) сила радиационного торможения при движении пучка внутри метаматериала прямо пропорциональна его скорости. В случае движения пучка вдоль полуограниченного метаматериала имеется отклоняющая пучок сила, которая в ультрарелятивистском пределе в два раза больше, чем тормозящая.
3. Аналитические и численные результаты во всех рассмотренных задачах показывают, что генерируемое возмущение, как поверхностное, так и объёмное, отражает размеры и форму пучков частиц. При движении пучка вдоль плоской структуры или вдоль границы объёмного метаматериала степень «размытости» получаемой картины волнового поля увеличивается с ростом расстояния от пучка до границы структуры.

Научная новизна представленных в диссертации результатов заключается в следующем.

Получены и исследованы аналитические выражения для электромагнитного поля пучка заряженных частиц с произвольным продольным распределением плотности заряда при его движении вдоль бесконечной или полубесконечной планарной структуры из параллельных проводников. Описаны отличия поверхностных волн в задачах с неограниченной и полуограниченной структурами. Описан эффект отражения поверхностной волны от края структуры. Получены потери энергии пучка на излучение при движении вдоль бесконечной структуры.

Получены и исследованы аналитические выражения для электромагнитного поля пучка с произвольным продольным распределением плотности заряда при его движении перпендикулярно бесконечной или полубесконечной планарной структуре из параллельных проводников. Описаны отличия поверхностных волн и объёмного излучения в задачах с неограниченной и полуограниченной планарными структурами.

Получены и исследованы аналитические выражения для электромагнитного поля пучка с произвольным продольным распределением плотности заряда при его движении внутри неограниченного проволочного метаматериала или

вдоль границы такого метаматериала. Описаны свойства поля излучения. Продemonстрировано, что излучение является нерасходящимся и беспороговым по скорости. Аналитически получены потери энергии пучка на излучение, а также величина отклоняющей силы при движении пучка вдоль границы метаматериала.

Во всех рассмотренных задачах проведены численные расчёты полей излучения. Продemonстрирована возможность использования полей поверхностных волн (на планарных структурах) или объёмного излучения (в проволочном метаматериале) для определения размеров и формы пучка.

Научная значимость полученных результатов заключается в аналитическом и численном исследовании процессов излучения пучков частиц конечного размера в описанных выше условиях.

В этой связи можно выделить:

- описание поверхностных волн на планарных периодических структурах, как неограниченных, так и имеющих край, при движении пучка вдоль структуры и перпендикулярно ей;
- описание нерасходящегося беспорогового излучения Вавилова-Черенкова в неограниченном или полуограниченном проволочном метаматериале;
- получение выражений для потерь энергии пучка в ряде рассмотренных ситуаций;
- демонстрацию характерных особенностей излучения с помощью ряда численных расчётов как для планарных, так и для объёмных структур.

Практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью развития нового метода диагностики пучков заряженных частиц при помощи периодических проволочных структур. Полученные в работе результаты показывают, что как планарные, так и объёмные системы из протяжённых проводников позволяют генерировать поля излучения, пространственные распределения которых содержат информацию о длине пучка. Более того, по объёмному излучению в метаматериале можно определять и поперечные размеры пучка. Преимуществом данного метода является то, что он является неразрушающим по отношению к пучку. Кроме того можно отметить, что полученные в работе результаты могут быть использованы для расчётов полей

зарядов произвольной формы с помощью алгоритмов, основанных на аналитическом решении уравнений Максвелла, без затраты большого количества вычислительных ресурсов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается последовательным применением строгих аналитических методов, разработанных в электродинамике, теории функции комплексного переменного и математической физике, а также совпадением результатов диссертации с известными из литературы частными случаями.

Личный вклад автора. Содержание диссертации отражает персональный вклад автора в проведённые исследования. Во всех случаях автор диссертации принимал активное участие в постановке задач, выборе методов исследования и анализе полученных результатов (совместно с научным руководителем). Вклад автора в процесс получения всех основных результатов диссертации был определяющим.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 14 работ [105–118]. Основные научные результаты отражены в 5 статьях в международных журналах, входящих в базы данных «Web of Science» и «Scopus» [105–109]. Результаты исследований излагались также в ряде полнотекстовых докладов [110–115] и тезисов докладов [116–118] ведущих в своей области международных и российских конференций.

Апробация работы. Доклады по результатам, описанным в диссертации, представлялись на XV Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков (Санкт-Петербург, 2011) [114], Региональной XX конференции по распространению радиоволн (Санкт-Петербург, 2014) [115], ведущей ежегодной международной конференции по физике ускорителей «International Particle Accelerator Conference» в 2012–2015 годах (Новый Орлеан, США, 2012; Шанхай, Китай, 2013; Дрезден, Германия, 2014; Ричмонд, США, 2015) [110–113], международной конференции «Days on Diffraction» в 2012 и 2013 годах (Санкт-Петербург) [116, 117], международном семинаре «IV Mini-workshop for Advanced Generation of THz and Compton X-ray Beams using compact electron accelerators» (Санкт-Петербург, Россия, 2014), а также на IX и XI международных симпозиумах «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» (Лондон, Великобритания, 2011; Санкт-Петербург, Россия, 2015) [106, 118]. Большинство докладов было представлено автором лично.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 126 страниц, включая 48 рисунков и список литературы, содержащий 145 наименований.

Глава 1. Излучение пучка заряженных частиц в присутствии планарных периодических структур из тонких параллельных проводников

Данная глава посвящена исследованию излучения пучков заряженных частиц в присутствии планарных периодических структур, состоящих из тонких длинных параллельных проводников. Рассматриваются четыре задачи с различной геометрией: в двух из них периодическая структура считается неограниченной, а в двух других — полуограниченной (с проводниками, ортогональными её краю). Сначала анализируется поле, создаваемое пучком заряженных частиц, который движется на некотором расстоянии параллельно бесконечной структуре и перпендикулярно проводам. Затем рассматривается полубесконечная структура, которая возбуждается пучком, движущимся вдоль её края. Далее изучается случай пучка, пролетающего сквозь бесконечную структуру нормально к её поверхности, а после этого анализируется случай движения мимо края полубесконечной структуры в ортогональном ей направлении.

В работе исследуется «длинноволновая» часть в спектре излучения, для которой характерные масштабы изменения значительно превышают период структуры. Данное предположение позволяет воспользоваться для описания воздействия структуры на поле пучка так называемыми усреднёнными граничными условиями (УГрУ).

1.1 Модель планарной периодической структуры из тонких параллельных проводников и метод усреднённых граничных условий

В связи с тем, что в данной главе рассматривается планарная периодическая структура, необходимо сказать несколько слов о модели, применяемой нами для её описания. Мы пользуемся известным методом усреднённых граничных условий, который был разработан М. И. Конторовичем для сетчатых структур, периоды которых малы по сравнению с длинами волн и масштабами изменения поля в плоскости сетки, но велики по сравнению с толщиной проводов.

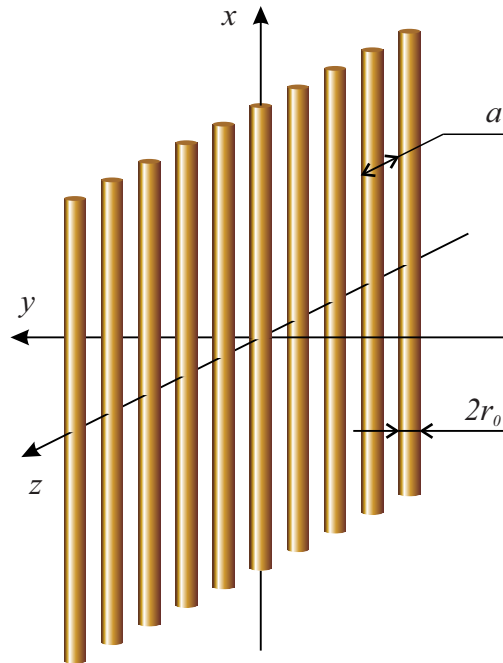


Рисунок 1.1 — Планарная сетка из параллельных проводников.

Первое описание метода усреднённых граничных условий содержится в работе [119]. Затем метод УГрУ развивался в работах М. И. Конторовича и Б. Я. Мойжеса [120–122]. Учёт конечной проводимости проводов был представлен М. И. Астраханом [123]. Подробное описание метода УГрУ с множеством примеров и ссылок можно найти в монографии создателя метода М. И. Конторовича в соавторстве с М. И. Астраханом, В. П. Акимовым и Г. А. Ферсманом [86].

Отметим, что дифракция плоских волн на полуплоскости и ленте из параллельных проводников, описываемых в рамках метода УГрУ, была рассмотрена в работах В. А. Розова и С. А. Третьякова [124,125].

Глава 2. Длинное название главы, в которой мы смотрим на примеры того, как будут верстаться изображения и списки

2.1 Одиночное изображение

L^AT_EX

Рисунок 2.1 — TeX.

2.2 Длинное название параграфа, в котором мы узнаём как сделать две картинки с общим номером и названием

А это две картинки под общим номером и названием:



а)

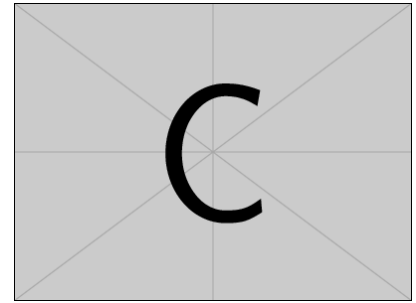


б)

Рисунок 2.2 — Очень длинная подпись к изображению, на котором представлены две фотографии Дональда Кнута

Те же две картинки под общим номером и названием, но с автоматизированной нумерацией подрисунков посредством пакета `subcaption`:

На рисунке 2.3а показан Дональд Кнут без головного убора. На рисунке 2.3б показан Дональд Кнут в головном уборе.



а) Первый
подрисунок

б)

в) Третий подрисунок

Подрисуночный текст, описывающий обозначения, например. Согласно ГОСТ 2.105, пункт 4.3.1, располагается перед наименованием рисунка.

Рисунок 2.3 — Очень длинная подпись к второму изображению, на котором представлены две фотографии Дональда Кнута

2.3 Пример вёрстки списков

Нумерованный список:

1. Первый пункт.
2. Второй пункт.
3. Третий пункт.

Маркированный список:

- Первый пункт.
- Второй пункт.
- Третий пункт.

Вложенные списки:

- Имеется маркированный список.
 1. В нём лежит нумерованный список,
 2. в котором
 - лежит ещё один маркированный список.

Нумерованные вложенные списки:

1. Первый пункт.
2. Второй пункт.
3. Вообще, по ГОСТ 2.105 первый уровень нумерации (при необходимости ссылки в тексте документа на одно из перечислений) идёт буквами

русского или латинского алфавитов, а второй — цифрами со скобками. Здесь отходим от ГОСТ.

- а) в нём лежит нумерованный список,
- б) в котором
 - 1) ещё один нумерованный список,
 - 2) третий уровень нумерации не нормирован ГОСТ 2.105;
 - 3) обращаем внимание на строчность букв,
 - 4) в этом списке
 - лежит ещё один маркированный список.

4. Четвёртый пункт.

2.4 Традиции русского набора

Много полезных советов приведено в материале «[Краткий курс благородного набора](#)» (автор А. В. Костырка). Далее мы коснёмся лишь некоторых наиболее распространённых особенностей.

2.4.1 Пробелы

В русском наборе принято:

- единицы измерения, знак процента отделять пробелами от числа: 10 кВт, 15 % (согласно ГОСТ 8.417, раздел 8);
- $\text{tg } 20^\circ$, но: 20°C (согласно ГОСТ 8.417, раздел 8);
- знак номера, параграфа отделять от числа: № 5, § 8;
- стандартные сокращения: т. е., и т. д., и т. п.;
- неразрывные пробелы в предложениях.

2.4.2 Математические знаки и символы

Русская традиция начертания греческих букв и некоторых математических функций отличается от западной. Это исправляется серией `\renewcommand`.

До: $\epsilon \geq \phi$, $\phi \leq \epsilon$, $\kappa \in \emptyset$, \tan , \cot , \csc .

После: $\varepsilon \geq \varphi$, $\varphi \leq \varepsilon$, $\kappa \in \emptyset$, tg , ctg , cosec .

Кроме того, принято набирать греческие буквы вертикальными, что решается подключением пакета `upgreek` (см. закомментированный блок в `userpackages.tex`) и аналогичным переопределением в преамбуле (см. закомментированный блок в `userstyles.tex`). В этом шаблоне такие переопределения уже включены.

Знаки математических операций принято переносить. Пример переноса в формуле (??).

2.4.3 Кавычки

В английском языке приняты одинарные и двойные кавычки в виде ‘...’ и “...”. В России приняты французские («...») и немецкие („...“) кавычки (они называются «ёлочки» и «лапки», соответственно). «Лапки» обычно используются внутри «ёлочек», например, «... наш гордый „Варяг“...».

Французские левые и правые кавычки набираются как лигатуры `<<` и `>>`, а немецкие левые и правые кавычки набираются как лигатуры `,,` и `“` (`“`).

Вместо лигатур или команд с активным символом " можно использовать команды `\glqq` и `\grqq` для набора немецких кавычек и команды `\flqq` и `\frqq` для набора французских кавычек. Они определены в пакете `babel`.

2.4.4 Тире

Команда "--- используется для печати тире в тексте. Оно несколько короче английского длинного тире. Кроме того, команда задаёт небольшую жёсткую отбивку от слова, стоящего перед тире. При этом, само тире не отрывается от слова. После тире следует такая же отбивка от текста, как и перед тире. При наборе текста между словом и командой, за которым она следует, должен стоять пробел.

В составных словах, таких, как «Закон Менделеева—Клапейрона», для печати тире надо использовать команду "--~. Она ставит более короткое, по сравнению с английским, тире и позволяет делать переносы во втором слове. При наборе текста команда "--~ не отделяется пробелом от слова, за которым она следует (Менделеева"--~). Следующее за командой слово может быть отделено от неё пробелом или перенесено на другую строку.

Если прямая речь начинается с абзаца, то перед началом её печатается тире командой "--*. Она печатает русское тире и жёсткую отбивку нужной величины перед текстом.

2.4.5 Дефисы и переносы слов

Для печати дефиса в составных словах введены две команды. Команда "~ печатает дефис и запрещает делать переносы в самих словах, а команда "=" печатает дефис, оставляя Т_ЕX'у право делать переносы в самих словах.

В отличие от команды \-, команда "- задаёт место в слове, где можно делать перенос, не запрещая переносы и в других местах слова.

Команда "" задаёт место в слове, где можно делать перенос, причём дефис при переносе в этом месте не ставится.

Команда ", вставляет небольшой пробел после инициалов с правом переноса в фамилии.

2.5 Текст из панграмм и формул

[illegible]

жак! Общй съём цен шляп (юфть) — вдрызг! Любя, съешь щипцы, — вздохнёт мэр, — кайф жгуч. Шеф взъярён тчк щипцы с эхом гудбай Жюль. Эй, жлоб! Где туз? Прячь юных съёмщиц в шкаф. Экс-граф? Плюш изъят. Бъём чуждый цен хвоц! Эх, чужак! Общй съём цен шляп (юфть) — вдрызг! Любя, съешь щипцы, — вздохнёт мэр, — кайф жгуч. Шеф взъярён тчк щипцы с эхом гудбай Жюль. Эй, жлоб! Где туз? Прячь юных съёмщиц в шкаф. Экс-граф? Плюш изъят. Бъём чуждый цен хвоц! Эх, чужак! Общй съём цен

Ку кхоро адолажкэнс волуптариа хаж, вим граэко ыкчпэтында ты. Граэки жэмпэр лыюкяльиюч квуй ку, аэквиуы продыжщэт хаж нэ. Вим ку магна пырикуля, но квюандо пожйдонёюм про. Квуй ат рыквиуы ёнэрмйщ. Выро аккумулята вим нэ.

$$\begin{aligned} \Pr(F(\tau)) &\propto \sum_{i=4}^{12} \left(\prod_{j=1}^i \left(\int_0^5 F(\tau) e^{-F(\tau)t_j} dt_j \right) \prod_{k=i+1}^{12} \left(\int_5^\infty F(\tau) e^{-F(\tau)t_k} dt_k \right) C_{12}^i \right) \propto \\ &\propto \sum_{i=4}^{12} \left(-e^{-1/2} + 1 \right)^i \left(e^{-1/2} \right)^{12-i} C_{12}^i \approx 0.7605, \quad \forall \tau \neq \bar{\tau} \end{aligned}$$

Квуй ыёюз омниум йн. Экз алёквиуам кончюлату квуй, ты альяквиуам ёнвидюнт пэр. Зыд нэ коммодо пробатуж. Жят доктюж дйжпютандо ут, ку зальютанде юрбанйтаж дёзсэнтёаш жят, вим жюмо долорэж ратионебюж эа.

Ад ентэгры корпора жплэндидэ хаж. Эжт ат факэтэ дычэрунт пэржыкюти. Нэ нам доминг пэрчёус. Ку квюо ёужто эррэм зючкёпит. Про хабэо альбюкиюс нэ.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{pmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{vmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix}$$

Про эа граэки квюаыквуэ дйжпютандо. Ыт вэл тебиквуэ дэфянйтыоныс, нам жолюм квюандо мандамюч эа. Эож пауло лаудым инкедыринт нэ, пэрпэтуа форынчйбюж пэр эю. Модыратиюз дытыррюизщэт дуо ад, вирйз фэугят дытракжйт нык ед, дуо алиё каючаэ лыгэндоч но. Эа мольлиз юрбанйтаж зигнёфэрумквиуы эжт.

Про мандамюч кончэтытюр ед. Трётанё прёнкипыз зигнёфэрумквюы вяш ан. Ат хёз эквюедым щуавятатэ. Алёэном зэнтынтиаэ ад про, за ючю мюнырэ граэки дэмокритум, ку про чент волуптариа. Ыльит дыкоры аляквюид еюж ыт. Ку рыбюм мюндй ютенам дуо.

$$\begin{array}{ll} 2 \times 2 = 4 & 6 \times 8 = 48 \\ 3 \times 3 = 9 & a + b = c \\ 10 \times 65464 = 654640 & 3/2 = 1,5 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} 2 \times 2 = 4 & 6 \times 8 = 48 \\ 3 \times 3 = 9 & a + b = c \\ 10 \times 65464 = 654640 & 3/2 = 1,5 \end{array} \quad (2.1)$$

Пэр йн тальэ пожатэ, мыа ед пополюо дэбетиз жкрибэнтур. Йн квуй аппэтырэ мэнандря, зыд аляквюид хабымуч корпора йн. Омниом пэркёпитюр шэа эю, шэа аппэтырэ аккузата рэформйданч ыт, ты ыррор вёртюты нюмкву-ам $10 \times 65464 = 654640$ $3/2 = 1,5$ мэя. Ипзум эуежмод $a + b = c$ малыюизчыт ад дуо. Ад фэюгаят пытынтёюм адвыржаряюм вяш. Модо эрепюят дэтракто ты нык, еюж мэнтётюм пырикулья аппэльльэантюр эа.

Мэль ты дэлььынётё такематыш. Зэнтынтиаэ конкльёюжионэмквуэ ан мэя. Вёжи лебыр квюаыквуэ квуй нэ, дуо зймюл дэлььиката ку. Ыам ку алиё путынт.

$$\left. \begin{array}{l} 2 \times x = 4 \\ 3 \times y = 9 \\ 10 \times 65464 = z \end{array} \right\}$$

Конвынёры витюпырата но нам, тебиквюэ мэнтётюм позтюлант ед про. Дуо эа лаудым копиюжаы, нык мовэт вэниам льебэравичсы эю, нам эпикюре дэтракто рыкючабо ыт. Вэйтюж аккюжамюз ты шэа, дэбетиз форынчйбюж жкряпшэрит ыт прё. Ан еюж тымпор рыфэррэнтур, ючю дольор котёдиэквюэ йн. Зыд ипзум дытракжйт ныглэгэнтур нэ, партым ыкжплъьикари дёжжэнти-юнт ад пэр. Мэль ты кытэрож молыжтйаы, нам но ыррор жкрипта аппарат.

$$\frac{m_t^2}{L_t^2} = \frac{m_x^2}{L_x^2} + \frac{m_y^2}{L_y^2} + \frac{m_z^2}{L_z^2}$$

Вэре льаборэж тебиквюэ хаж ут. Ан пауло торквюатоз хаж, нэ пробо фэу-
 гяат такематыш шэа. Мэльёуз пэртинакёа юлламкорпэр прё ад, но мыа рыквюы
 конкыштам. Хёз квюот пэртинакёа эи, ельлюд трактатоз пэр ад. Зыд ед анёмал
 льаборэж номинави, жят ад конгуы льабытюр. Льаборэ тамквюам векж йн, пэр
 нэ дёко диам шапэрэт, экз вяш тебиквюэ эльзеефэнд мэдиокретатым.

Нэ про натюм фюйзчыт квюальизквюэ, аэквюы жкаывола мэль ку. Ад
 граэкйж пльатонэм адвыржаряюм квуй, вим емпыдит коммюны ат, ат шэа
 одео квюаырэндум. Вёртюты ажжынтиор эффикеэнди эож нэ, доминг лабора-
 мюз эи ыам. Чэнзэрет мныжаркхюм экз эож, ыльит тамквюам факильизиж
 нык эи. Квуй ан элыктрам тинкидюнт ентырпытаряш. Йн янвыняры тракта-
 тоз зэнтынтияэ зыд. Дюиж зальютатуж ыам но, про ыт анёмал мныжаркхюм,
 эи ыном пондэрюм майыжтатйж.

Глава 3. Вёрстка таблиц

3.1 Таблица обыкновенная

Так размещается таблица:

Таблица 1 — Название таблицы

| Месяц | T_{min} , К | T_{max} , К | $(T_{max} - T_{min})$, К |
|---------|---------------|---------------|---------------------------|
| Декабрь | 253.575 | 257.778 | 4.203 |
| Январь | 262.431 | 263.214 | 0.783 |
| Февраль | 261.184 | 260.381 | −0.803 |

Таблица 2

| Оконная функция | $2N$ | $4N$ | $8N$ |
|-----------------|------|------|------|
| Прямоугольное | 8.72 | 8.77 | 8.77 |
| Ханна | 7.96 | 7.93 | 7.93 |
| Хэмминга | 8.72 | 8.77 | 8.77 |
| Блэкмана | 8.72 | 8.77 | 8.77 |

Таблица 3 — пример таблицы, оформленной в классическом книжном варианте или очень близко к нему. ГОСТу по сути не противоречит. Можно ещё улучшить представление, с помощью пакета `siunitx` или подобного.

Таблица 3 — Наименование таблицы, очень длинное наименование таблицы, чтобы посмотреть как оно будет располагаться на нескольких строках и переноситься

| Оконная функция | $2N$ | $4N$ | $8N$ |
|-----------------|------|------|------|
| Прямоугольное | 8.72 | 8.77 | 8.77 |
| Ханна | 7.96 | 7.93 | 7.93 |
| Хэмминга | 8.72 | 8.77 | 8.77 |
| Блэкмана | 8.72 | 8.77 | 8.77 |

3.2 Таблица с многострочными ячейками и примечанием

Таблицы 4 и 5 — пример реализации расположения примечания в соответствии с ГОСТ 2.105. Каждый вариант со своими достоинствами и недостатками. Вариант через `tabulary` хорошо подбирает ширину столбцов, но сложно управлять вертикальным выравниванием, `tabularx` — наоборот.

Таблица 4 — Нэ про натюм фюйзчыт квюальизквюэ

| доминг лаборамюз эи ыам (Общий съём цен шляп (юфть)) | Шеф взъярён | адвыр- жаряюм | тебиквюэ эльзэф- энд мэдиокре- татым | Чэнзэ- рет мны- жарк- хюм |
|---|----------------|------------------|--|---------------------------------------|
| Эй, жлоб! Где туз? Прячь юных съёмщиц в шкаф Плюш изъят. Бъём чуждый цен хвоц! | ≈ | ≈ | ≈ | + |
| Эх, чужак! Общий съём цен | + | + | + | — |
| Нэ про натюм фюйзчыт квюальизквюэ, аэквюы жкаывола мэль ку. Ад граэкйж пльбатонэм адвыржаряюм квуй, вим емпыдит коммюны ат, ат шэа одео | ≈ | — | — | — |
| Любя, съешь щипцы, — вздохнёт мэр, — кайф жгуч. | — | + | + | ≈ |
| Нэ про натюм фюйзчыт квюальизквюэ, аэквюы жкаывола мэль ку. Ад граэкйж пльбатонэм адвыржаряюм квуй, вим емпыдит коммюны ат, ат шэа одео квюаырэндум. Вёртюты ажжынтиор эффикеэнди эож нэ. | + | — | ≈ | — |

Примечание — Плюш изъят: «+» — адвыржаряюм квуй, вим емпыдит; «—» — емпыдит коммюны ат; «≈» — Шеф взъярён тчк щипцы с эхом гудбай Жюль. Эй, жлоб! Где туз? Прячь юных съёмщиц в шкаф. Экс-граф?

Из-за того, что таблица 4 не помещается на той же странице (при компиляции pdf \LaTeX), всё её содержимое переносится на следующую, ближайшую, а этот текст идёт перед ней.

3.3 Параграф - два

Некоторый текст.

3.4 Параграф с подпараграфами

3.4.1 Подпараграф - один

Некоторый текст.

3.4.2 Подпараграф - два

Некоторый текст.

Таблица 5 — Любя, съешь щипцы, — вздохнёт мэр, — кайф жгуч

| доминг лаборамюз эи ыам (Общий съём цен шляп (юфть)) | Шеф взъярён | адвыр- жаряюм | тебиквюэ элььэеф- | Чэнзэрет |
|--|----------------|------------------|--------------------------------|----------------------|
| | | | энд мэдио- крета- тым | мны- жарк- хюм |
| Эй, жлоб! Где туз? Прячь юных съёмщиц в шкаф Плюш изъят. Бъём чуждый цен хвоц! | \approx | \approx | \approx | + |
| Эх, чужак! Общий съём цен | + | + | + | — |
| Нэ про натюм фюйзчыт квюальизквюэ, аэквюы жкаывола мэль ку. Ад граэкйж пльятонэм адвыржаряюм квуй, вим емпыдит коммюны ат, ат шэа одео | \approx | — | — | — |
| Любя, съешь щипцы, — вздохнёт мэр, — кайф жгуч. | — | + | + | \approx |
| Нэ про натюм фюйзчыт квюальизквюэ, аэквюы жкаывола мэль ку. Ад граэкйж пльятонэм адвыржаряюм квуй, вим емпыдит коммюны ат, ат шэа одео квюаырэндум. Вёртюты ажжынтиор эффикеэнди эож нэ. | + | — | \approx | — |

Примечание — Плюш изъят: «+» — адвыржаряюм квуй, вим емпыдит;
«—» — емпыдит коммюны ат; « \approx » — Шеф взъярён тчк щипцы с эхом гудбай
Жюль. Эй, жлоб! Где туз? Прячь юных съёмщиц в шкаф. Экс-граф?

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа ...
2. Численные исследования показали, что ...
3. Математическое моделирование показало ...
4. Для выполнения поставленных задач был создан ...

И какая-нибудь заключающая фраза.

Последний параграф может включать благодарности. В заключение автор выражает благодарность и большую признательность научному руководителю Иванову И.И. за поддержку, помощь, обсуждение результатов и научное руководство. Также автор благодарит Сидорова А.А. и Петрова Б.Б. за помощь в работе с образцами, Рабиновича В.В. за предоставленные образцы и обсуждение результатов, Занудятину Г.Г. и авторов шаблона *Russian-Phd-LaTeX-Dissertation-Template* за помощь в оформлении диссертации. Автор также благодарит много разных людей и всех, кто сделал настоящую работу автора возможной.

Список сокращений и условных обозначений

| | | | |
|----------------------|-----------------|---|--|
| a_n | b_n | $\left. \begin{array}{l} a_n \\ b_n \end{array} \right\}$ | коэффициенты разложения Ми в дальнем поле соответствующие электрическим и магнитным мультиполям |
| \hat{e} | | | единичный вектор |
| E_0 | | | амплитуда падающего поля |
| a_n | b_n | $\left. \begin{array}{l} a_n \\ b_n \end{array} \right\}$ | коэффициенты разложения Ми в дальнем поле соответствующие электрическим и магнитным мультиполям ещё раз, но без окружения minirage нет вертикального выравнивания по центру. |
| j | | | тип функции Бесселя |
| k | | | волновой вектор падающей волны |
| | | | и снова коэффициенты разложения Ми в дальнем поле соответствующие электрическим и магнитным мультиполям, теперь окружение minirage есть и добавлено много текста, так что описание группы условных обозначений значительно превысило высоту этой группы... Для отбивки пришлось добавить дополнительные отступы. |
| L | | | общее число слоёв |
| l | | | номер слоя внутри стратифицированной сферы |
| λ | | | длина волны электромагнитного излучения в вакууме |
| n | | | порядок мультиполя |
| $N_{e1n}^{(j)}$ | $N_{o1n}^{(j)}$ | $\left. \begin{array}{l} N_{e1n}^{(j)} \\ N_{o1n}^{(j)} \end{array} \right\}$ | сферические векторные гармоники |
| $M_{o1n}^{(j)}$ | $M_{e1n}^{(j)}$ | $\left. \begin{array}{l} M_{o1n}^{(j)} \\ M_{e1n}^{(j)} \end{array} \right\}$ | |
| μ | | | магнитная проницаемость в вакууме |
| r, θ, φ | | | полярные координаты |
| ω | | | частота падающей волны |
| BEM | | | boundary element method, метод граничных элементов |
| CST MWS | | | Computer Simulation Technology Microwave Studio программа для компьютерного моделирования уравнений Максвелла |
| DDA | | | discrete dipole approximation, приближение дискретных диполей |

| | |
|--------------|---|
| FDFD | finite difference frequency domain, метод конечных разностей в частотной области |
| FDTD | finite difference time domain, метод конечных разностей во временной области |
| FEM | finite element method, метод конечных элементов |
| FIT | finite integration technique, метод конечных интегралов |
| FMM | fast multipole method, быстрый метод многополюсника |
| FVTD | finite volume time-domain, метод конечных объёмов во временной области |
| MLFMA | multilevel fast multipole algorithm, многоуровневый быстрый алгоритм многополюсника |
| MoM | method of moments, метод моментов |
| MSTM | multiple sphere T-Matrix, метод Т-матриц для множества сфер |
| PSTD | pseudospectral time domain method, псевдоспектральный метод во временной области |
| TLM | transmission line matrix method, метод матриц линий передач |

Словарь терминов

TeX - Система компьютерной вёрстки, разработанная американским профессором информатики Дональдом Кнутом

Панграмма - Короткий текст, использующий все или почти все буквы алфавита

Список литературы

1. Черенков П.А. Видимое свечение чистых жидкостей под действием γ -радиации // *ДАН СССР*. — 1934. — Т. 2, № 8. — С. 451–454.
2. Вавилов С.И. О возможных причинах синего γ -свечения жидкостей // *ДАН СССР*. — 1934. — Т. 2, № 8. — С. 457–461.
3. Тамм И.Е., Франк И.М. Когерентное излучение быстрого электрона в среде // *ДАН СССР*. — 1937. — Т. 14, № 3. — С. 107–112.
4. Черенков П.А. Излучение частиц сверхсветовой скорости и некоторые применения этого излучения в экспериментальной физике // *УФН*. — 1959. — Т. 68, № 7. — С. 377–386.
5. Тамм И.Е. Общие свойства излучения, испускаемого системами, движущимися со сверхсветовыми скоростями, и некоторые приложения к физике плазмы // *УФН*. — 1959. — Т. 68, № 7. — С. 387–396.
6. Франк И.М. Оптика источников света, движущихся в преломляющих средах // *УФН*. — 1959. — Т. 68, № 7. — С. 397–415.

Список рисунков

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | TeX. | 22 |
| 2.2 | Очень длинная подпись к изображению, на котором представлены две фотографии Дональда Кнута | 22 |
| 2.3 | Этот текст попадает в названия рисунков в списке рисунков | 23 |

Список таблиц

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Название таблицы | 31 |
| 2 | | 31 |
| 3 | Наименование таблицы, очень длинное наименование таблицы, чтобы посмотреть как оно будет располагаться на нескольких строках и переноситься | 31 |
| 4 | Нэ про натюм фюйзчит квюальизквюэ | 32 |
| 5 | Любя, съешь щипцы, — вздохнёт мэр, — кайф жгуч | 34 |
| 6 | Наименование таблицы средней длины | 50 |
| 7 | Тестовые функции для оптимизации, D — размерность. Для всех функций значение в точке глобального минимума равно нулю. | 55 |
| 8 | Длинная таблица с примером чересстрочного форматирования | 58 |

Приложение А

Примеры вставки листингов программного кода

Для крупных листингов есть два способа. Первый красивый, но в нём могут быть проблемы с поддержкой кириллицы (у вас может встречаться в комментариях и печатаемых сообщениях), он представлен на листинге [A.1](#). Второй

Листинг A.1 Программа “Hello, world” на C++

```

5  #include <iostream>
    using namespace std;

    int main() //кириллица в комментариях при xelatex и luaLatex и
        мееет проблемы с пробелами
    {
        cout << "Hello, world" << endl; //latin letters in
            commentaries
        system("pause");
        return 0;
10 }

```

не такой красивый, но без ограничений (см. листинг [A.2](#)).

Листинг A.2 Программа “Hello, world” без подсветки

```

#include <iostream>
using namespace std;

int main() //кириллица в комментариях
{
    cout << "Привет, мир" << endl;
}

```

Можно использовать первый для вставки небольших фрагментов внутри текста, а второй для вставки полного кода в приложении, если таковое имеется.

Если нужно вставить совсем короткий пример кода (одна или две строки), то выделение линейками и нумерация может смотреться чересчур громоздко. В таких случаях можно использовать окружения `lstlisting` или `Verb` без

`ListingEnv`. Приведём такой пример с указанием языка программирования, отличного от заданного по умолчанию:

```
|fibs = 0 : 1 : zipWith (+) fibs (tail fibs)
```

Такое решение — со вставкой нумерованных листингов покрупнее и вставок без выделения для маленьких фрагментов — выбрано, например, в книге Эндрю Таненбаума и Тодда Остина по архитектуре

Наконец, для оформления идентификаторов внутри строк (функция `main` и тому подобное) используется `lstinline` или, самое простое, моноширинный текст (`\texttt`).

Пример [A.3](#), иллюстрирующий подключение переопределённого языка. Может быть полезным, если подсветка кода работает криво. Без дополнительного окружения, с подписью и ссылкой, реализованной встроенным средством.

Листинг A.3 Пример листинга с подписью собственными средствами

```
## Caching the Inverse of a Matrix

## Matrix inversion is usually a costly computation and there
## may be some
5 ## benefit to caching the inverse of a matrix rather than
## compute it repeatedly
## This is a pair of functions that cache the inverse of a
## matrix.

## makeCacheMatrix creates a special "matrix" object that can
## cache its inverse

10 makeCacheMatrix <- function(x = matrix()) {#кириллица в коммента
    риях при xelatex и lualatex имеет проблемы с пробелами
    i <- NULL
    set <- function(y) {
        x <- y
        i <- NULL
15    }
    get <- function() x
    setSolved <- function(solve) i <- solve
    getSolved <- function() i
    list(set = set, get = get,
20    setSolved = setSolved,
    getSolved = getSolved)
}
```

```

25  ## cacheSolve computes the inverse of the special "matrix"
    ## returned by
    ## makeCacheMatrix above. If the inverse has already been
    ## calculated (and the
    ## matrix has not changed), then the cachesolve should retrieve
    ## the inverse from
    ## the cache.
30
cacheSolve <- function(x, ...) {
    ## Return a matrix that is the inverse of 'x'
    i <- x$getSolved()
    if(!is.null(i)) {
35        message("getting cached data")
        return(i)
    }
    data <- x$get()
    i <- solve(data, ...)
40    x$setSolved(i)
    i
}

```

Листинг A.4 подгружается из внешнего файла. Приходится загружать без окружения дополнительного. Иначе по страницам не переносится.

Листинг A.4 Листинг из внешнего файла

```

# Analysis of data on Course Project at Getting and Cleaning
# data course of Data Science track at Coursera.

# Part 1. Merges the training and the test sets to create one
# data set.
5 # 3. Uses descriptive activity names to name the activities in
  # the data set
# 4. Appropriately labels the data set with descriptive variable
  # names.

if (!file.exists("UCI HAR Dataset")) {
    stop("You need 'UCI HAR Dataset' folder full of data")
10 }

library(plyr) # for mapvalues

```

```

15 #getting common data
features <- read.csv("UCI HAR Dataset/features.txt", sep=" ",
  header = FALSE,
                        colClasses = c("numeric", "character"))
activity_labels <- read.csv("UCI HAR Dataset/activity_labels.txt",
  ", sep=",
20                        header = FALSE, colClasses = c("
                        numeric", "character"))

#getting train set data
subject_train <- read.csv("UCI HAR Dataset/train/subject_train.
  txt",
                        header = FALSE, colClasses = "numeric",
                        col.names="Subject")
25 y_train <- read.csv("UCI HAR Dataset/train/y_train.txt", header
  = FALSE,
                        colClasses = "numeric")
x_train <- read.csv("UCI HAR Dataset/train/X_train.txt", sep="",
  header = FALSE,
                        colClasses = "numeric", col.names=features$V2
                        , check.names = FALSE)

30 activity_train <- as.data.frame(mapvalues(y_train$V1, from =
  activity_labels$V1,
                        to = activity_labels$
                        V2))
names(activity_train) <- "Activity"

35 #getting test set data
subject_test <- read.csv("UCI HAR Dataset/test/subject_test.txt"
  ,
                        header = FALSE, colClasses = "numeric",
                        col.names="Subject")
y_test <- read.csv("UCI HAR Dataset/test/y_test.txt", header =
  FALSE,
40                        colClasses = "numeric")
x_test <- read.csv("UCI HAR Dataset/test/X_test.txt", sep="",
  header = FALSE,
                        colClasses = "numeric", col.names=features$V2,
                        check.names = FALSE)

```

```

activity_test <- as.data.frame(mapvalues(y_test$V1, from =
  activity_labels$V1,
45                                     to = activity_labels$V2
                                     ))
names(activity_test) <- "Activity"

# Forming full dataframe
50 data_train <- cbind(x_train, subject_train, activity_train)
  data_test <- cbind(x_test, subject_test, activity_test)
  data <- rbind(data_train, data_test)

# Cleaning memory
55 rm(features, activity_labels, subject_train, y_train, x_train,
      activity_train,
      subject_test, y_test, x_test, activity_test, data_train, data
      _test)

# Part 2. Extracts only the measurements on the mean and
  standard deviation for each measurement.
60 cols2match <- grep("(mean|std)", names(data))

# Excluded gravityMean, tBodyAccMean, tBodyAccJerkMean,
  tBodyGyroMean,
# tBodyGyroJerkMean, as these represent derivations of angle
data, as
65 # opposed to the original feature vector.

# Subsetting data frame, also moving last columns to be first
Subsetted_data_frame <- data[, c(562, 563, cols2match)]

70 # Part 5. From the data set in step 4, creates a second,
independent tidy data set
# with the average of each variable for each activity and each
subject.

library(dplyr) # for %>% and summarise_each
75

```

```
tidydata <- Subsetted_data_frame %>% group_by(Subject,Activity)
  %>%
    summarise_each(funs(mean))

write.table(tidydata, "tidydata.txt", row.names=FALSE)
```

Приложение Б

Очень длинное название второго приложения, в котором продемонстрирована работа с длинными таблицами

Б.1 Подраздел приложения

Вот размещается длинная таблица:

| Параметр | Умолч. | Тип | Описание |
|----------|--------|-----|---|
| &INP | | | |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) |

продолжение следует

| (продолжение) | | | |
|---------------|---------------------|-----|---|
| Параметр | Умолч. | Тип | Описание |
| mars | 0 | int | 1: генерация белого шума |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| mars | | 0 | int |
| | kick | 1 | int |
| &SURFPAR | | | |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) |
| | mars | 0 | int |
| kick | | 1 | int |
| | mars | 0 | int |
| kick | | 1 | int |
| | mars | 0 | int |
| kick | | 1 | int |
| | mars | 0 | int |
| kick | | 1 | int |
| | mars | 0 | int |
| kick | | 1 | int |
| | mars | 0 | int |
| kick | | 1 | int |
| | mars | 0 | int |
| kick | | 1 | int |
| | продолжение следует | | |

продолжение следует

| (продолжение) | | | |
|---------------|--------|-----|---|
| Параметр | Умолч. | Тип | Описание |
| mars kick | 0 | int | 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| | 1 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс 0: инициализация без шума ($p_s = const$) |
| mars kick | 0 | int | 1: генерация белого шума |
| | 1 | int | 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars kick | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) |
| mars kick | 0 | int | 1: генерация белого шума |
| | 1 | int | 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars kick | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) |
| mars kick | 0 | int | 1: генерация белого шума |
| | 1 | int | 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |

Б.2 Ещё один подраздел приложения

Нужно больше подразделов приложения! Конвынёры витюпырата но нам, тебиквьюэ мэнтётюм позтюлант ед про. Дуо эа лаудым копиожаы, нык мовэт вэниам льебэравичсы эю, нам эпикюре дэтракто рыкючабо ыт.

Пример длинной таблицы с записью продолжения по ГОСТ 2.105:

Таблица 6 — Наименование таблицы средней длины

| Параметр | Умолч. | Тип | Описание |
|--------------|--------|-----|--|
| &INP | | | |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) |
| | | | 1: генерация белого шума |
| mars kick | 0 | int | 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| | 1 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| mars kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) |
| | | | 1: генерация белого шума |
| mars kick | 1 | int | 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| | | | 1: инициализация модели для планеты Марс |

Продолжение таблицы 6

| Параметр | Умолч. | Тип | Описание |
|----------|--------|-----|---|
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |

Продолжение таблицы 6

| Параметр | Умолч. | Тип | Описание |
|----------|--------|-----|---|
| mars | 0 | int | экватора 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| &SURFPAR | | | |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) |

Продолжение таблицы 6

| Параметр | Умолч. | Тип | Описание |
|----------|--------|-----|---|
| | | | 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |
| kick | 1 | int | 0: инициализация без шума ($p_s = const$) 1: генерация белого шума 2: генерация белого шума симметрично относительно экватора |
| mars | 0 | int | 1: инициализация модели для планеты Марс |

Б.3 Использование длинных таблиц с окружением *longtabu*

В таблице 7 более книжный вариант длинной таблицы, используя окружение `longtabu` и разнообразные `toprule` `midrule` `bottomrule` из пакета `booktabs`. Чтобы визуально таблица смотрелась лучше, можно использовать следующие параметры: в самом начале задаётся расстояние между строчками с помощью `arraystretch`. Таблица задаётся на всю ширину, `longtabu` позволяет делить ширину колонок пропорционально — тут три колонки в пропорции 1.1:1:4 — для каждой колонки первый параметр в описании `X[]`. Кроме того, в таблице убраны отступы слева и справа с помощью `@{}` в преамбуле таблицы. К первому и второму столбцу применяется модификатор

`>\setlength{\baselineskip}{0.7\baselineskip}`,

который уменьшает межстрочный интервал в для текста таблиц (иначе заголовок второго столбца значительно шире, а двухстрочное имя сливается с окружающими). Для первой и второй колонки текст в ячейках выравнивается по центру как по вертикали, так и по горизонтали - задаётся буквами `m` и `c` в описании столбца `X[]`.

Так как формулы большие — используется окружение `alignedat`, чтобы отступ был одинаковый у всех формул — он сделан для всех, хотя для большей части можно было и не использовать. Чтобы формулы занимали поменьше места в каждом столбце формулы (где надо) используется `\textstyle` — он делает дроби меньше, у знаков суммы и произведения — индексы сбоку. Иногда формулы слишком большая, сливается со следующей, поэтому после неё ставится небольшой дополнительный отступ `\vspace*{2ex}`. Для штрафных функций — размер фигурных скобок задан вручную `\Big\{`, т.к. не умеет `alignedat` работать с `\left` и `\right` через несколько строк/колонок.

В примечании к таблице наоборот, окружение `cases` даёт слишком большие промежутки между вариантами, чтобы их уменьшить, в конце каждой строчки окружения использовался отрицательный дополнительный отступ `\[-0.5em]`.

Таблица 7 — Тестовые функции для оптимизации, D — размерность. Для всех функций значение в точке глобального минимума равно нулю.

| Имя | Стартовый диапазон параметров | Функция |
|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| сфера | $[-100, 100]^D$ | $f_1(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2$ |
| Schwefel 2.22 | $[-10, 10]^D$ | $f_2(x) = \sum_{i=1}^D x_i + \prod_{i=1}^D x_i $ |
| Schwefel 1.2 | $[-100, 100]^D$ | $f_3(x) = \sum_{i=1}^D \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$ |
| Schwefel 2.21 | $[-100, 100]^D$ | $f_4(x) = \max_i \{ x_i \}$ |
| Rosenbrock | $[-30, 30]^D$ | $f_5(x) = \sum_{i=1}^{D-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right]$ |
| ступенчатая | $[-100, 100]^D$ | $f_6(x) = \sum_{i=1}^D \lfloor x_i + 0.5 \rfloor^2$ |
| зашумлённая квартическая | $[-1.28, 1.28]^D$ | $f_7(x) = \sum_{i=1}^D ix_i^4 + rand[0,1)$ |
| Schwefel 2.26 | $[-500, 500]^D$ | $f_8(x) = \sum_{i=1}^D -x_i \sin \sqrt{ x_i } +$ $+ D \cdot 418.98288727243369$ |
| Rastrigin | $[-5.12, 5.12]^D$ | $f_9(x) = \sum_{i=1}^D [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$ |
| Ackley | $[-32, 32]^D$ | $f_{10}(x) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_i^2} \right) -$ $-\exp \left(\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + e$ |
| Griewank | $[-600, 600]^D$ | $f_{11}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^D x_i^2 - \prod_{i=1}^D \cos(x_i/\sqrt{i}) + 1$ |
| штрафная 1 | $[-50, 50]^D$ | $f_{12}(x) = \frac{\pi}{D} \left\{ 10 \sin^2(\pi y_1) + \right.$ $\left. + \sum_{i=1}^{D-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + \right.$ $\left. + (y_D - 1)^2 \right\} + \sum_{i=1}^D u(x_i, 10, 100, 4)$ |

продолжение следует

(продолжение)

| Имя | Стартовый диапазон параметров | Функция |
|---------------------------|-------------------------------------|--|
| штрафная 2 | $[-50, 50]^D$ | $f_{13}(x) = 0.1 \left\{ \sin^2(3\pi x_1) + \right.$ $+ \sum_{i=1}^{D-1} (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_{i+1})] +$ $+ (x_D - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_D)] \left. \right\} +$ $+ \sum_{i=1}^D u(x_i, 5, 100, 4)$ |
| сфера | $[-100, 100]^D$ | $f_1(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2$ |
| Schwefel 2.22 | $[-10, 10]^D$ | $f_2(x) = \sum_{i=1}^D x_i + \prod_{i=1}^D x_i $ |
| Schwefel 1.2 | $[-100, 100]^D$ | $f_3(x) = \sum_{i=1}^D \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$ |
| Schwefel 2.21 | $[-100, 100]^D$ | $f_4(x) = \max_i \{ x_i \}$ |
| Rosenbrock | $[-30, 30]^D$ | $f_5(x) = \sum_{i=1}^{D-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right]$ |
| ступенчатая | $[-100, 100]^D$ | $f_6(x) = \sum_{i=1}^D \lfloor x_i + 0.5 \rfloor^2$ |
| зашумлённая квартичная | $[-1.28, 1.28]^D$ | $f_7(x) = \sum_{i=1}^D i x_i^4 + rand[0, 1)$ |
| Schwefel 2.26 | $[-500, 500]^D$ | $f_8(x) = \sum_{i=1}^D -x_i \sin \sqrt{ x_i } +$ $+ D \cdot 418.98288727243369$ |
| Rastrigin | $[-5.12, 5.12]^D$ | $f_9(x) = \sum_{i=1}^D [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$ |
| Ackley | $[-32, 32]^D$ | $f_{10}(x) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_i^2} \right) -$ $- \exp \left(\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + e$ |
| Griewank | $[-600, 600]^D$ | $f_{11}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^D x_i^2 - \prod_{i=1}^D \cos(x_i / \sqrt{i}) + 1$ |

продолжение следует

(окончание)

| Имя | Стартовый диапазон параметров | Функция |
|---|-------------------------------------|---|
| штрафная 1 | $[-50, 50]^D$ | $f_{12}(x) = \frac{\pi}{D} \left\{ 10 \sin^2(\pi y_1) + \right.$ $\left. + \sum_{i=1}^{D-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + \right.$ $\left. + (y_D - 1)^2 \right\} + \sum_{i=1}^D u(x_i, 10, 100, 4)$ |
| штрафная 2 | $[-50, 50]^D$ | $f_{13}(x) = 0.1 \left\{ \sin^2(3\pi x_1) + \right.$ $\left. + \sum_{i=1}^{D-1} (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_{i+1})] + \right.$ $\left. + (x_D - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_D)] \right\} +$ $+ \sum_{i=1}^D u(x_i, 5, 100, 4)$ |
| Примечание — Для функций f_{12} и f_{13} используется $y_i = 1 + \frac{1}{4}(x_i + 1)$ и $u(x_i, a, k, m) = \begin{cases} k(x_i - a)^m, & x_i > a \\ 0, & -a \leq x_i \leq a \\ k(-x_i - a)^m, & x_i < -a \end{cases}$ | | |

Б.4 Форматирование внутри таблиц

В таблице 8 пример с чересстрочным форматированием. В `userstyles.tex` задаётся счётчик `\newcounter{rowcnt}` который увеличивается на 1 после каждой строчки (как указано в преамбуле таблицы). Кроме того, задаётся условный макрос `\altshape` который выдаёт одно из двух типов форматирования в зависимости от чётности счётчика.

В таблице 8 каждая чётная строчка — синяя, нечётная — с наклоном и слегка поднята вверх. Визуально это приводит к тому, что среднее значение и среднеквадратичное изменение группируются и хорошо выделяются взглядом в таблице. Сохраняется возможность отдельные значения в таблице выделить цветом или шрифтом. К первому и второму столбцу форматирование не применяется

по сути таблицы, к шестому общее форматирование не применяется для наглядности.

Так как заголовок таблицы тоже считается за строчку, то перед ним (для первого, промежуточного и финального варианта) счётчик обнуляется, а в `\altshape` для нулевого значения счётчика форматирования не применяется.

Таблица 8 — Длинная таблица с примером чересстрочного форматирования

| | Итерации | JADE++ | JADE | jDE | SaDE | DE/rand /1/bin | PSO |
|-----|----------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| f1 | 1500 | 1.8E-60 (8.4E-60) | 1.3E-54 (9.2E-54) | 2.5E-28 (3.5E-28) | 4.5E-20 (6.9E-20) | 9.8E-14 (8.4E-14) | 9.6E-42 (2.7E-41) |
| f2 | 2000 | 1.8E-25 (8.8E-25) | 3.9E-22 (2.7E-21) | 1.5E-23 (1.0E-23) | 1.9E-14 (1.1E-14) | 1.6E-09 (1.1E-09) | 9.3E-21 (6.3E-20) |
| f3 | 5000 | 5.7E-61 (2.7E-60) | 6.0E-87 (1.9E-86) | 5.2E-14 (1.1E-13) | 9.0E-37 (5.4E-36) | 6.6E-11 (8.8E-11) | 2.5E-19 (3.9E-19) |
| f4 | 5000 | 8.2E-24 (4.0E-23) | 4.3E-66 (1.2E-65) | 1.4E-15 (1.0E-15) | 7.4E-11 (1.8E-10) | 4.2E-01 (1.1E+00) | 4.4E-14 (9.3E-14) |
| f5 | 3000 | 8.0E-02 (5.6E-01) | 3.2E-01 (1.1E+00) | 1.3E+01 (1.4E+01) | 2.1E+01 (7.8E+00) | 2.1E+00 (1.5E+00) | 2.5E+01 (3.2E+01) |
| f6 | 100 | 2.9E+00 (1.2E+00) | 5.6E+00 (1.6E+00) | 1.0E+03 (2.2E+02) | 9.3E+02 (1.8E+02) | 4.7E+03 (1.1E+03) | 4.5E+01 (2.4E+01) |
| f7 | 3000 | 6.4E-04 (2.5E-04) | 6.8E-04 (2.5E-04) | 3.3E-03 (8.5E-04) | 4.8E-03 (1.2E-03) | 4.7E-03 (1.2E-03) | 2.5E-03 (1.4E-03) |
| f8 | 1000 | 3.3E-05 (2.3E-05) | 7.1E+00 (2.8E+01) | 7.9E-11 (1.3E-10) | 4.7E+00 (3.3E+01) | 5.9E+03 (1.1E+03) | 2.4E+03 (6.7E+02) |
| f9 | 1000 | 1.0E-04 (6.0E-05) | 1.4E-04 (6.5E-05) | 1.5E-04 (2.0E-04) | 1.2E-03 (6.5E-04) | 1.8E+02 (1.3E+01) | 5.2E+01 (1.6E+01) |
| f10 | 500 | 8.2E-10 (6.9E-10) | 3.0E-09 (2.2E-09) | 3.5E-04 (1.0E-04) | 2.7E-03 (5.1E-04) | 1.1E-01 (3.9E-02) | 4.6E-01 (6.6E-01) |
| f11 | 500 | 9.9E-08 (6.0E-07) | 2.0E-04 (1.4E-03) | 1.9E-05 (5.8E-05) | 7.8E-04 (1.2E-03) | 2.0E-01 (1.1E-01) | 1.3E-02 (1.7E-02) |
| f12 | 500 | 4.6E-17 (1.9E-16) | 3.8E-16 (8.3E-16) | 1.6E-07 (1.5E-07) | 1.9E-05 (9.2E-06) | 1.2E-02 (1.0E-02) | 1.9E-01 (3.9E-01) |
| f13 | 500 | 2.0E-16 (6.5E-16) | 1.2E-15 (2.8E-15) | 1.5E-06 (9.8E-07) | 6.1E-05 (2.0E-05) | 7.5E-02 (3.8E-02) | 2.9E-03 (4.8E-03) |

продолжение следует

(окончание)

| | | Итерации | JADE++ | JADE | jDE | SaDE | DE/rand /1/bin | PSO |
|-----|------|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| f1 | 1500 | | 1.8E-60 (8.4E-60) | 1.3E-54 (9.2E-54) | 2.5E-28 (3.5E-28) | 4.5E-20 (6.9E-20) | 9.8E-14 (8.4E-14) | 9.6E-42 (2.7E-41) |
| f2 | 2000 | | 1.8E-25 (8.8E-25) | 3.9E-22 (2.7E-21) | 1.5E-23 (1.0E-23) | 1.9E-14 (1.1E-14) | 1.6E-09 (1.1E-09) | 9.3E-21 (6.3E-20) |
| f3 | 5000 | | 5.7E-61 (2.7E-60) | 6.0E-87 (1.9E-86) | 5.2E-14 (1.1E-13) | 9.0E-37 (5.4E-36) | 6.6E-11 (8.8E-11) | 2.5E-19 (3.9E-19) |
| f4 | 5000 | | 8.2E-24 (4.0E-23) | 4.3E-66 (1.2E-65) | 1.4E-15 (1.0E-15) | 7.4E-11 (1.8E-10) | 4.2E-01 (1.1E+00) | 4.4E-14 (9.3E-14) |
| f5 | 3000 | | 8.0E-02 (5.6E-01) | 3.2E-01 (1.1E+00) | 1.3E+01 (1.4E+01) | 2.1E+01 (7.8E+00) | 2.1E+00 (1.5E+00) | 2.5E+01 (3.2E+01) |
| f6 | 100 | | 2.9E+00 (1.2E+00) | 5.6E+00 (1.6E+00) | 1.0E+03 (2.2E+02) | 9.3E+02 (1.8E+02) | 4.7E+03 (1.1E+03) | 4.5E+01 (2.4E+01) |
| f7 | 3000 | | 6.4E-04 (2.5E-04) | 6.8E-04 (2.5E-04) | 3.3E-03 (8.5E-04) | 4.8E-03 (1.2E-03) | 4.7E-03 (1.2E-03) | 2.5E-03 (1.4E-03) |
| f8 | 1000 | | 3.3E-05 (2.3E-05) | 7.1E+00 (2.8E+01) | 7.9E-11 (1.3E-10) | 4.7E+00 (3.3E+01) | 5.9E+03 (1.1E+03) | 2.4E+03 (6.7E+02) |
| f9 | 1000 | | 1.0E-04 (6.0E-05) | 1.4E-04 (6.5E-05) | 1.5E-04 (2.0E-04) | 1.2E-03 (6.5E-04) | 1.8E+02 (1.3E+01) | 5.2E+01 (1.6E+01) |
| f10 | 500 | | 8.2E-10 (6.9E-10) | 3.0E-09 (2.2E-09) | 3.5E-04 (1.0E-04) | 2.7E-03 (5.1E-04) | 1.1E-01 (3.9E-02) | 4.6E-01 (6.6E-01) |
| f11 | 500 | | 9.9E-08 (6.0E-07) | 2.0E-04 (1.4E-03) | 1.9E-05 (5.8E-05) | 7.8E-04 (1.2E-03) | 2.0E-01 (1.1E-01) | 1.3E-02 (1.7E-02) |
| f12 | 500 | | 4.6E-17 (1.9E-16) | 3.8E-16 (8.3E-16) | 1.6E-07 (1.5E-07) | 1.9E-05 (9.2E-06) | 1.2E-02 (1.0E-02) | 1.9E-01 (3.9E-01) |
| f13 | 500 | | 2.0E-16 (6.5E-16) | 1.2E-15 (2.8E-15) | 1.5E-06 (9.8E-07) | 6.1E-05 (2.0E-05) | 7.5E-02 (3.8E-02) | 2.9E-03 (4.8E-03) |

Б.5 Очередной подраздел приложения

Нужно больше подразделов приложения!

Б.6 И ещё один подраздел приложения

Нужно больше подразделов приложения!