

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԵՐ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Բուստյան Վիտալի Գեորգիի

ՄԱՍՆԱԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԱՍՊԵՐՏԱՆՈՒԹՅԱՆ  
ԳՐԱԳՆԱԾՈՒՄՆԵՐԸ ՈՇՈՒՍԱՏՈՐՆԵՐՈՒՄ ԵՎ ԱՆԹԵՍԱՐՆԵՐՈՒՄ

U.04.20 Վերականգնողական մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացող զարկի  
մեթոդները մասնագիտությամբ ֆիզիկա մագնիսադինամիկական ճառագայթների  
բեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման արժեքի թուղթը

ԱՆՂԱՍԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ - 2003

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кочарян Виталий Генрихович

СИНХРОТРОННОЕ, ПЕРЕХОДНОЕ И ЧЕРЕНКОВСКОЕ  
ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЗОНАТОРАХ И ВОЛНОВОДАХ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 01.04.20  
"Физика пучков заряженных частиц и ускорительная  
физика"

ЕРЕВАН - 2003

Ереванский физический институт  
№ 1  
01.04.20

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում

Գիտական ղեկավար՝ ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր  
Է.Ղ. Գազազյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆիզմաթ. գիտությունների դոկտոր  
Կ.Ա. Իսախոյան (ԵրՖԻ)  
ֆիզմաթ. գիտությունների թեկնածու  
Բ.Վ. Խաչատրյան (ԵՊՀ)  
Գ.Գ. ԳՍԱ Ուղղիտֆիզիկայի և  
էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ,  
(ք. Վշտարակ, 33)

Առաջատար կազմակերպություն՝

Պաշտպանությունը կայանալու է « 18 » նոյեմբերի 2003թ. ժամը 14.00 - ին Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում գործող ԲՊՀ-ի 024 մասնագիտական խորհրդում (Երևան -36, Ալիխանյան եղբ. փ.2)

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵրՖԻ-ի գրադարանում:  
Անդամագիրը առաքված է « 18 » հոկտեմբերի 2003 թ.

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար ֆ.մ. գ.թ. Ա.Թ. Սարգսյան

ТЕМА ДИССЕРТАЦИИ УТВЕРЖДЕНА В ЕРЕВАНСКОМ ФИЗИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

Научный руководитель: ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ  
НАУК ГАЗАЗЯН Э.Д.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ  
НАУК ИСПИРЯН К.А. (ЕРФИ)  
КАНДИДАТ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ  
НАУК ХАЧАТРЯН Б.В. (ЕГУ)

Ведущая организация: ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И  
ЭЛЕКТРОНИКИ НАН РА (Г. АШТАРАК РА)

ЗАЩИТА СОСТОИТСЯ « 18 » НОЯБРЯ 2003 Г. В 14.00 ЧАСОВ НА ЗАСЕДАНИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА 024 ВАК В ЕРЕВАНСКОМ ФИЗИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ (ЕРЕВАН - 36, УЛ. БРАТЬЕВ АЛИХАНИЯ 2)

С ДИССЕРТАЦИЕЙ МОЖНО ОЗНАКОМИТЬСЯ В БИБЛИОТЕКЕ ЕРФИ  
АВТОРЕФЕРАТ РАЗОСЛАН « 18 » ОКТЯБРЯ 2003Г.

Ученый секретарь совета  
К.Ф.-М.Н. А.Т. МАРГАРЯН

Актуальность темы

Поиск модели высокоградиентного ускорителя, разработка новых методов ускорения и новых конструкций для высокоградиентного ускорения остаются актуальными темами исследований в ускорительной физике наших дней. Для дальнейшего развития теории лептонов и кварков требуются TeV-ные энергии в центре масс электрон-электронных и электрон-позитронных взаимодействий [1]. При этом ускорительная физика и инженерия сегодня используют сверхпроводящие ускоряющие модули с традиционными методами возбуждения полей, позволяющими получать темп ускорения 25-50MeV/m. Приоритетным продолжает оставаться использование ускорителей для решения прикладных проблем физики. Следует особо отметить, что немаловажное значение для достижения заданных параметров ускорителя уделяется системе контроля ускорителя [2], позволяющей производить как сложные диагностические настройки [3], так и предоставляющей возможность запуска ускорителя с одной "кнопки" [4]. Актуальными проблемами системы контроля ускорителя являются осуществление оптимальной диагностики пучка [5] и поддержка различных компьютерных платформ [6].

Для получения мощных высокоградиентных ускоряющих полей и максимальных темпов ускорения теоретические исследования в ускорительной физике предлагают использование лазерных методов, двухпучковых схем, а также диэлектрических структур. В числе интересных моделей для лазерных методов ускорения необходимо отметить работы, опубликованные А.М.Сесслером [7] и Амадуни А.Ц. [8]. Оригинальные схемы двухпучкового ускорения предлагались группой Т.Вайланда [9] и Барсукова К.А.[10]. Некоторые схемы двухпучкового ускорения, предлагаемые группой Газазяна Э.Д. [11], исследованы во второй главе с помощью пакета PDE (Partial Differential Equation) Matlab-a. Огромная работа как по теоретическому исследованию, так и по проведению экспериментов по двухпучковому ускорению в диэлектрических структурах проведена группой, возглавляемой Р.Б.Пальмером [12].

## Научная новизна

1. Получены аналитические разложения для собственных чисел и собственных функций тороидов с прямоугольным и круглым поперечными сечениями, обеспечивающие высокие точности при простых полиномиальных вычислениях.

2. Исследованы свойства синхротронного излучения, возбуждаемого в тороиде с круглым поперечным сечением при вращении в нем заряженной частицы, и развит метод определения вынужденных электромагнитных колебаний, когда сгусток заряженных частиц движется вдоль окружности с радиусом, совпадающим с средним радиусом тороида, основанный на разложении возбуждающих колебаний тока по определяемым собственным функциям.

3. Проведенная оптимизация размеров цилиндрического резонатора по максимуму напряженности продольной составляющей электрического поля за время пролета возбуждающих и ускоряемого сгустков позволяет использовать его в качестве ускоряющей структуры в схеме двухпучкового ускорения с совмещенными траекториями ведущих и ведомого сгустков.

4. Предложен алгоритм нахождения возбуждаемых сгустками заряженных частиц полей переходного излучения в регулярном резонаторе с произвольным поперечным сечением. Получены выражения для различных распределений заряда в сгустке.

5. Разработан и использован алгоритм проектирования схем двухпучкового ускорения, базирующийся на методе собственных функций и методе конечных элементов. Приведены варианты результатов для различных конфигураций билиндрических и пентацилиндрических резонаторов.

6. Приведены критерии оптимизации и выбора схемы ускорения на базе черенковского излучения в волноводе, заполненном диэлектриком с прорезанным каналом при возбуждении последнего последовательностью сгустков. Разработан численный метод исследования влияния неравномерности движения сгустков на эффект генерации излучения Вавилова-Черенкова.

## В диссертации выдвинуты и обоснованы тезисы:

- Разработанная методом сочетания МПП и FEM теория тороидальных резонаторов позволяет исследовать электромагнитные свойства этих резонаторов, рассчитать их параметры с высокой точностью, а также рассмотреть синхротронное и переходное излучения, генерируемые сгустками заряженных частиц, вращающихся по среднему радиусу тороида.
- Наличие среды в тороиде приводит к резкому увеличению амплитуды электромагнитных колебаний, обусловленному интерференцией между синхротронным и собственными тороидальными колебаниями.
- Возбуждение резонаторных структур переходным излучением последовательности сгустков обеспечивает высокие темпы в двухпучковой схеме ускорения, поэтому их можно использовать в качестве высокоградиентных ускоряющих модулей.
- Использование пентацилиндрического резонатора в схемах двухпучкового ускорения является одной из перспективных моделей высокоградиентного ускорения, включающей в себя возможность объединения в единое целое резонаторы клистронов с ускоряющей ячейкой.
- Черенковское излучение, возбужденное последовательностью сгустков в цилиндрическом волноводе, заполненном диэлектриком с прорезанным каналом, позволяет получать высокие темпы ускорения. При этом применение численных методов Matlab-а повышает эффективность получения новых результатов, представляющих практический и теоретический интерес.

## Апробация работы

Основные результаты диссертации изложены в пяти статьях, две из которых посланы в печать и пяти докладах на международных конференциях EPAC-94 [London, England, 1994], Linac - 94 [Tsukuba, Japan, 1994] и FEL-1999 [Hamburg, Germany, 1999], а также на семинарах подразделения MVP и MHF-p DESY и на семинарах лаборатории новых методов ускорения ЕрФИ.

Диссертация состоит из трех глав, введения и заключения. Объем диссертация – 150 страниц, включая 96 графиков и рисунков, 5 таблиц. Список литературы состоит из 54 наименований.

### Содержание работы

В первой главе диссертации предложен метод нахождения компонент электромагнитных полей и резонансных частот для тороидальных резонаторов как с прямоугольным поперечным сечением, так и для круглых тороидов. Известные решения, определяющие собственные электромагнитные колебания в тороидальных резонаторах, имеют ограниченную область применения [13]. Между тем, представляет несомненный интерес изучение всей картины поля со всеми возможными типами и модами колебаний, возникающими в тороидальном резонаторе при возбуждении его на заданной частоте и типе волны. С целью единого рассмотрения тороидов как с прямоугольным, так и с круглым поперечными сечениями предлагается метод последовательных приближений (МПП) [14], позволяющий с достаточно высокой точностью определить компоненты электромагнитных полей и резонансных частот этих резонаторов. Выбор локальных систем координат позволил выделить параметр малости и представить решение граничной задачи на собственные функции и собственные значения в виде разложений по этому параметру. Наличие строгих решений для тороида с прямоугольным поперечным сечением позволило проконтролировать точность и строгость получаемых решений и распространить это на круглый тороид [15,16]. Следует отметить, что полученные разложения позволяют избежать решения трансцендентных уравнений со специальными функциями для тороида с прямоугольным поперечным сечением при определении коаксиальных резонансных частот. Оценка точности для собственных значений круглого тороида, проведенная численным методом конечных элементов FEM, показала, что погрешность разложений для собственных функций и собственных значений не превышает 2% для тороидов, имеющих кривизну вплоть до  $\rho_0 = 0.5$ . Численным методом проведена оценка добротностей для различных мод тороидальных резонаторов с круглым поперечным сечением,

которые, как и ожидалось, оказались меньше, чем для обычного цилиндрического резонатора с теми же размерами и из того же материала. Это объясняется искажением конфигурации электромагнитных полей и ростом потерь на стенках, обусловленных кривизной тороида.

Полученные разложения собственных функций и собственных значений для тороидальных резонаторов с круглым поперечным сечением позволяют оценить физические процессы, происходящие при возбуждении тороидальных мод синхротронным (циклотронным) излучением. Следует отметить, что в круглом тороиде при возбуждении током вращающейся по срединному радиусу частицы наблюдается суперпозиция синхротронного и переходного излучения, обусловленного конечным интервалом времени существования тока [17]. Разделение последних показало, что синхротронное излучение в замкнутом объеме тороида носит нерезонансный характер даже в случае, когда частота вращения источника излучения является субгармоникой одной из собственных частот. Этот эффект возникает из-за наличия пакета обратных волн, движущихся в противоположном направлении и гасящих излучение источника в точках  $\varphi = 0$  и  $\varphi = \pi$  при условии, что  $\varphi = 0$  - координата влёта заряженной частицы. Другими словами, пакет обратных волн приходит в точку встречи с пакетом, сопровождающим источник излучения волн, в противофазе. Эффект объясняется выбором целочисленных продольных волновых чисел, т.е. отбором собственных мод для тороидальных резонаторов с круглым поперечным сечением в виде резонансных стоячих волн. Наличие пакета волн, движущихся по направлению движения источника излучения, согласуется со свойствами синхротронного излучения, сосредоточенного в конусе с углом раstra  $\Delta\theta \sim \sqrt{1 - \beta^2}$  и распространяющегося по направлению движения источника.

Для того, чтобы синхротронное излучение генерировалось на частоте тороидальных мод, объем круглого тороида заполнялся диэлектрической средой с  $\varepsilon > 1$ . Это приводит к резкому увеличению амплитуды излучения, но характер синхротронного излучения продолжает носить нерезонансный характер, т.е. напряженность продольной компоненты электрического поля не зависит от числа оборотов частицы. Распределение же поля по

продольной координате  $\varphi$  представляет собой стоячую волну, когда частота вращения заряженной частицы есть субгармоника или совпадает с одной из собственных частот тороида. В заполненном диэлектриком  $\varepsilon > 1$  тороидальном резонаторе выбор целочисленных продольных собственных чисел находится в противоречии с условием возбуждения излучения Черенкова. В этом случае тороидальный резонатор с круглым поперечным сечением необходимо рассматривать как резонатор "бегущей волны", т.е. как изогнутый и замкнутый на себя цилиндрический волновод. Решается волновое уравнение для данной геометрии без дополнительных условий на продольные волновые числа. Однако, при этом следует принимать во внимание, что волноводные моды не являются резонансными. В настоящей работе цель исследования направлена на рассмотрение свойств излучений, которые возникают при вращении заряженной частицы и способны вызвать резонанс в объеме тороида. Учет последующих приближений в разложениях для собственных функций и значений позволит снять ограничения на выбор геометрии тороида. Это позволит оценить реальные величины возбуждаемых в тороиде полей с учетом асимметрий в их распределении.

Во второй главе рассматривается возбуждение резонаторов электронными сгустками, пересекающими объем резонатора. Когда сгусток заряженных частиц пересекает торец регулярного резонатора, то в объеме резонатора возбуждается переходное излучение, связанное с актами появления в объеме и исчезновения из объема резонатора источника возбуждения. В теоретических исследованиях переходного излучения, проведенных Гинзбургом В.Л., Франком И.М., Цытовием В.И. [18,19] для случая нормального пересечения зарядом границы вакуум - идеальный проводник в свободном пространстве, отмечался непрерывный спектр излучения, имеющий частотно-угловое распределение энергии. В замкнутом пространстве объемного резонатора возможно существование дискретного спектра частот, обусловленное тем, что поле занимает конечный объем. Это приводит к тому, что в установившемся режиме переходное излучение является суперпозицией собственных мод резонатора. Возбуждение резонаторов электронными сгустками с большим зарядом является предметом исследований многих авторов [20]. Это связано не в последнюю очередь с теми

возможностями, которые открываются в схемах кильватерного или двухпучкового ускорителя [21].

В этой главе разработан единый метод описания электромагнитных полей в регулярном резонаторе с произвольным поперечным сечением, а также вынужденных электромагнитных колебаний в таком резонаторе, возбуждаемых сгустком и последовательностью сгустков различных форм и с различным распределением заряда. Разработаны методы нахождения собственных функций и собственных значений резонаторов с произвольным сечением численным методом конечных элементов в Matlab-е с последующей подстановкой в аналитические выражения и последующим анализом временных зависимостей в возбуждаемых сгустком и последовательностью сгустков электромагнитных полях при пересечении им (ими) торцов регулярного резонатора. Выбор частоты следования последовательности сгустков равной или пропорциональной частоте одного из собственных колебаний резонатора приводит к существенному возрастанию напряженности поля на данной моде [22,23]. Напряженность поля, когда  $N$  сгустков пересекли резонатор,  $E_{z,m,l}(r,z,t) = NE_{z,m,l}^0(r,z,t)$ , т.е. возрастает в  $N$  раз при рассмотрении идеального резонатора. Этот эффект усиления одной моды при совпадении частоты следования с частотой одного из собственных колебаний резонатора позволяет не только оптимизировать резонатор на получение максимальной продольной составляющей электрического поля, но и упрощает расчет полей, поскольку дает возможность пренебречь вкладом остальных мод. Учет конечной добротности резонатора ограничивает число эффективно излучающих сгустков, и наблюдается эффект насыщения напряженности поля.

Здесь же проведена оптимизация размеров кругового цилиндрического резонатора по максимуму напряженности продольной составляющей электрического поля за время пролета ускоряемого сгустка. Сделанные оценки энергообмена между ведущим и ведомым сгустками подтверждают возможность использования цилиндрического резонатора в качестве ускоряющей структуры в схеме двухпучкового ускорения с совмещенными траекториями ведущего и ведомого сгустков. Полученные оптимальные продольные размеры кругового цилиндрического

резонатора оказываются верными и для резонатора с произвольным поперечным сечением, имеющего различные продольные размеры для различных цилиндров, как например, пентацилиндрический резонатор.

Большой интерес представляют схемы двухпучкового ускорения с разнесенными траекториями ведущего и ведомого сгустков с использованием несимметричных резонаторов. При использовании последовательности ведущих сгустков и выполнении резонансных условий возможен одномодовый режим возбуждения резонатора. Это обстоятельство позволяет использовать структуру из последовательности резонаторов со сложным поперечным сечением в качестве ускоряющей системы. Одним из параметров при выборе геометрии резонаторов является коэффициент трансформации поля, присущий данной геометрии (см., например [10]), который в двухпучковой ускорительной схеме определяется как отношение приобретаемой энергии ведомого сгустка к потерям ведущего сгустка. Надо особо оговорить, что введение коэффициента трансформации схемы с учетом величин весовых функций для разложений напряженности поля находится в полном согласии с законом сохранения электромагнитной энергии и выражает только эффективность схемы ускорения. В схемах с совмещенными траекториями точечных ведущих и ведомого сгустков он меньше или равен единице [24].

Для нахождения собственных функций и значений резонаторов со сложным поперечным сечением использовался интегрированный пакет PDE Matlab-a и FEMLAB, позволяющий решать граничные задачи на собственные значения методом конечных элементов (FEM). Получаемые при этом собственные функции ортогональны, но требовали дополнительной нормировки. Исследовались различные конфигурации бицилиндрических [25] и эллиптических резонаторов в поиске максимальных коэффициентов трансформации двухпучковой ускорительной схемы. Используя метод собственных функций, найдены общие выражения для полей, возбуждаемых переходным излучением в резонаторах со сложным поперечным сечением. Эти выражения позволяют оптимизировать размеры резонатора по максимуму напряженности продольной составляющей электрического поля и наблюдать изменения поля в резонаторах во времени. В целом полученные значения для одного резонатора, не умаляя общности, могут быть распространены на

цепочки слабосвязанных резонаторов, образующих ускоряющие модули.

Рассмотренные с помощью FEMLAB-a дисперсионные характеристики и распределение полей в пентацилиндрических моделях ускоряющих ячеек и в составленных из них модулей является первым этапом проектирования перспективной модели ускорителя. Выбор правильной ускорительной схемы позволяет не только получать высокие темпы ускорения, но и избежать вероятности пробоев (вторичной эмиссии электронов с поверхности проводника), так как при правильном выборе схемы ускоряемый сгусток способен существенно понижать возбужденное ускоряющее поле [26].

Сочетания аналитических выражений, полученных методом собственных функций с последующей интерполяцией результатов в узлах конечных элементов при решении численными методами граничной задачи на собственные значения для сложной области, позволяет найти не только распределение электромагнитных компонент поля, но и описать временную зависимость в этих полях. Все это открывает возможности проектирования реальных двухпучковых ускоряющих схем и проведение оптимизации последних для получения максимальных темпов ускорения.

Третья глава посвящена исследованию свойств черенковского излучения в волноводных структурах. Детально и последовательно свойства черенковского излучения исследовались в публикациях Б.М.Болотовского [27]. Теоретические и экспериментальные исследования по двухпучковому ускорению в диэлектрических структурах провела рабочая группа Р.Б.Пальмера [12].

В третьей главе проведено исследование механизма формирования черенковского излучения в различных волноводах, начиная с модели плоского волновода [28,29], а также реального цилиндрического волновода с прорезанным в диэлектрике каналом, позволяющим использовать последний в схемах с двухпучковым ускорением [11]. Группой, возглавляемой Э.Д.Газазяном, в ЕрФИ был проведен цикл исследований по черенковскому излучению в волноводе с бицилиндрическим поперечным сечением, заполненным дисперсным диэлектриком с каналом, прорезанным в этом диэлектрике вдоль траектории пролета сгустка (ов) с целью уменьшения поляризационных (боровских) потерь [30,31]. Анализируя распределение поля в поперечных сечениях круглого

цилиндрического и соответствующего бицилиндрического волноводов, была предложена экстраполяционная формула для определения “резонансных” радиусов каналов в бицилиндрической структуре в случае периодической последовательности излучающих сгустков для обеспечения одномодового режима [32]. В этой главе исследовано влияние различных свойств среды, таких как: поглощение, дисперсия и анизотропия на формирование и распространение излучения Черенкова в волноводных структурах. В частности, рассмотрен случай тонкослоистого заполнения волновода. В этом случае среда становится одноосным диэлектриком и наблюдается эффект параметрического черенковского излучения, который также исследован в третьей главе. Проведен анализ влияния прорезанного в диэлектрике канала и выбора его величины для случая возбуждения черенковского излучения последовательностью сгустков.

Применение метода функции Грина [33] для решения волнового уравнения в цилиндрическом волноводе с прорезанным в диэлектрике каналом, возбуждаемом током движущегося со скоростью  $v$  заряженного сгустка, позволило связать скорость движения заряженного сгустка с частотами излучаемых мод для черенковского излучения в волноводе.

В последней части третьей главы проведен численный анализ влияния излучения Черенкова от последовательности предыдущих сгустков на динамику движения и излучение рассматриваемого сгустка в диэлектрическом волноводе с прорезанным каналом. Программа, написанная на языке Matlab, позволяет учитывать изменение фазы и частоты поля черенковского излучения на протяжении движения заряженного сгустка с переменной скоростью, обусловленной его торможением или ускорением в собственном поле и поле излучения предыдущих сгустков. Как результат наблюдается эффект частотно-амплитудной модуляции суммарного поля после прохождения нескольких сгустков, связанный с некогерентным сложением полей на определенных расстояниях от сгустка. Этот же эффект приводит к тому, что рассматриваемый сгусток оказывается в ускоряющей фазе поля излучения предыдущих сгустков, в результате чего приобретает энергию от поля без дополнительных сдвигов в периоде следования (задержек относительно фазы ускоряющего поля) и вылетает из волновода конечной длины с большей энергией, чем имел до влета в

него. При этом сгусток не только поглощает энергию, но и переизлучает свой, специфичный для данной скорости, спектр частот.

### Основные результаты диссертации

1. Развита метод последовательных приближений (МПП), основанный на методе решения задачи о собственных однородных электромагнитных колебаниях большого тора с использованием эффекта асимптотического разделения переменных в квазисферической (квазиторoidalной) системе координат в уравнении эйконала. Метод является эффективным инструментом для описания электромагнитных полей в большом тороидальном резонаторе.
2. Показано, что при определении собственных функций (собственных мод) и собственных значений (собственных частот) большого тороидального резонатора численный метод конечных элементов FEM расчета электромагнитных полей приводит к идентичным результатам, получаемым методом МПП. Расхождение между значениями не превышает 2%.
3. Полученные разложения собственных функций и собственных значений для тороидального резонатора с круглым поперечным сечением позволяют использовать их в качестве базисных в задаче о возбуждении тороида заданными токами, поскольку сравнение с результатами, полученными численными методами, исключает наличие других решений уравнений Максвелла в выбранной системе координат.
4. Развита метод определения вынужденных электромагнитных колебаний, когда сгусток заряженных частиц движется вдоль окружности с радиусом, совпадающим со средним радиусом тороида, основанный на разложении возбуждающих колебаний тока по определенным собственным функциям. При этом предполагается, что набор собственных функций является полным.
5. Исследованы особенности трех видов излучений:
  - a) синхротронного (магнитно-тормозного), когда заряд движется вдоль окружности внутри тора;
  - b) тороидальных колебаний;

- с) так называемого “переходного” излучения, обусловленного возникновением и исчезновением излучающего сгустка, которое накладывается на первые два типа излучений, если возбуждающий электромагнитные колебания сгусток существует в торе в течение конечного интервала времени.
6. Анализ полученных выражений для синхротронного излучения показал, что в реальных тороидах оно генерируется на синхротронных частотах независимо от резонансных свойств тороидального резонатора в виде бегущих волн, частоты которых сильно разнесены от частот тороидальных колебаний. Для того, чтобы синхротронное излучение генерировалось на частоте тороидальных мод, необходимо замедление волн путем заполнения его диэлектрической средой. При этом наблюдается существенное увеличение амплитуды синхротронных колебаний и смещение спектра этих колебаний в сторону длинных волн.
  7. Разработан единый метод описания электромагнитных полей в регулярном резонаторе с произвольным поперечным сечением, а также возбуждения в нем вынужденных электромагнитных колебаний сгустком и последовательностью сгустков различных форм и с различным распределением заряда.
  8. Показано, что численный метод решения описывает возбужденные поля в регулярных резонаторах и приводит к идентичным результатам, если провести сравнение с известными аналитическими результатами в задачах, допускающих строгое решение. Это позволяет с уверенностью применять метод конечных элементов для описания полей в резонаторах более сложных форм, не допускающих строгого аналитического решения.
  9. Проведено сравнение, в частности с результатами, полученными для бицилиндрических резонаторов методом “нулевого внешнего поля” [29]. Сопоставление доказывает устойчивость получаемых решений. С другой стороны, позволяет сравнительно быстро решать задачи. В этом смысле, предложенные численные методы Matlab-а и конечных элементов FEM в отношении бицилиндрических структур являются взаимодополняющими.
  10. Методом конечных элементов FEM рассмотрена и исследована более сложная пентацилиндрическая структура, состоящая из пяти цилиндрических резонаторов, четыре из которых служат

клизотронами, создающими ускоряющее поле в центральном (ускоряющим) резонаторе.

11. Методом конечных элементов и полученными аналитическими выражениями проведена оптимизация продольных размеров пента-цилиндрического резонатора по максимуму напряженности продольной составляющей электрического поля за время пролета ускоряемого сгустка с уменьшением продольных размеров клизотронных резонаторов.
12. Применение численных методов Matlab - а является эффективным и достоверным способом для расчета полей в волноводе и определения резонансного радиуса канала. Сравнение с результатами работы [31], где был предложен эвристический критерий для определения этого радиуса, показывает большую эффективность методов программирования в Matlab - е.
13. При возбуждении черенковского излучения последовательностью сгустков в цилиндрическом волноводе, заполненном диэлектриком с каналом обоснован эффект ускорения сгустков в поле этого излучения.
14. Разработанная в этой главе методика, основанная на программах Matlab-а, позволила оценить влияние неравномерности движения сгустков (торможение в поле излучения предыдущих сгустков) на эффект генерации излучения Вавилова-Черенкова.

#### Список литературы

1. TESLA Technical Design Report. Part 3. Physics at an  $e^+e^-$  Linear Collider. DESY March 2001.
2. S. Goloborodko, G.Grygiel, O.Hensler, V.Kocharyan, K.Rehlich, P.Shevtsov. DOOCS: an Object Oriented Control System as the Integrating Part for the TTF Linac. ICALEPCS'97, Beijing, China, 1997.
3. S.Goloborodko, M.Huening, H.Imsieke, A.Kholodnyi, V.Kocharyan, M.Liepe, T.Plawski, K.Rehlich et al. Integration of the Digital RF System with the TTF Control System. XVI Workshop on Charged Particle Accelerator, Protvino, 1998.
4. A.Agababyan, V.Kocharyan, K.Rehlich. An Integrated Finite State Mashine to Automate TTF operation. PCaPAC 2000 conference. Hamburg, Germany, 2000.

5. V.Gaidash, V.Kocharyan, A.Mirzoyan, A.Novikov-Borodin, D.Noelle, P.Reingardt-Nikoulin., H.Weise. Multi-Channel Electronics for Secondary Emission Grid Profile Monitor of TTF Linac. International XVIII Workshop on Charged Particle Accelerator, Crimie, Alushta, 1-6 September, 2003. (в печати)
6. V.Kocharyan, K.Rehlich. JDOOCS – a Java library for DOOCS. PCaPAC 2002 conference. Frascati. Itali.2002.
7. A.M.Sessler. The free electron laser as a power source for a high gradient accelerating structure. Laser Acceleration of Particles. American Institute of Physics. N-Y 1982.
8. А.Ц.Аматуни, Э.М.Лазиев, Г.А.Нагорский и др. Физика элементарных частиц и ядерного ядра. т. 20, вып 5, с.1247-1286, 1989.
9. T.Weiland: 11<sup>th</sup> International conference on High Energy Accelerators, CERN Geneva, p-570, 1980.
- 10.К.А.Барсуков, А.Д.Канарейкин, А.Л.Кустов. Двухпучковые схемы ускорения в волноводах сложного поперечного сечения. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. Выпуск 7 (15) 1990.
- 11.Е.Д.Газазян, М.И.Иванян, А.Д.Тер-Погоссян, А.С.Варданыан Cherenkov Radiation Mechanism in Two-Beam Acceleration Problems. EPAC-2000, Vienna, June 26 –July 2, p 468, 2000.
12. R.V.Palmer. The Application of Switched Power Accelerator to an Electron Gun. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. Выпуск 7 (15) 1990.
- 13.Э.Д.Газазян, М.И.Иванян, А.Д.Тер-Погосян. О собственных электромагнитных колебаниях в тороидальном резонаторе. Препринт ЕФИ. 887(38)-86, Ереван, 1986.
- 14.Л.Левин. Теория волноводов. М.: Радио и связь, 1981.
- 15.Э.Д.Газазян, В.Г.Кочарян, Г.Г.Оксузян. Тороидальные резонаторы с прямоугольным и круглым поперечными сечениями. Препринт ЕФИ. 1145(22)-89, Ереван 1989.
- 16.Е.Д.Газазян, V.G.Kocharyan, G.G.Oxuzyan.Toroidal Cavity as an Accelerative Module. EPAC'94 International conference, p.2125-2127.London. England. 1994.
- 17.В.Л.Гинзбург. Теоретическая физика и астрофизика. М. Наука, 1981.
- 18.В.Л.Гинзбург, В.И.Цытович. Переходное излучение и переходное рассеяние М:Наука, 1984.

- 19.В.Л.Гинзбург, И.М.Франк. Излучение равномерно движущегося электрона, возникающее при его переходе из одной среды в другую.ЖЭТФ, т.16, вып.1, ст.15-28, 1944.
- 20.А.И.Барышев, С.А.Хейфиц. Радиотехника и электроника, 1962, т.7, с.3.
- 21.T.Weiland. Two-Beam Wakefield Accelerators. Proc. CAS ECFA INFA Workshop, Frascati, Italy, p.13-28, 1984.
- 22.Е.А.Беглоян, Е.Д.Газазян, V.G.Kocharyan, Е.М.Лазиев. Peculiarities of Resonator Excitation by a Train of Charged Particle Bunches. Preprint YERPNI-1292(78)-90, Ереван 1990.
- 23.Э.А.Беглоян, Э.Д.Газазян, В.Г.Кочарян, Э.М.Лазиев. Особенности возбуждения резонатора последовательностью сгустков заряженных частиц. Известия ВУЗов "Радиофизика" т.32, н.1, ст. 79-85, 1992.
- 24.Е.А.Беглоян, Е.Д.Газазян, V.G.Kocharian, Е.М.Лазиев. The Interaction of the Charged Particles Bunches and Waveguide - Cavity Structures. Linac 94,Tsukuba (Japan), Vol. 1, p. 230-232, 1994.
- 25.М.И.Иванян. Собственные моды бицилиндрического волновода. Радиотехника и электроника, 44, N4, с.401-409, 1999
- 26.Е.А.Беглоян, Е.Д.Газазян, V.G.Kocharyan, Е.М.Лазиев. The Cylindrical Cavity Geometry Optimization Over the Maximum Longitudinal Component of Electric Field. EPAC'94 International conference, p.2123-2124, London, England, 1994.
- 27.Б.М.Болотовский. Труды ФИАН, 1964, т. 62 ст. 201; т. 75, ст. 295.
- 28.Э.А.Беглоян, В.Г.Кочарян, Э.М.Лазиев. Структура поля черенковского излучения в волноводе. Известия ВУЗов "Радиофизика" т.43, н.8, ст.715-722, 2000г.
29. Е. Begloyan, V. Kocharyan, E. Laziev. Field Structure of Cherenkov Radiation in a waveguide. FEL –1999 conference, p.427-430,Hamburg, Germany. 1999.
- 30.А.С.Варданыан, Газазян Э.Д., Тер-Погосян А.Д. Особенности черенковского излучения в волноводе с дисперсной диэлектрической средой. Изв.НАН РА. Физика 34, 35. 1999.
- 31.А.С.Варданыан, Газазян Э.Д., Тер-Погосян А.Д. О черенковском излучении в волноводе с каналом прорезанным внутри заполняющей волновод среды. Ibid.34, ст.195, 1999.
- 32.А.С.Варданыан. К Двухпучковой схеме ускорения в бицилиндрическом волноводе. Известия ВУЗов "Радиофизика" т.XLV ст. 33-37. 2002.

33. Г. Корн., Т. Корн. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров. М. Наука. 1984.

Список опубликованных работы по диссертации:

1. Э.Д.Газазян, В.Г.Кочарян, Г.Г.Оксузян. Тороидальные резонаторы с прямоугольным и круглым поперечными сечениями. Preprint YERPHI-1145(22)-89, 38ст., Ереван, 1989.
2. E.A.Begloyan, E.D.Gazazyan, V.G.Kocharyan, E.M.Laziev. Peculiarities of Resonator Excitation by a Train of Charged Particle Bunches. Preprint YERPHI-1292(78)-90, 24ст., Ереван, 1990.
3. Э.А.Беглоян, Э.Д.Газазян, В.Г.Кочарян, Э.М.Лазиев. Взаимодействие равноускоренно движущегося сгустка заряженных частиц с резонатором. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. Выпуск 7 (15), ст.115-118, 1990.
4. Э.А.Беглоян, Э.Д.Газазян, В.Г.Кочарян, Э.М.Лазиев. Особенности возбуждения резонатора последовательностью сгустков заряженных частиц. Известия ВУЗов "Радиофизика" т32, н.1, ст. 79-85, 1992.
5. E.D.Gazazyan, V.G.Kocharyan, G.G.Oxuzyan. Toroidal Cavity as an Accelerative Module. EPAC-94 International conference, p.2125-2127, London, England, 1994.
6. E.A.Begloyan, E.D.Gazazyan, V.G.Kocharyan, E.M.Laziev. The Cylindrical Cavity Geometry Optimization Over the Maximum Longitudinal Component of Electric Field. EPAC-94 International conference, p.2123-2124, London, England, 1994.
7. E.A.Begloyan, E.D.Gazazian, V.G.Kocharian, E.M.Laziev. The Interaction of the Charged Particles Bunches and Waveguide - Cavity Structures. Linac - 94, International conference, Vol. 1, p. 230-232. Tsukuba, Japan, 1994.
8. E. Begloyan, V. Kocharyan, E. Laziev. Field Structure of Cherenkov Radiation in a waveguide. FEL -1999 conference, p.427-430, Hamburg, Germany, 1999.
9. Э.А.Беглоян, В.Г.Кочарян, Э.М.Лазиев. Структура поля черенковского излучения в волноводе. Известия ВУЗов "Радиофизика" т.43, н.8, ст. 715-722, 2000г.

10. В.Г.Кочарян. Возбуждение тороидального резонатора током вращающейся частицы. Изв.НАН РА. Физика. т.38, н.5, ст.300-307, 2003.

Ամփոփում

Առենախոսությունը նվիրված է ճառագայթման երեք տիպերի քննարկմանը: Դրանք են սինքրոտրոնային, անցումային և չերենկովյան ճառագայթումները ռեզոնատորներում և պիքատարներում: Պաշտպանության են ներկայացվում և հիմնավորվում են հետևյալ թեզերը՝

- Հաջորդական մոտարկումների եղանակի (ՀՄԵ) - և վերջավոր էլեմենտների թվային ծրագրավորման (FEM) եղանակի համադրումը հնարավորություն է ընձեռում հետազոտել տորոիդային ռեզոնատորների էլեկտրամագնիսական հատկությունները և որոշել ռեզոնատորի բնութագրերը, ինչպես նաև հետազոտել սինքրոտրոնային և անցումային ճառագայթումները, որոնք մակածվում են տորոիդում պայտվող լիցքավորված մասնիկների փնջերի կողմից:
- Միջավայրի առկայությունը հանգեցնում է էլեկտրամագնիսական տատանումների ամպլիտուդի էական աճին տորոիդում, ինչը պայմանավորված է սինքրոտրոնային և տորոիդային տատանումների ինտերֆերենցիայով:
- Լիցքավորված թանձրուկների հաջորդականություն մակածած անցումային ճառագայթումը ռեզոնատորում ապահովում է արագացման բարձր տեմպ արագացման երկփնջային սխեմայում և այն կարելի է առաջարկել՝ որպես բարձր գրադիենտի արագացման մոդուլ:
- Պենտագլանային ռեզոնատորի օգտագործումը հանդիսանում է հեռանկարային եղանակներից մեկը արագացման բազմափնջային եղանակում, որը ներառում է՝ որպես մեկ ամբողջականություն, քլիստրոնային ռեզոնատորները (թվով չորսը) և արագացնող ռեզոնատորը:
- Թանձրուկների հաջորդականության մակածած չերենկովյան ճառագայթումը գլանային ռեզոնատորում, որում լցված դիելեկտրիկում բացված է կանալ, հնարավորություն է տալիս ստանալ արագացման բարձր գրադիենտ: Matlab-ի թվային եղանակի կիրառությունը հնարավորություն է ընձեռում մեծացնել նոր արդյունքների ստացումը, որոնք գործնական և տեսական հետաքրքրություն են ներկայացնում:

Դիսերտացիայում առաջարկվում է տորոիդալ ռեզոնատորում էլեկտրամագնիսական դաշտի բաղադրիչների և ռեզոնատորային հաճախությունների որոշման եղանակ: Ընդ որում, դիտարկվում են ինչպես ուղղանկյուն, այնպես է շրջանաձև լայնական կտրվածքներով տորոիդների դեպքերը:

Դիսերտացիայում քննարկվում է նաև անցումային ճառագայթումը բարդ տեսքի լայնական կտրվածք ունեցող ռեզոնատորներում, երբ սրանք հատում են լիցքավորված մասնիկների թանձրուկները:

Վերջում ուսումնասիրվում է չերենկովյան ճառագայթման ծևավորման մեխանիզմի խնդիրը՝ սկսած հարթ ալիքատարի դեպքից մինչև շրջանաձև և ավելի բարդ լայնական կտրվածքով ալիքատարների դեպքերը, որոնցում բացված է կանալ՝ դիելեկտրիկում լիցքի շարժման հետագծի երկայնքով:

### Resume

Three basic kinds of radiation are investigated in this dissertation: synchrotron, transition and Cherenkov radiation. They results from the excitation of various cavity and waveguide structures.

Five theses are defended:

- The combination of iteration and finite element methods (FEM) allows to investigate electro-magnetic features of toroidal cavities and also consider synchrotron and transition radiations are generated by rotating bunches.
- The existence of medium in a toroidal cavity increases the amplitude of electromagnetic oscillations, caused by interference between synchrotron oscillations and toroidal eigenoscillations.
- The excitation of resonator structures by a transition radiation of the train of charged bunches in the two-beams acceleration schemes provides high rate of acceleration, therefore they can be used as high gradient accelerating modules.
- Usage of the penta-cylindrical resonator in multi-beams acceleration schemes is one of perspective models for high gradient acceleration, an association opportunity in a single whole klystron resonators and accelerating cell.
- Cherenkov radiation mechanism may be used efficiently in two-beams acceleration schemes in waveguide structures. Thus the application of Matlab numerical methods the raises efficiency of obtaining of new results, which will represent both practical and theoretical interest.

The method of investigating the electro-magnetic fields components and resonant frequencies for toroidal resonators both for rectangular cross section and for round toroids, is presented.

The excitation of the complex shape cavities by the charged bunches traversing the volume of the resonator is considered. using the numerical method of finite element FEM the combinations of the analytical expressions.

The investigation of Cherenkov radiations formation mechanism for in various waveguides starting from the plane waveguide and also a real cylindrical waveguide with canal cut in dielectric is carried out, allowing to use it in two-beams acceleration schemes.

