

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

На правах рукописи

Проявин Михаил Дмитриевич

## УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИРОТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

1.3.4 – Радиофизика

Научный руководитель:  
доктор физико-математических  
наук, доцент  
Глявин Михаил Юрьевич

## ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение .....	4
ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ГИРОТРОНАМИ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ .....	21
1.1. Экспериментальная демонстрация возможности расширения полосы плавной перестройки частоты генерации в гиротронах с укороченным резонатором.....	21
1.2 Повышение КПД гиротрона на второй гармонике с частотой генерации 30 ГГц и мощностью более 10 кВ за счет профилирования магнитного поля в рабочем пространстве резонатора .....	22
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГИРОТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ .....	28
2.1 Разработка магнито-экранированных систем для гиротронных комплексов.....	28
2.1.1 Методика расчета магнитостатического поля. Оценка точности расчета на примере тестовых задач.....	28
2.1.2 Оптимизация магнитной системы с различной конфигурацией ферромагнитных экранов для 24 ГГц / 25 кВт технологического гиротрона .....	31
2.2 Оптимизация электронно-оптической системы для 24 ГГц/25 кВт гиротрона с МЭС .....	39
2.3 Увеличение срока службы катода гиротрона .....	42
2.4 Методы численного моделирования электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона.....	46
2.4.1 Исследование способов расчета электронно-оптической подсистемы гиротрона с большим количеством частиц.....	47
2.4.2 Создание программы для расчета электронно-волнового взаимодействия.....	49
2.5 Метод оптимизации электронно-оптической системы с учетом влияния на КПД генерации фракций электронного пучка для широких эмиттеров.....	52
2.6 Разработка магнитной системы для неадиабатической ЭОС и расчет распределения температуры в катодном узле.....	58
2.6.1 Синтез конфигурации катодных катушек и формы ферромагнитной вставки для формирования заданного профиля магнитного поля.....	59
2.6.2 Расчет распределения температуры в катодном узле неадиабатической ЭОС .....	64
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВНОМ ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ НА БАЗЕ МАГНИТО-ЭКРАНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ .....	66
3.1 Разработка и экспериментальное тестирование МЭС для технологических гиротронов нового поколения.....	66

3.2 Оптимизация параметров электронно-волнового взаимодействия для основного режима работы гиротрона 28 ГГц/25 кВт. Анализ возможности генерации на частотах 35, 45, 95 ГГц...	69
3.3 Расчета электронно-оптической системы гиротрона .....	83
3.3.1 Расчет магнетронно-инжекторной пушки .....	84
3.3.2 Исследование возможности осаждения электронного потока в коллекторе многорежимного гиротрона с неадиабатическим магнитным полем МЭС .....	86
3.4 Результаты экспериментального исследования гиротронного комплекса с МЭС в режиме генерации с частотой 28 ГГц .....	93
Заключение .....	97
Список цитированной литературы .....	99
Список трудов автора по теме диссертации .....	102

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на успешную и долгую историю гиротронов, данные приборы и в настоящее время не исчерпали себя в дальнейшем развитии и модернизации. В основном, это связано с широким и непрерывно увеличивающимся спектром их приложений в науке, медицине, биологии, химии, технологии. В частности, ярким примером таких применений является использование мощных квазинепрерывных гиротронных комплексов для установок термоядерного синтеза и удержания плазмы в различных магнитных ловушках. Другим важным направлением развития гиротронов являются технологические гиротронные комплексы.

Непрерывные гиротроны с рабочими частотами 24-30 ГГц и выходной мощностью несколько киловатт [1] (так называемые «технологические гиротроны») уже позволили освоить такие технологии, как спекание керамических и композитных материалов [2, 1А] и плазмо-химическое выращивание алмазных пленок и дисков [3]. В перспективе подобные источники микроволнового излучения будут востребованы для бор-нейтронзахватной терапии [4], получения нанопорошков оксидов металлов методом испарения – конденсации [5], и ряда других перспективных технологий.

Для таких технологий требуются различные режимы изменения выходной мощности. В то же время, технологические стенды на базе гиротронов должны оставаться высокоэффективными на протяжении всего этапа работы и при любых режимах. Поэтому важной задачей отработки технологических гиротронов является составление экспериментальных карт выходной мощности и эффективности гиротрона при вариации параметров и поиск оптимальных рабочих режимов для существующих технологических стендов, работающих на второй гармонике гирочастоты. Поскольку принцип работы гиротрона основан на использовании циклотронного резонанса электронов, движущихся в магнитном поле, с электромагнитной волной, очевидно, что профилирование магнитного поля – изменение резонансных условий по мере изменения энергии электронов – должно оказывать значительное влияние на выходные характеристики: мощность, эффективность и частоту генерации. Влияние продольного профиля магнитного поля на режим генерации гиротрона исследовалось в ряде работ [6–9], однако число экспериментов, подтверждающих сделанные предположения, явно недостаточно, что сказывается на применении данного подхода при создании поставочных комплексов, особенно, начиная с W-диапазона. Закладывание слабой неоднородности в область рабочего магнитного поля путем изменения геометрии основной магнитной системы крайне рискованно, так как каждый гироприбор по своему уникален и требует дополнительной подстройки. Стоимость и сложность магнитной системы зачастую вполне сравнима с самим СВЧ-генератором, что значительно увеличивает цену ошибки профилирования магнитного поля основной системы. Поэтому, учитывая малость требуемой неоднородности (в масштабах 1% от максимального поля), целесообразным является использование дополнительной маломощной магнитной системы как можно ближе к резонатору

гиротрона. Такой подход может стать базой для экспериментальной оптимизации профиля магнитного поля для дальнейшего создания магнитной системы с заложенной в ней неоднородностью, так и являться самодостаточным элементом комплекса.

Следует отметить, что до сих пор указанные гиротроны работали с относительно низкими значениями рабочих магнитных полей, создаваемых обычными «теплыми» соленоидами – около 0.5 Тл, что приводило к необходимости реализации генерации на второй гармонике гирочастоты. В то же время, развитие перечисленных выше приложений требует увеличения мощности примерно на порядок – до нескольких десятков киловатт. В этом случае основным ограничивающим фактором становится требование повышения устойчивости работы гиротрона в широком диапазоне мощностей, чему препятствует конкуренция мод в резонаторе гиротрона [10]. Поэтому необходим переход к генерации на основном циклотронном резонансе с соответствующим почти двукратным увеличением рабочего магнитного поля. Значительное число приложений технологических гиротронов требуют долговременной (в предельном случае CVD технологий до нескольких недель) работы комплекса, в связи с чем особое значение приобретают вопросы энергосбережения, в частности – за счет снижения мощности питания магнитной системы. В то же время, развитие приложений диктует новые требования к характеристикам выходного излучения, например, таким, как повышение частоты или ее изменение в широком диапазоне. Подобные цели напрямую связаны с увеличением индукции рабочего магнитного поля (и, следовательно, квадратично возрастающим энергопотреблением), так как осуществление стабильной, высокоэффективной и долговременной работы на большой мощности невозможно на высоких (более, чем 2) гармониках циклотронного резонанса. Ряд задач не позволяет использовать сверхпроводящие магниты, которые с легкостью закрыли бы существующие потребности в магнитных полях. Кроме того, нельзя исключать крайне высокую стоимость и обслуживание магнитов на «сухом» гелии, что в случае технологических комплексов делает их слишком дорогими и менее востребованными. Поэтому потребность в традиционных «теплых» соленоидах остается даже на горизонте применения в более высокочастотном диапазоне, что соответствует значительному возрастанию энергопотребления магнитов.

Указанные выше проблемы могут быть решены за счет экранирования магнитного поля рассеяния основного соленоида. При фиксированном магнитном поле в резонаторе  $B_0 = const$  можно существенно уменьшить мощность питания соленоида  $P_B$ . Для того чтобы перейти к работе на основном циклотронном резонансе в традиционных системах требуется двукратное повышение интенсивности магнитного поля (четырёхкратное увеличение мощности) и, соответственно, значительное усложнение системы охлаждения соленоида и источников питания. В экранированных системах аналогичное повышение магнитного поля требует заметно меньших мощностей и позволяет сохранить системы охлаждения, созданные для современных технологических гиротронов на гармониках гирочастоты. Работа на основном циклотронном

резонансе, кроме того, дает возможность решить проблему устойчивости одномодовой генерации с высоким КПД при больших (десятки киловатт) мощностях генерации.

Первые попытки как теоретического, так и экспериментального исследования гиротронов с экранированными магнитными системами были предприняты в работах [11, 12]. В частности, был реализован КПД около 20% при уровне выходной мощности около 10 кВт [11]. Однако в указанных работах генерация осуществлялась на второй гармонике гирочастоты, а формирование винтового электронного пучка (ВЭП) проводилось в неадиабатической электронно – оптической системе. Требуемые для гиротронов на базе экранированных магнитов неадиабатические ЭОС обычно характеризуются большей чувствительностью к вариациям рабочих режимов (напряжение и ток электронного пучка, магнитное поле в области эмиттера), погрешностям изготовления и юстировки. Поэтому предпочтительна адиабатическая схема формирования электронного пучка. Магнито-экранированные системы, однако, резко меняют распределение магнитного поля в области коллектора гиротрона, за областью ферромагнитных экранов, делая его неадиабатическим. Поэтому, несмотря на наличие достаточно большого разнообразия в подходах к оптимизации коллекторов гиротронов [13], задача равномерного осаждения мощного электронного пучка на коллектор (особенного в случае относительно малого радиуса) требует в данном случае отдельного рассмотрения.

Реализация подобных магнитных систем, с одной стороны, позволит на новом уровне мощности освоить частотный диапазон, в котором ранее можно было работать лишь на второй гармонике циклотронного резонанса. С другой стороны, с такими источниками магнитного поля открывается возможность работы на второй гармонике гирочастоты на частотах вплоть до 100 ГГц, что является крайне перспективной возможностью, например, для создания установок для СВЧ-бурения скважин [14] или СВЧ-обработки стекол [15]. Помимо этого, способность магнито-экранированных систем (МЭС) в широких диапазонах изменять магнитное поле дает возможность осуществления генерации СВЧ в большом интервале длин волн, что крайне важно для плазменных приложений. Возможность широкополосной перестройки частоты (24-100 ГГц) тесно связана с задачей создания для СВЧ-приборов барьерных окон, имеющих слабый коэффициент отражения в широком диапазоне длин волн [1А]. Для выполнения данного условия необходимо создание развитой поверхности на границе раздела двух сред (в данном случае вакуум-окно, окно-воздух), требующих детального численного моделирования и оптимизации. Новое поколение гиротронов на базе МЭС выглядит еще более привлекательным в связи с бурным развитием в настоящее время сферических токамаков [16]. Сферические токамаки считаются перспективными термоядерными реакторами, поскольку они имеют больший объем плазмы по сравнению с токамаками традиционной геометрии с такими же внешними размерами. В сферических токамаках существует возможность варьировать зону нагрева изменяя частоту СВЧ-излучения. Изучение зависимости режима нагрева плазмы при изменении положения области ЭЦР-нагрева входит в программу

исследований для сферических токамаков. Для этого представляет интерес гиротронная система, способная обеспечивать непрерывную мегаваттную мощность на двух разных частотах. Расчетное магнитное поле в модернизированной версии реактора составляет от 0,7 до 1,5 Тл, поэтому микроволновые частоты, необходимые для ЭЦР-нагрева, лежат в К-диапазоне. В настоящее время рассматриваются проекты двухчастотных гиротронов 19/38 ГГц и 28/37 ГГц [2А], способных обеспечивать нагрев плазмы в различных местах за счет переключения режима генерации. Данные частоты лежат в области магнитных полей, достигаемых с применением МЭС [3А], что с одной стороны, дает возможность уйти от дорогостоящих, сложных в эксплуатации криомагнитов и, с другой стороны, упрощает задачу возбуждения разных мод за счет простого изменения положения электронного пучка в резонаторе. Энергоэффективность МЭС для мощных гиротронов может быть снижена за счет уменьшения проходного отверстия, диаметр которого определяется поперечными размерами катодной части СВЧ-генератора. Габариты электронно-оптической системы мегаваттного гиротрона, в свою очередь, определяются возможностями эмиттирующего пояска по обеспечению требуемого уровня тока. Получение необходимых токов тесно связано с площадью эмиттирующей поверхности, однако увеличение ширины пояска жестко ограничено. Это связано с позиционным разбросом электронного пучка, увеличение которого в области резонатора гиротрона неминуемо ведет к проблемам электронно-волнового взаимодействия. Уменьшить данный эффект можно за счет отклонения от стандартных оптимальных углов наклона поверхности катода к оси симметрии прибора. Более пологие углы обеспечат меньший позиционный разброс скоростей, однако, увеличится разброс поперечных скоростей, что скажется отрицательно на работе прибора. Для решения этой проблемы может использоваться профилирование анода в области над эмиттером.

Применение МЭС в качестве источника магнитного поля выглядит привлекательным с точки зрения использования неадиабатических магнетронно-инжекторных пушек в виду резкого спада магнитного поля на краях магнита. В настоящее время в гиротронах для формирования винтового электронного пучка (ВЭП) повсеместно используют магнетронно-инжекторные пушки (МИП) с адиабатической схемой формирования электронного потока как наиболее проверенной и надежной. Но, несмотря на все достоинства адиабатической МИП, вследствие специфики формирования ВЭП в адиабатических полях, на процесс формирования электронного пучка сильное влияние оказывают такие принципиально неустранимые факторы как тепловые скорости стартующих электронов, шероховатость эмиттера и ряд других. В результате типичная суммарная величина разброса вращательных скоростей электронов  $\delta v_{\perp}$  перед входом в резонатор прибора за счет указанных факторов достигает 20-25%, что затрудняет, вследствие наличия магнитного зеркала перед входом в резонатор, реализацию пучков с большими (порядка 1.5 и более) питч-факторами. Последнее, в свою очередь, ограничивает КПД и выходную мощность прибора.

Роль указанных выше негативных факторов, влияющих на величину  $\delta v_{\perp}$ , можно полностью устранить или, по крайней мере, резко уменьшить при использовании неадиабатических систем формирования ВЭП, предложенных в работах [17, 18], что открывает возможности дальнейшего увеличения мощности и КПД технологических гиротронов.

Однако, такой подход к формированию электронных пучков до настоящего времени не получил массового применения из-за нескольких нюансов, одним из которых является сложность конструкции катодного узла. Данная проблема усугубляется при учете температурных деформаций электродов, конструкция которых состоит из различных металлов. Любая несоосность и небольшое отклонение от расчетных параметров могут привести к некорректной работе или даже выходу из строя формирующей системы. С этой точки зрения при разработке и оптимизации неадиабатических пушек необходимо проводить детальные расчеты распределения температуры и деформаций с учетом реальной конструкции прибора, включающей в себе множество элементов, имеющих определенные свойства. Одним из ключевых элементов катодной ножки, ограничивающим срок ее службы, является подогреватель катода. Изучение тепловых эффектов в области эмиттера, вызванных наличием отраженных от магнитной пробки электронов, может способствовать существенной оптимизации режима работы подогревающей спирали, что может значительно увеличить срок ее эксплуатации.

Численное моделирование гироприборов требует достаточно много вычислительных ресурсов, особенно если речь идет о высокочастотных задачах с необходимостью итерационной оптимизацией системы самосогласованных параметров. В таких случаях готовые решения в виде пакетов программ, таких как CST Studio Suite [19] или Comsol [20] являются скорее инструментом финальной проверки результатов, нежели методом решения рассматриваемых задач в силу сложности подходов и принципов, используемых в многозадачных коммерческих кодах. В связи с этим актуальной является задача создания специализированных программ, способных быстро и корректно проводить расчет гироприборов – их электронно-оптической и электродинамической задач.

### ***Цели и задачи исследования***

1. Экспериментальное исследование гиротронных комплексов для технологических приложений для определения путей повышения мощности и эффективности генерации.
2. Комплексное исследование температурных эффектов в катодных узлах магнетронно-инжекторных пушек гироприборов с целью увеличения долговечности катодов и снижения влияния температурной деформации элементов конструкции на качество электронного пучка.
3. Совершенствование компьютерных кодов для численного моделирования и оптимизации электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона.

4. Разработка магнитных систем со сниженным энергопотреблением, обеспечивающих индукцию магнитного поля 0.5-1.8 Тл в объемах, достаточных для размещения электродинамической и электронно-оптической систем giroприборов.
5. Реализация технологических giroтронных комплексов с выходной мощностью в десятки киловатт на базе магнито-экранированных систем.
6. Демонстрация возможности эффективной генерации при широкополосной ступенчатой перестройке частоты излучения.

### ***Объект исследования***

Объектом настоящего исследования являются процессы взаимодействия винтового электронного потока, движущегося в осесимметричном магнитном поле giroприбора с ВЧ полями сверхразмерных резонаторов giroприбора. Поведение ВЭП в квазиadiaбатическом и неadiaбатическом магнитном поле в области катода и коллектора. Распределение магнитного поля соленоидов, окруженных магнитомягким железом с нелинейной В-Н характеристикой.

### ***Научная новизна исследования***

Одной из актуальных задач дальнейшего совершенствования giroприборов является возможность реализации плавной перестройки частоты генерации. Одним из известных способов является работа giroтрона в режиме ЛОВ, что дает возможность работать с продольными вариациям ВЧ-поля при увеличении магнитного поля. Однако, мощность генерации драматически падает уже начиная со второй продольной моды. В первую очередь это связано с особенностями работы в данном режиме, так как появляется зависимость от продольного разброса скоростей. Для уменьшения влияния данного эффекта в работе [21] было предложено использовать короткие резонаторы. Было показано, что максимально достижимый индекс продольной моды определяется именно разбросом скоростей электронов. Для экспериментальной проверки теоретических исследований был проведен эксперимент на технологическом giroтроне на второй гармонике giroчастоты с частотой генерации 28 ГГц. Для сокращения длины резонатора в длинах волн, был осуществлен переход на первую гармонику с частотой 12 ГГц. В процессе изменения магнитного поля была получена генерация вплоть до третьей продольной вариации ВЧ-поля, что позволило осуществить режим генерации на киловаттном уровне мощности при плавной частотной перестройке в 4%. [4А].

Теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность значительного (более чем на треть) увеличения КПД и перестройки частоты при профилировании магнитного поля в области электронно-волнового взаимодействия в диодном варианте giroтрона с рабочей частотой 30 ГГц и мощностью до 15 кВт [5А]. Результаты исследования легли в основу расчета giroтрона с магнито-экранированной системой (МЭС).

Первые попытки как теоретического, так и экспериментального исследования гиротронов с экранированными магнитными системами были предприняты в работах [11-12]. В частности, был реализован КПД около 20% при уровне выходной мощности около 10 кВт [11]. Однако в указанных работах генерация осуществлялась на второй гармонике гирочастоты, а формирование винтового электронного пучка (ВЭП) проводилось в неадиабатической электронно-оптической системе. Требуемые для гиротронов на базе экранированных магнитов неадиабатические ЭОС обычно характеризуются большей чувствительностью к вариациям рабочих режимов (напряжение и ток электронного пучка, магнитное поле в области эмиттера), погрешностям изготовления и юстировки. Поэтому предпочтительна адиабатическая схема формирования электронного пучка. В диссертации выполнено теоретическое и экспериментальное исследование возможности реализации качественного (с точки зрения электронно-волнового взаимодействия) ВЭП в магнито-экранированной системе.

Разработана и успешно испытана МЭС, обладающая вдвое большим магнитным полем, чем стандартные «теплые» соленоиды, используемые в текущих версиях гиротронных комплексов, что позволяет осуществить переход на работу на основном циклотронном резонансе. Конфигурация ферромагнитных экранов доработана таким образом, чтобы при работе на различных частотах обеспечить профиль магнитного поля, необходимый для корректной работы электронно-оптической системы как в области формирования электронного пучка, так и в области его осаждения.

Результаты исследования МЭС легли в основу расчета гиротрона с магнито-экранированной системой. Наличие экспериментальных данных профиля магнитного поля позволило разработать уникальную магнетронно-инжекторную пушку (МИП), которая в условиях квазиадиабатического магнитного поля способна формировать качественный (с точки зрения электронно-волнового взаимодействия) ВЭП. В то же время, в области коллектора и выходного волновода, где магнитное поле сильно неадиабатично, можно оптимизировать осаждение электронного потока путем установки нескольких дополнительных соленоидов малой мощности. Данный подход был успешно реализован для гиротрона с рабочим магнитным полем в интервале 1-1.8 Тл при интегральной мощности дополнительных катушек около 50 Вт. В данной методике демонстрируются две характерные области электронного пучка (область «косички» и «инерциального разлета»), которые могут быть использованы с точки зрения минимизации плотности мощности до приемлемых значений ( $500 \text{ Вт/см}^2$ ) для коллекторов с малыми и большими поперечными размерами.

Профилирование магнитного поля в резонаторе было использовано для оптимизации электронно-волнового взаимодействия при различных режимах работы в полосе частот 28-95 ГГц. Для большей достоверности расчетов моделирование было проведено в различных пакетах программ и с учетом различных физических факторов.

Результатом теоретических расчётов стала реализация гиротронного комплекса на базе МЭС с рекордными параметрами для своего класса приборов. Так, для режима с частотой генерации 28 ГГц на основном циклотронном резонансе была получена стабильная генерация излучения на уровне мощности более 20 кВт при КПД всего комплекса в целом около 30 %, что примерно в 1.5 раза выше существующих аналогов.

### ***Практическая значимость***

Разработан и испытан высокоэффективный технологический гиротронный комплекс на базе МЭС, способный на мультикиловаттном уровне мощности обеспечивать генерацию вплоть до W-диапазона. Использование данного гиротрона в микроволновых комплексах для обработки материалов, производимых ИПФ РАН совместно с ЗАО НПП ГИКОМ, уменьшит энергопотребление комплексов в целом примерно в 1.5 раза или позволит осуществлять генерацию излучения на уровне мощности, в несколько раз превышающей значения, достигнутые для технологических комплексов с «теплыми» соленидами.

В случае продвижения в более высокочастотный диапазон данные комплексы будут востребованы большим числом научных и производственных лабораторий за счет отказа от использования дорогостоящих и сложных в эксплуатации криомагнитов.

### ***Апробация и публикация результатов исследования***

Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных журналах и докладывались на международных конференциях по вакуумной электронике (Сеул, Южная Корея, 2016), Международном симпозиуме по исследованиям в области электромагнетизма (Тояма, Япония), Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (Нагоя, Япония, 2018; Париж, Франция, 2019), Международной конференции по передовым лазерным технологиям (Таррагона, 2018), Международной конференции по технологии ускорителей тяжелых ионов (Ланьчжоу, Китай, 2018), совместных Российско-Германских семинарах по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Н. Новгород, 2018; Ленгрис, Германия 2019), Международном семинаре по мощным СВЧ-источникам и их приложениям (Н. Новгород, 2017), Международном семинаре по перспективным ускорителям и перспективным источникам излучения (Ариэль, Израиль, 2019), Международной конференции «Терагерцовое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и применения» (Н. Новгород, 2018, 2020), Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2018, 2020), Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Н. Новгород, 2016, 2019), Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (С. Петербург, 2018, 2021), Нижегородских сессиях молодых ученых (Н. Новгород, 2018, 2019, 2020)

### ***Личный вклад автора***

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1 – A13] получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в проведении полного цикла работ по созданию магнито-экранированных систем для гиротронов, исследовании ЭОС, способных эффективно работать в условиях магнитных полей МЭС, аналитическом исследовании взаимодействия электронов с полем резонатора, численном моделировании режимов генерации, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных, написании отчетов, статей, подготовке презентационных материалов и участии в конференциях. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Совершенствование программы для расчета электронно-волнового взаимодействия проходило при непосредственном участии автора первой версии программы Н. И. Завольского и автора пакета программ Angel E. С. Семенова. Экспериментальные исследования проводились в составе группы ученых и инженеров, обеспечивавших работу гиротронных комплексов. Обработка результатов эксперимента производилась автором лично. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами.

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

1. Эффект электронной бомбардировки катода отраженными от магнитной пробки электронами, приводящий к дополнительному разогреву катода, может быть использован для увеличения времени жизни катодного узла.

2. Оптимизация продольного распределения магнитного поля позволяет реализовать рекордные значения интегрального КПД технологических комплексов на базе гиротронов и освоить новые частотные диапазоны вплоть до W-диапазона.

3. Одним из способов повышения интегрального КПД гиротронных комплексов является использование ЭОС с широким эмиттером, что при оптимизации формы электродов позволяет увеличить рабочий ток гиротрона при сохранении высокоэффективной генерации значений позиционного и скоростного разброса электронного пучка.

4. Эффективное управление параметрами электронного потока в магнито-экранированных системах, имеющих относительно слабое поле в области формирования и осаждения электронного пучка, может быть реализовано за счет триодной конфигурации электронно-оптической системы и профилирования магнитного поля в катодной и коллекторной областях.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 103 страницы, включая 72 рисунка и список литературы из 57 наименований.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цели диссертационной работы, отмечена научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований технологических гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты.

В **п. 1.1** экспериментально исследована возможность расширения полосы плавной перестройки частоты генерации в гиротронах с укороченным резонатором. Одним из известных способов перестройки частоты является работа гиротрона в режиме ЛОВ, что дает возможность работать с продольными вариациям ВЧ-поля при увеличении магнитного поля. Однако, мощность генерации драматически падает уже начиная со второй продольной вариации. В первую очередь это связано с особенностями работы в данном режиме, так появляется зависимость от продольного разброса скоростей:  $\omega = s\Omega + hv_{||}$ . Для уменьшения влияния данного эффекта в работе [21] было предложено использовать короткие резонаторы. Было показано, что максимально достижимый индекс продольной моды определяется именно разбросом скоростей электронов:  $q < \frac{2}{g^2\delta v_{\perp}} = \frac{2}{\delta v_{||0}}$ . Разброс скоростей электронов приводит к дополнительному разбросу электронной циклотронной фазы по отношению к волновой и данный эффект усиливается при увеличении длины области электронно-волнового взаимодействия:  $\delta\omega = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{g^2 L \delta v_{\perp}} \right)^2 = \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{v_{||0}}{\mu \delta v_{\perp}} \right)^2$ , где  $\delta\omega$  – полоса перестройки, а  $\mu = \pi g \beta_{\perp 0} L / \lambda$  – безразмерная длина области взаимодействия.

Для проверки теоретических исследований был проведен эксперимент с использованием существующего технологического гиротрона 28 ГГц, TE<sub>0,2</sub>, 20 кВ / 2 А на второй циклотронной гармонике. Для проведения эксперимента режим генерации был сменен на работу на основном циклотронном резонансе с частотой генерации 12,2 ГГц на моде TE<sub>2,1</sub>. На более низкой частоте безразмерная длина резонатора уменьшилась с  $\mu = 17$  до  $\mu = 4$ . При основном резонансе ток пучка был достаточно велик для возбуждения продольных мод высокого порядка. Дополнительный диск из нитрида бора использовался для согласования окна вывода на частоте 12,5 ГГц.

В результате экспериментов была подтверждена возможность генерации выходной мощности на уровне более 1 кВт в полосе перестройки частоты более 4% [4А] при осуществлении генерации вплоть до третьей продольной вариации рабочей моды резонатора гиротрона. Данные экспериментального исследования и результаты численного моделирования находятся в хорошем

соответствии друг другу, что подтверждает корректность расчетных моделей. Полученные результаты могут быть использованы в случае широкополосной ступенчатой перестройки частоты гиротрона при работе на близких модах. В таком случае, работа на продольных вариациях рабочих мод может послужить связующим звеном между модами и обеспечить плавную широкополосную перестройку.

В п. 1.2. описаны результаты работы с технологическим гиротроном на второй гармонике гирочастоты при выходной мощности 10 кВт на частоте 30 ГГц [6А]. Поскольку принцип работы гиротрона основан на использовании циклотронного резонанса электронов, движущихся в магнитном поле, с быстрой электромагнитной волной, очевидно, что профилирование магнитного поля – изменение резонансных условий по мере изменения энергии электронов – должно оказывать значительное влияние на выходные характеристики: мощность, эффективность и частоту генерации. Благодаря оптимизации профиля магнитного поля в резонаторе дополнительными маломощными катушками было получено увеличение КПД в 1.3 раза (с 27 до 36%) по сравнению с режимом работы при однородном магнитном поле.

Как известно, эффективным методом управления частотой генерации гиротронов является изменение магнитного поля в области взаимодействия. Управление частотой за счет дополнительной катушки, изменяющей магнитное поле по всей длине однородного участка резонатора, было исследовано в работе [22] и успешно применяется в гироприборах, использующих криомагниты [23, 24] или системы на постоянных магнитах [25, 26]. В данной работе экспериментально исследовалась возможность управления частотой за счет изменения магнитного поля на достаточно узком участке в конце области взаимодействия, что позволяет уменьшить индуктивность катушки и характерное время перестройки. При наблюдаемой ширине спектра излучения 0.2 МГц чувствительность частоты генерации к току дополнительной катушки составила 1 МГц/А. Индуктивность вспомогательной катушки для подстройки частоты равна 70 мкГн, что более чем на порядок меньше аналогичной величины для катушки, использованной для стабилизации частоты в работе [22]. С учетом ограничений, накладываемых ослаблением переменного магнитного поля корпусом прибора (скин-эффект), характерная частота варьирования поля составила около 10 кГц [27], что позволяет использовать данный подход для стабилизации частоты широкого класса гиротронов, в том числе предназначенных для управляемого термоядерного синтеза (УТС).

Полученные результаты могут представлять интерес для повышения КПД, а также управления частотой гиротронов мегаваттного уровня мощности для управляемого термоядерного синтеза [7А] и высокочастотных гиротронов малой мощности [8А], в которых быстрое изменение основного магнитного поля затруднительно в силу большой индуктивности обмотки криомагнита. Стабилизация частоты модуляцией напряжения на аноде также невозможна в силу диодной схемы лампы мощных СВЧ-комплексов.

Во **второй главе** рассмотрены вопросы, связанные совершенствованием технологических гиротронных комплексов и методов их расчета.

**В п. 2.1.** детально исследована возможность применения ферромагнитных экранов для концентрации магнитного поля теплых соленоидов в рабочем пространстве СВЧ-приборов. Данный принцип может быть использован как для снижения энергопотребления магнитных систем, так и для увеличения интенсивности магнитного поля при сохранении уровня потребляемой мощности на прежнем уровне. Как результат, исследования послужили основой для разработки магнитных систем для гиротронов с квазиadiaбатической и неadiaбатической МИП, в первой из которых реализована система электродов, обеспечивающая формирование качественного с точки зрения электронно-волнового взаимодействия винтового электронного пучка для гиротрона на базе МЭС [9А].

**В п. 2.2.** приведены результаты теоретического и экспериментального исследования возможности значительного увеличения срока службы подогревателя катода гиротрона за счет использования паразитного эффекта бомбардировки катода отраженных от магнитной пробки электронов [10А]. Теоретические результаты показали, что такой подход позволяет в разы увеличить срок службы катода при снижении температуры подогревателя с 3300 К до 3100 К и менее. Максимальное снижение мощности подогревателя в эксперименте составило 22% для тока электронного пучка 1,5 А, что свидетельствует о правильности предлагаемого подхода.

**П. 2.3.** посвящен совершенствованию существующих и разработке оригинальных компьютерных кодов для расчета и оптимизации электронно-оптической и электродинамической подсистем гиротрона. В результате работы на базе библиотеки IBSIMU реализована программа, позволяющая проводить точный и быстрый (на несколько порядков быстрее, чем CST Studio Suite при аналогичных входных параметрах) расчет и анализ электронных пучков гиротрона с большим (сотни миллионов) количеством частиц. Совместно с Н.И. Завольским и С.Е. Семеновым реализован инструмент расчета и оптимизации резонатора гиротрона на базе стационарной самосогласованной системы полных уравнений движения электронов с нефиксированной структурой поля электромагнитной волны (\*), интегрированный в пакет программ Angel.

(\*). *Нормированный комплексный поперечный импульс каждого электрона описывается уравнением:*

$$\frac{dp_c}{dz} + i \frac{p_c}{p_{\parallel}} * \left( \gamma \frac{k}{n} - \frac{\omega_{H0}}{c} \right) = \kappa_{\perp} * J_{m-n} * \left\{ \left( \frac{i\gamma F}{p_{\parallel}} + \frac{1}{k} \frac{dF}{dz} \right) * (p_c^*)^{n-1} * \left( \frac{J_{n-1}}{2p_{\perp}^{n-1}} \right) + \left( \frac{i\gamma F^*}{p_{\parallel}} - \frac{1}{k} \frac{dF^*}{dz} \right) * p_c^{n+1} * \left( \frac{J_{n+1}}{2p_{\perp}^{n+1}} \right) - i p_c * Re \left( \frac{F}{p_{\parallel}} * (p_c^*)^n \right) * \left( \frac{J_n}{p_{\perp}^n} * \frac{k_{\perp}}{k} \right) \right\} + \frac{p_c}{2H_0} * \frac{dH_0}{dz} - \frac{iS\gamma(z)}{p_{\parallel}} * \left\langle \frac{\hbar e}{\tilde{p}_{\parallel}} \right\rangle$$

, где последние два слагаемых отражают влияние неоднородного статического магнитного поля и пространственного заряда электронного пучка соответственно.

Продольная компонента нормированного импульса каждого электрона описывается уравнением:

$$\frac{dp_{\parallel}}{dz} = -Re \left( \frac{1}{k} \frac{dF}{dz} * (p_c^*)^n \right) * \frac{J'_n}{p_{\perp}^{n-1}} * \frac{\kappa_{\perp} * J_{m-n}}{p_{\parallel}} - \frac{p_{\perp}^2}{p_{\parallel} * 2H_0} * \frac{dH_0}{dz}$$

Продольная структура поля, согласованная с пучком:

$$\frac{d^2F}{dz^2} + k_{\parallel}^2 * F = I * k * k_{\perp} * \langle \langle J_{m-n} * \frac{p_c^n}{p_{\parallel}} * \frac{J'_n}{p_{\perp}^{n-1}} \rangle \rangle$$

Данный софт позволяет с высокой точностью и минимальными вычислительными и временными ресурсами проводить оптимизацию параметров электродинамической системы, что является незаменимым инструментом при разработке СВЧ-комплексов. Разработанные коды были успешно протестированы на предмет соответствия известным современным коммерческим пакетам программ.

**В п. 2.4** исследована возможность оптимизации функции распределения электронов по поперечным скоростям с точки зрения эффективности взаимодействия с электромагнитной волной резонатора гиротрона [11А]. Профилирование анода дает возможность в значительной степени менять функцию распределения всего пучка, оптимизируя профиль анода для каждой из фракций эмиттера. Данный инструмент может позволить проводить качественную оптимизацию широких эмиттеров, которые, например, имеют меньший угол наклона к центральной оси симметрии ЭОС для прохождения в меньшие отверстия магнитных систем. Но понятие оптимальной функции распределения по поперечным скоростям должно быть связано с эффективностью взаимодействия каждой фракции пучка с рабочим типом колебаний резонатора. Поэтому целесообразным является проводить поиск максимального суммарного КПД путем расчета вклада каждой фракции и для каждой из них проводить свою оптимизацию отдельно. В результате исследований показана возможность существенного уменьшения интегрального разброса поперечных скоростей винтового электронного пучка и увеличения КПД генерации отдельных фракций путем оптимизации позиционного разброса ВЭП. Продемонстрирована возможность уменьшения поперечных размеров катодного узла за счет изменения угла наклона и/или увеличения тока пучка без потери эффективности генерации.

**В п. 2.5** приводятся результаты синтеза конфигурации электромагнитов и ферромагнитных вставок, расчета температурных эффектов в катодной области неадиабатической электронно-оптической системы гиротрона. Требуемый профиль магнитного поля в области формирования электронного пучка, использованный в работе [28], в изначальной конфигурации электромагнитов был нереализуем в связи с большим энергопотреблением и плотностью тока катодных катушек. В результате использования ферромагнитного элемента определенной формы и специальной конфигурации катушек было получено снижение энергопотребления системы дополнительных соленоидов в 20 раз при сохранении требуемого распределения магнитного поля. Это позволяет

реализовать дополнительную магнитную систему без системы охлаждения. Детальное моделирование распределения температуры направлено на недопущение перегрева элементов конструкции системы формирования электронного потока. Неадиабатические ЭОС крайне чувствителен к температурным деформациям из-за критичности к изменениям аксиальной симметрии электродов. Задача осложняется наличием длинного продольного размера некоторых элементов и невозможностью использования дополнительного крепления подвесных частей. Результаты расчетов [9А] могут лечь в основу модернизации геометрии неадиабатических МИП и сделать их более надежными и востребованными системами формирования электронных потоков.

**Глава 3** посвящена разработке и реализации технологического гиротронного комплекса с магнито-экранированной системой [12А].

В п. 3.1 проведено теоретическое и экспериментальное исследование МЭС [4А]. Измерения индукции магнитного поля выполнены датчиком Холла (модель Lake Shore Gaussmeter Model 450) с погрешностью не более  $\pm 0.10\%$ . В ходе эксперимента получена зависимость интенсивности поля  $B$  в центре соленоида от мощности источников питания  $P$ . В эксперименте максимальная мощность составила 31 кВт, что позволило достичь индукции магнитного поля 1.45 Тл. Экстраполяция данных до 50 кВт потребляемой мощности с учетом нелинейной зависимости  $B(H)$ , связанной с насыщением материала экранов, указывает на возможность генерации колебаний с рабочими частотами до 50 ГГц на первой гармонике гирочастоты (и соответственно до 100 ГГц на второй гармонике). Во всех экспериментальных режимах МЭС демонстрировала долговременную стабильную работу со стационарной температурой корпуса системы не выше  $40^{\circ}\text{C}$ . Для режима с магнитной индукцией 1.024 Тл, необходимой для генерации колебаний с рабочей частотой 28 ГГц, измерено распределение магнитного поля. В ходе экспериментов нарушений аксиальной симметрии магнитного поля не выявлено. Результаты экспериментов согласуются с расчетными данными, что дает возможность дальнейшего проведения расчета и оптимизации электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона.

**П. 3.2** посвящен расчету и оптимизации электронно-волнового взаимодействия. Возможности рассмотренной в предыдущем пункте магнитной системы позволяют рассчитывать на генерацию вплоть до  $W$ -диапазона. Был проведен расчет взаимодействия высокоэффективной генерации для частот 28, 35, 45 и 95 ГГц. Возможность широкополосной перестройки частоты тесно связана с задачей вывода излучения из вакуумного объема, что может быть решено за счет создания для СВЧ-приборов барьерных окон, имеющих слабый коэффициент отражения в широком диапазоне длин волн. Оптимизация параметров электронно-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона на 28 ГГц показала возможность достижения КПД генерации 52%, что с учетом потребления МЭС является рекордным для эффективности комплекса в целом (около 35%). Расчет

проводился на программах Angel (одномодовое взаимодействие) и CST Studio Suite (с учетом конкуренции спутников), результаты показали хорошее соответствие друг другу.

Аналогичные расчеты были проведены для остальных режимов генерации, КПД которых составлял около 20%. Данное уменьшение эффективности взаимодействия связано в первую очередь с неоптимальной длиной резонатора, оптимизированной на частоту 28 ГГц на основном циклотронном резонансе.

**В п. 3.3** разработана электронно-оптическая система гиротрона, включающая в себя как область формирования винтового электронного пучка, так и область его посадки. Распределение осевого магнитного поля, помимо требований к величине максимума и длине однородного участка, должно обеспечивать формирование электронного пучка с приемлемым качеством с точки зрения электронно-волнового взаимодействия и осаждения на коллектор с приемлемым уровнем плотности мощности. Качество ВЭП и принцип работы системы формирования существенно зависят от степени неадиабатичности магнитного поля, которая может быть оценена соответствующим безразмерным коэффициентом как:

$$\varepsilon = \left| \frac{dB_z}{dz} \right| \frac{2\pi\sqrt{2U\eta}}{\eta B_z^2} = \frac{h}{L_B}$$

где  $h$  – шаг электронной траектории,  $L_B$  – масштаб неоднородности магнитного поля. Когда этот коэффициент оказывается больше единицы, движение электрона уже нельзя описать в рамках адиабатической теории. Расчет МИП проводился при условии  $\varepsilon \leq 1$  в области формирования ВЭП, что достигалось путем использования маломощной экранированной катодной катушки. В расчетах было принято умеренное значение плотности тока  $j_k=1.7$  А/см<sup>2</sup>, что позволяет рассчитывать на время жизни катода в десятки тысяч часов. Для возможности подстройки параметров ВЭП рассматривалась триодная конфигурация МИП. Оценки показывают, что при указанных выше плотностях тока отношение рабочего тока к ленгмюровскому току пушки  $t_j \approx 0.4$ , что приводит к существенному возмущению скоростного распределения в пучке силами пространственного заряда [29]. Для снижения влияния этого фактора угол наклона эмиттера к оси симметрии системы варьировался в условиях больших углов подхода силовых линий магнитного поля МЭС к образующей эмиттера. Результирующие параметры пучка соответствовали требованиям эффективного электронно-волнового взаимодействия: пич-фактор пучка в резонаторе  $g=1.56$ , разброс поперечных скоростей 7%.

Расчет и оптимизация коллекторной области осложняется характерной особенностью МЭС – резкий спад магнитного поля за экранами, вследствие чего движение электронов в этой области становится неадиабатическим. Соответственно и расчет энергетической нагрузки коллектора по простой теории [30] становится невозможным.

Силовые линии магнитного поля резко расходятся в области, где расположен край ферромагнитного экрана. В результате образуется неадиабатический однопериодный ондулятор, придающий топологии ВЭП сложную структуру. Такая динамика электронного пучка усложняет процесс оптимизации распределения осаждаемой на коллектор мощности и требует специфического подхода, учитывающего характер движения электронов. Рассмотренная особенность коллектора гиротрона с МЭС, а также необходимость работы в режимах с различными магнитными полями в одном приборе, требует глубокой оптимизации коллекторного узла [13А]. Для выполнения расчетов на базе библиотеки IBSIMU был создан специализированный код, позволяющий быстро проводить вычисления при большом количестве частиц в трехмерном пространстве с учетом пространственного заряда. В результате исследования было предложено две методики, позволяющие решить данную проблему для случая коллектора малого и большого диаметра (области «косички» и инерциального разлета, соответственно)

Рассчитаны режимы генерации для частот 28, 35, 45 и 95 ГГц, являющиеся наиболее востребованными для актуальных приложений. Используя ранее предложенную методику расчета и имея конструкционные ограничения габаритов была проведена оптимизация коллекторной области, позволяющая обеспечить нагрузку коллектора, приемлемую (до 400 Вт/см<sup>2</sup>) для непрерывного режима генерации при мощности пучка 50-60 кВт при различных величинах магнитного поля в резонаторе от 1 до 1.8 Тл. Добиться этого удалось в том числе за счет установки над коллектором системы маломощных катушек, что позволило сгладить распределение плотности мощности рассеяния электронного пучка для всех случаев.

В п. 3.4 приведены результаты экспериментального исследования гиротронного комплекса с МЭС. Приведены результаты сравнения распределения осевого магнитного поля вдоль всей системы с учетом катодной и коллекторных катушек. Получены значения мощности и КПД устойчивой одномодовой генерации с частотой 28 ГГц при токах электронного пучка 0.5-2.2 А. КПД генерации хорошо согласуется с расчетным. В результате экспериментов получена мощность генерации более 20 кВт при КПД всего комплекса (с учетом потребления магнитной системы) 32%, что в 1.5 раза превышает аналогичный параметр существующих коммерческих технологических комплексов.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Теоретически и экспериментально исследованы возможности значительного повышения КПД приборов гиротронного типа посредством профилирования магнитного поля в области резонатора гиротрона. В технологическом гиротроне с рабочей частотой 30 ГГц КПД увеличен в 1.3 раза по сравнению с однородным распределением магнитного поля. Продемонстрирована возможность

стабилизации рабочей частоты гиротрона за счет системы маломощных катушек в резонаторной области.

2. Исследован эффект бомбардировки катода отраженными от магнитной пробки электронами и экспериментально продемонстрирована возможность формирования в таких условиях как электронных пучков с параметрами, приемлемыми для высокоэффективного электронно-волнового взаимодействия, так и существенного увеличения срока службы катода за счет снижения температуры подогревателя.

3. Исследована конфигурация ЭОС с широким эмиттером, позволяющая увеличить рабочий ток гиротрона при сохранении малого позиционного и скоростного разброса. Это позволяет увеличить мощность и КПД комплексов как за счет более эффективного электронно-волнового взаимодействия, так и за счет снижения объема рабочего магнитного поля.

4. Для технологических гиротронов с теплыми соленоидами разработана и испытана магнитно-экранированная система, позволяющая в несколько (3-4) раз снизить энергопотребление соленоида при той же интенсивности и протяженности магнитного поля в области электронно-волнового взаимодействия, что позволяет существенно увеличить КПД комплекса в целом.

5. На базе магнитно-экранированной системы разработан технологический гиротрон нового поколения, способный осуществлять эффективную (~35% без рекуперации энергии) генерацию излучения мощностью до 25 кВт на частотах 28, 35, 45 ГГц на основном циклотронном резонансе и 95 ГГц на второй гармонике гирочастоты. Для обеспечения работы гиротрона в широком диапазоне частот разработана методика оптимизации ключевых узлов гиротрона.

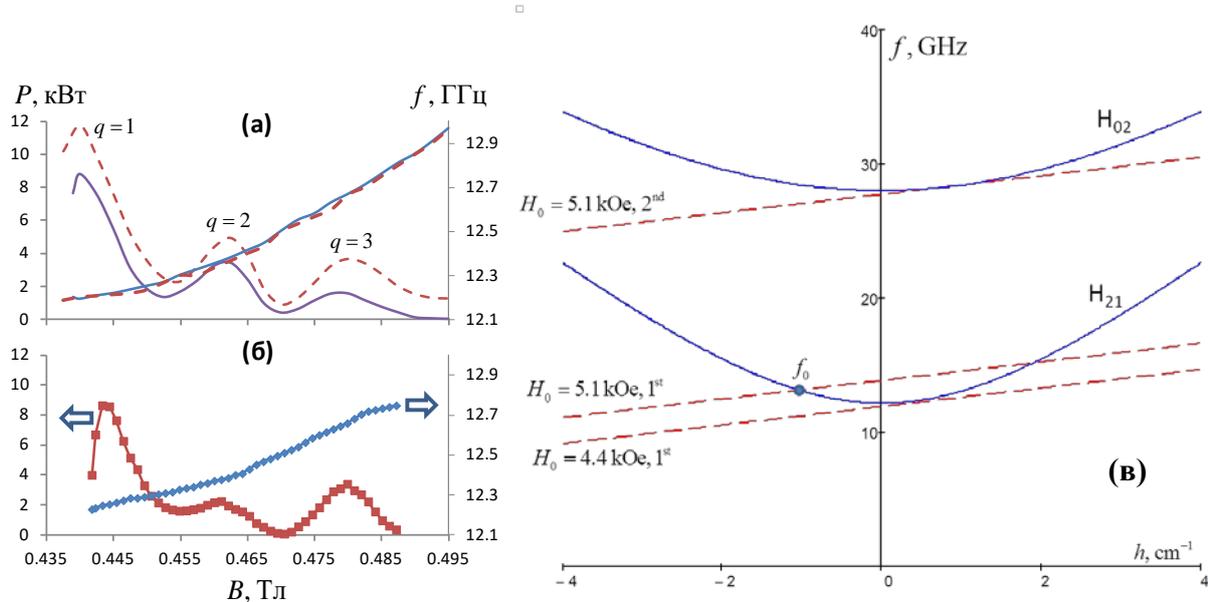
6. В результате экспериментального исследования гиротронного комплекса с магнитно-экранированной системой была достигнута устойчивая генерация рабочей моды на основном циклотронном резонансе на уровне мощности 20 кВт при токе электронного пучка 2.1 А и ускоряющем напряжении 23 кВ при энергопотреблении соленоида 13 кВт. Результирующий КПД всего комплекса составил около 32 %, что в 1.5 раза превышает аналогичный параметр существующих коммерческих технологических комплексов.

# ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ГИРОТРОНАМИ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ.

## 1.1 Экспериментальная демонстрация возможности расширения полосы плавной перестройки частоты генерации в гиротронах с укороченным резонатором.

Одной из актуальных задач в области гиротроники является возможность плавной перестройки частоты генерации. Одним из известных способов перестройки частоты является работа гиротрона в режиме ЛОВ, что дает возможность работать с продольными вариациям ВЧ-поля при увеличении магнитного поля. Однако, мощность генерации драматически падает уже начиная со второй продольной вариации. В первую очередь это связано с особенностями работы в данном режиме, так как появляется зависимость от продольного разброса скоростей:  $\omega = s\Omega + hv_{\parallel}$ . Для уменьшения влияния данного эффекта в работе [21] было предложено использовать короткие резонаторы. Было показано, что максимально достижимый индекс продольной моды определяется именно разбросом скоростей электронов:  $q < \frac{2}{g^2 \delta v_{\perp}} = \frac{2}{\delta v_{\parallel 0}}$ . Разброс скоростей электронов приводит к дополнительному разбросу электронно-волновой фазы по отношению к волновой и данный эффект усиливается при увеличении длины области электронно-волнового взаимодействия:  $\delta\omega = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{g^2 L \delta v_{\perp}} \right)^2 = \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{v_{\parallel 0}}{\mu \delta v_{\perp}} \right)^2$ , где  $\delta\omega$  – полоса перестройки, а  $\mu = \pi g \beta_{\perp 0} L / \lambda$  – характерная длина области взаимодействия.

Для проверки теоретических исследований был проведен эксперимент с использованием существующего технологического гиротрона 28 ГГц, TE<sub>0,2</sub>, 20 кВ / 2 А на второй циклотронной гармонике. Для проведения эксперимента режим генерации был сменен на работу на основном циклотронном резонансе с частотой генерации 12,2 ГГц на моде TE<sub>2,1</sub>. На более низкой частоте безразмерная длина резонатора уменьшилась с  $\mu = 17$  до  $\mu = 4$ . При основном резонансе ток пучка был достаточно велик для возбуждения продольных мод высокого порядка. Дополнительный диск из нитрида бора использовался для согласования окна вывода на частоте 12,5 ГГц.



**Рис. 1.** Зависимость мощности  $P$  и частоты излучения  $f$  от магнитного поля  $B$  в гиротроне: (а) PIC-моделирование (пунктирные линии соответствуют нулевому начальному разбросу скоростей, сплошные линии - разбросу 20%;  $q$  - продольный индекс моды); (б) экспериментальные данные, (в) – дисперсионная характеристика возбуждения мод на первой и второй гармониках.

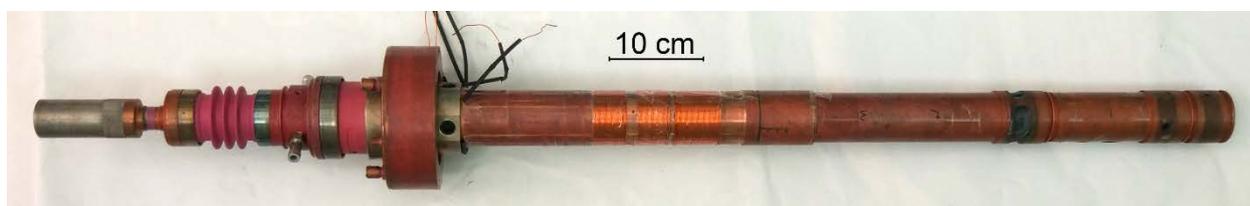
В результате экспериментов была подтверждена возможность генерации выходной мощности на уровне более 1 кВт в полосе перестройки частоты более 4% [4А] при осуществлении генерации вплоть до третьей продольной вариации рабочей моды резонатора гиротрона. Данные экспериментального исследования и результаты численного моделирования находятся в хорошем соответствии друг другу, что подтверждает корректность расчетных моделей. Полученные результаты могут быть использованы в случае широкополосной ступенчатой перестройки частоты гиротрона при работе на близких модах. В таком случае, работа на продольных вариациях рабочих мод может послужить связующим звеном между модами и обеспечить плавную широкополосную перестройку.

### 1.2 Повышение КПД гиротрона на второй гармонике с частотой генерации 30 ГГц и мощностью более 10 кВт за счет профилирования магнитного поля в рабочем пространстве резонатора.

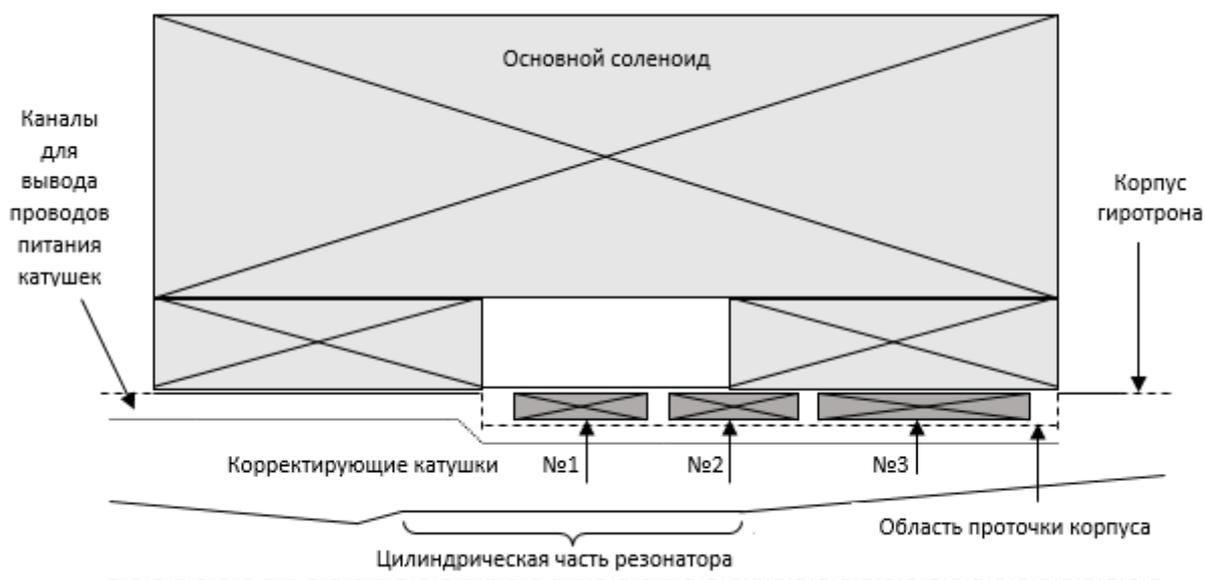
Поскольку принцип работы гиротрона основан на использовании циклотронного резонанса электронов, движущихся в магнитном поле, с быстрой электромагнитной волной, очевидно, что профилирование магнитного поля – изменение резонансных условий по мере изменения энергии электронов – должно оказывать значительное влияние на выходные характеристики: мощность, эффективность и частоту генерации. Влияние продольного профиля магнитного поля на режим генерации гиротрона исследовалось в ряде работ [6–9], однако число экспериментов, подтверждающих сделанные предположения, явно недостаточно. В данном параграфе будет

описана работа, посвящённая оптимизации и экспериментальной верификации влияния профиля магнитного поля на режим генерации гиротрона с рабочей частотой 30 ГГц, предназначенного для технологических приложений.

**Влияние магнитного поля на КПД гиротрона.** Для моделирования изменения профиля магнитного поля при включении дополнительных катушек была использована программная среда ELCUT [31]. На первом этапе был рассчитан профиль основного соленоида с учетом имеющихся данных о параметрах намотки. Результаты совпали с экспериментальными данными, полученными измерителем магнитной индукции Ш1-8 с использованием датчика Холла. На втором этапе рассчитаны и проанализированы параметры дополнительных катушек, которые могли бы быть намотаны на корпус гиротрона в области резонатора, с учетом технологических ограничений, налагаемых геометрией лампы и проходным отверстием основного соленоида.



(а)



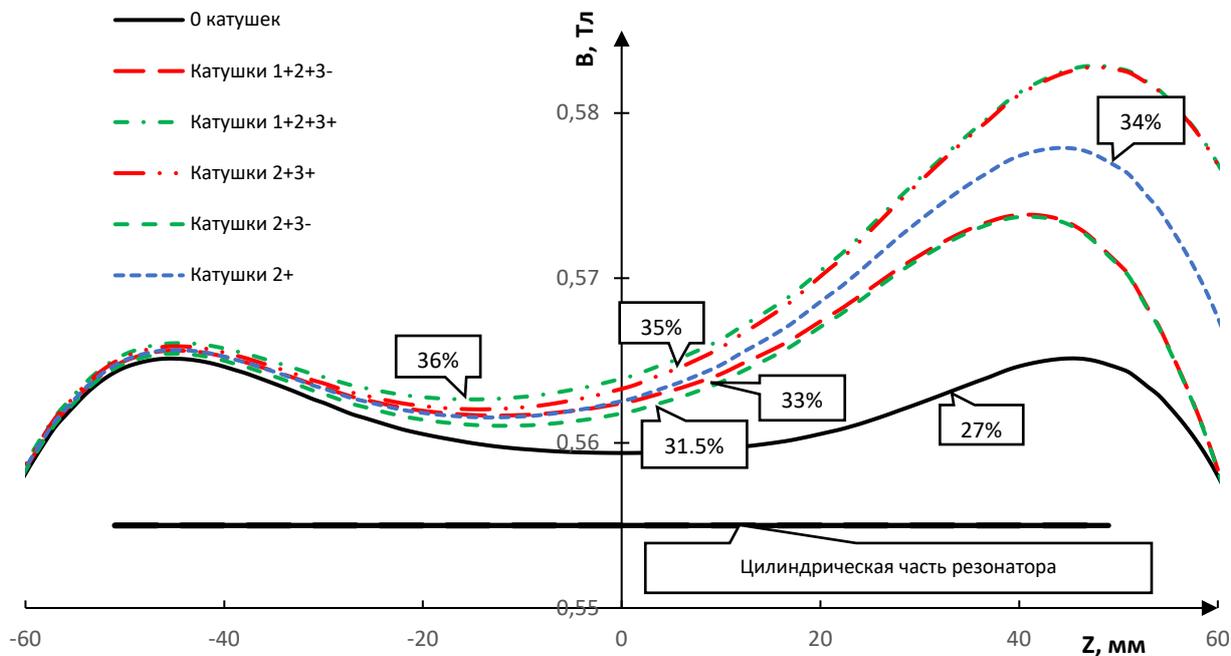
(б)

*Рис. 2. Схема магнитной системы.*

Исходя из полученных данных, было принято решение намотать три независимые катушки, что, с одной стороны, позволило с хорошей точностью создавать требуемое дополнительное магнитное поле, а с другой – минимизировало число дополнительных источников питания. Диаметр отверстия магнитной системы равен 60 мм, зазор между стенкой соленоида и корпусом

лампы первоначально составлял 0.1–0.2 мм. Для установки корректирующей магнитной системы была осуществлена проточка корпуса глубиной 1 мм в области расположения резонатора. Катушки намотаны проводом круглого сечения диаметром 1 мм, а для вывода контактных проводов обмоток в области проточки выполнены более глубокие канавки шириной и глубиной 1.1 мм. Минимальная толщина стенки каркаса в области канавок достаточна для соблюдения условий механической прочности. Ток в катушках, требуемый для изменения поля основного соленоида на 1%, равен около 20 А. Схема размещения дополнительных катушек в основной системе показана на рис. 2. Положение гиротрона относительно основного соленоида оптимизировалось с целью достижения максимального КПД. На рис. 3 представлены профили магнитного поля в области пространства взаимодействия при различных вариантах включения дополнительных катушек и для каждого профиля даны значения максимального достигнутого КПД генерации. Результаты эксперимента подтверждают ранее сделанные утверждения [9], что КПД может быть значительно увеличен путем коррекции профиля магнитного поля дополнительными катушками с малым энергопотреблением (поле, создаваемое дополнительными катушками, составляет около 1% от поля основного соленоида). Как известно, в ряде случаев коррекцию магнитного поля можно осуществить за счет ферромагнитных экранов, но их использование ограничено относительно низкими (порядка 1 Тл) магнитными полями в силу насыщения ферромагнетиков. С другой стороны, известны случаи использования дополнительного соленоида для коррекции напряженности (но не профиля) магнитного поля в области цилиндрического участка резонатора гиротрона для быстрой подстройки условий циклотронного резонанса (циклотронной частоты электронов) в системах со сверхпроводящими соленоидами, работающими в замкнутом режиме с отключенными тоководами. В этой ситуации использование системы катушек представляет интерес для повышения КПД гиротронов мегаваттного уровня мощности для управляемого термоядерного синтеза, где важную роль играет изменение КПД даже на 1%.

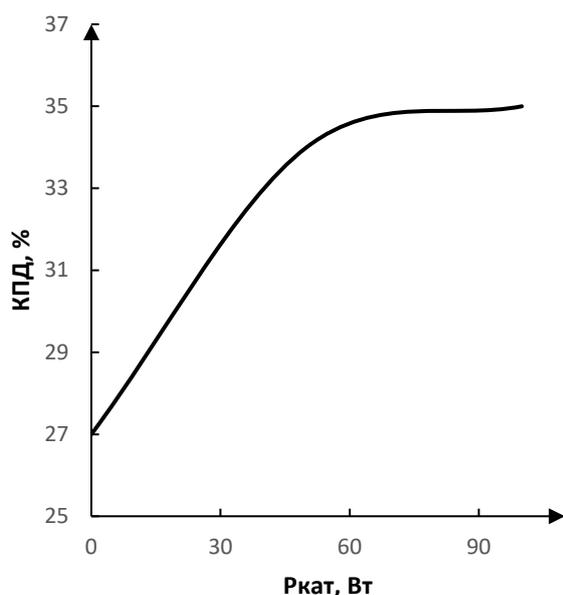
В проведенных экспериментах с технологическим гиротроном эффективность генерации возросла более чем на треть (с 27 до 36%) по сравнению с режимом без дополнительных катушек. Согласно результатам эксперимента, основной вклад в повышение КПД дает включение катушки № 2, формирующей плавно нарастающее к концу области взаимодействия распределение поля, что согласуется с теоретическими оценками [9].



**Рис. 3.** Результаты моделирования распределения магнитного поля при различном режиме работы секции корректирующих катушек. Для каждого профиля магнитного поля приведены экспериментальные значения КПД генерации гиротрона. Продольное положение резонатора гиротрона неизменно. Полярность подключения соответствующих катушек обозначена знаком “+” для сонаправленного и знаком “-” для противоположно направленного включений относительно магнитного поля основного соленоида.

Эффективное влияние этой катушки наблюдалось во всем диапазоне исследованных режимов (по току катушки), в то время как независимое включение катушки № 1 оказывало влияние лишь при малых рабочих токах (не выше 1 А) и вызывало изменение КПД всего на 1–2%. Следующий наблюдаемый эффект, по-видимому, относится к области послерезонаторного взаимодействия (after cavity interaction). Известными теоретическими оценками [32–34] предсказана возможность снижения КПД прибора в случае, если возникает область циклотронного резонанса в спадающем магнитном поле при соответствующем расширении электродинамического канала в области между резонатором и коллектором. При определенном соотношении расстройки циклотронного резонанса возможна ситуация, когда часть энергии волны перекачивается обратно в электронный пучок. В силу малой длины участка, на котором выполняется указанное условие, изменение КПД, обусловленное этим эффектом, не слишком велико. Однако путем разнонаправленного включения катушек № 2 и № 3 можно организовать более резкое падение магнитного поля и устранить условия паразитного резонанса, что приведет к увеличению КПД (1% при максимально возможных в данном эксперименте токах  $I_2 = 20$  А и  $I_3 = -20$  А в катушках).

Можно утверждать, что плавное нарастание магнитного поля к концу пространства взаимодействия даст гораздо более сильный эффект, чем резкий спад магнитного поля после резонатора, специально созданного встречным включением катушек. Можно оценить энергетические затраты на профилирование магнитного поля исходя из данных, представленных на рис. 4. Видно, что присутствует момент насыщения, который зависит от многих параметров и должен быть рассчитан для каждого прибора и режима работы отдельно. Вместе с тем требуемая мощность в десятки ватт более чем на два порядка меньше, чем мощность основного соленоида, т.е. обсуждаемый метод не ведет к значительному усложнению или повышению стоимости магнитной системы.

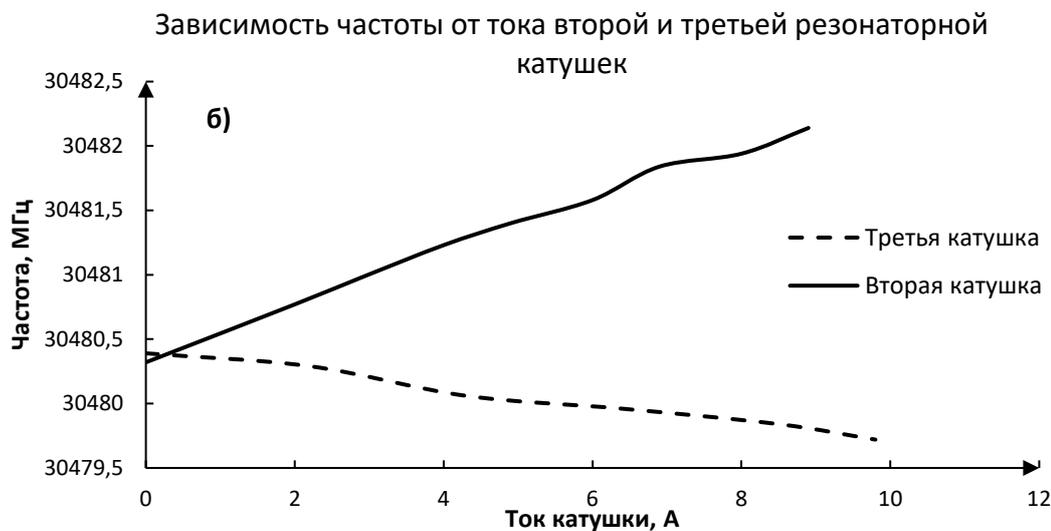
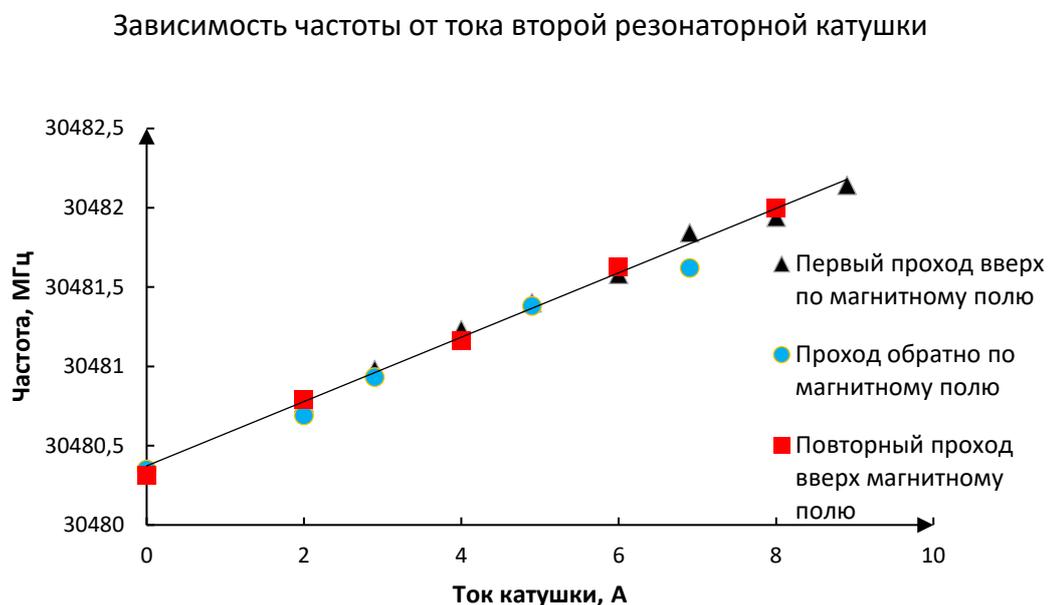


**Рис. 4.** Зависимость КПД генерации от мощности, потребляемой корректирующими катушками.

Эффект повышения КПД гиротрона за счет профилирования магнитного поля в области резонатора, продемонстрированный в данном разделе, может быть использован и для более мощных и высокочастотных гироприборов. Несмотря на то, что мощность дополнительных катушек будет расти с увеличением как поперечных размеров лампы при росте генерируемой мощности, так и дополнительного магнитного поля при росте частоты излучения, исследованная схема представляется перспективной для широкого класса гиротронов, особенно в случае удачной интеграции дополнительных катушек в корпус прибора.

**Управление частотой генерации.** Как известно, эффективным методом управления частотой генерации гиротронов является изменение магнитного поля в области взаимодействия. Управление частотой за счет дополнительной катушки, изменяющей магнитное поле по всей длине однородного участка резонатора, было исследовано в работе [22] и успешно применяется в гироприборах, использующих криомагниты [23, 24] или системы на постоянных магнитах [25, 26]. В данной работе экспериментально исследовалась возможность управления частотой за счет изменения магнитного поля на достаточно узком участке в конце области взаимодействия, что позволяет уменьшить индуктивность катушки и характерное время перестройки. Экспериментальные зависимости, полученные с использованием анализатора спектра Keysight N9010A (от 10 Гц до 44 ГГц), представлены на рис. 5. Как и следовало ожидать, при включении катушки № 1, расположенной в центральной части резонатора, происходило сильное смещение зоны генерации (изменение расстройки циклотронного резонанса), что сопровождалось

снижением эффективности генерации. Включение катушек № 2 и/или № 3 слабо сказывалось на выходной мощности и эффективности. Как следует из анализа рис. 5а, изменение тока катушки № 2 дает большую полосу перестройки частоты. Более детальные данные для вариации тока катушки № 2 представлены на рис. 5б.



**Рис. 5.** Зависимость частоты генерации: а – от тока дополнительных катушек № 2 и № 3; б – от тока дополнительной катушки № 2.

В этой серии экспериментов поле основного соленоида было отстроено от оптимального значения, соответствующего режиму максимального КПД. При наблюдаемой ширине спектра излучения 0,2 МГц чувствительность частоты генерации к току дополнительной катушки составила 1 МГц/А. Индуктивность вспомогательной катушки для подстройки частоты равна 70 мкГн, что более чем на порядок меньше аналогичной величины для катушки, использованной для стабилизации частоты в работе [22].

С учетом ограничений, накладываемых ослаблением переменного магнитного поля корпусом прибора (скин-эффект), характерная частота варьирования поля составила около 10 кГц [27], что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системам модуляции (стабилизации) частоты гиротронов для управляемого термоядерного синтеза. В перспективе возможна реализация схемы фазовой автоподстройки частоты гиротрона с использованием маломощной катушки индуктивности, установленной в выходной области пространства взаимодействия.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают возможность значительного увеличения КПД гиротронов за счет коррекции магнитного поля в области резонатора. В технологическом гиротроне на второй гармонике гирочастоты при выходной мощности 10 кВт на частоте 30 ГГц получено увеличение КПД в 1.3 раза (с 27 до 36%) по сравнению с режимом работы при однородном магнитном поле. Исследованы возможности перестройки частоты генерации и показано, что для этой цели достаточно изменять поле только на выходном конце резонатора. Полученные результаты могут представлять интерес для повышения КПД, а также управления частотой гиротронов мегаваттного уровня мощности для управляемого термоядерного синтеза, в которых быстрое изменение основного магнитного поля затруднительно в силу большой индуктивности обмотки криомагнита.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГИРОТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ.**

### **2.1 Разработка магнито-экранированных систем для гиротронных комплексов**

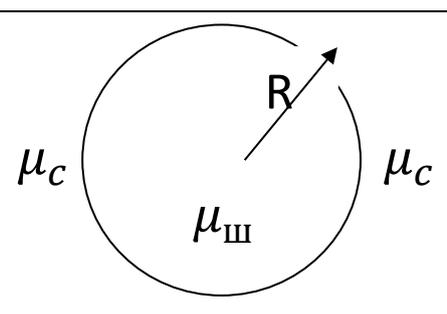
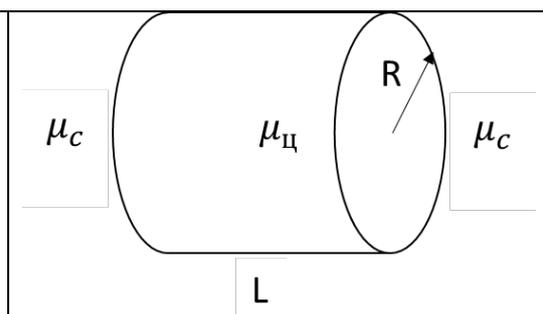
#### **2.1.1 Методика расчета магнитоэстатического поля. Оценка точности расчета на примере тестовых задач**

Значительная часть мощности питания гиротронного технологического комплекса идет на создание магнитного поля, формируемого основным соленоидом. Эффективным способом снижения мощности питания соленоида является экранировка магнитного поля вне рабочего пространства прибора. Наиболее простой и дешевый способ экранировки статического магнитного поля основан на использовании ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью  $\mu \gg 1$ . Как известно, ферромагнетик представляет из себя среду с малым магнитным сопротивлением, поэтому если окружить соленоид гиротрона экранами из такого материала, то силовые линии поля рассеяния практически полностью замыкаются внутри ферромагнетика, и объем, занимаемый полем, резко сокращается. Соответственно, при фиксированной мощности питания это позволяет увеличить максимальное значение магнитного поля  $B_{\max}$ , либо наоборот – снизить мощность питания при сохранении величины  $B_{\max}$ .

В качестве прототипа магнитной системы гиротрона с экранированным соленоидом был взят существующий 3-секционный «теплый» магнит, использовавшийся ранее в гиротроне на

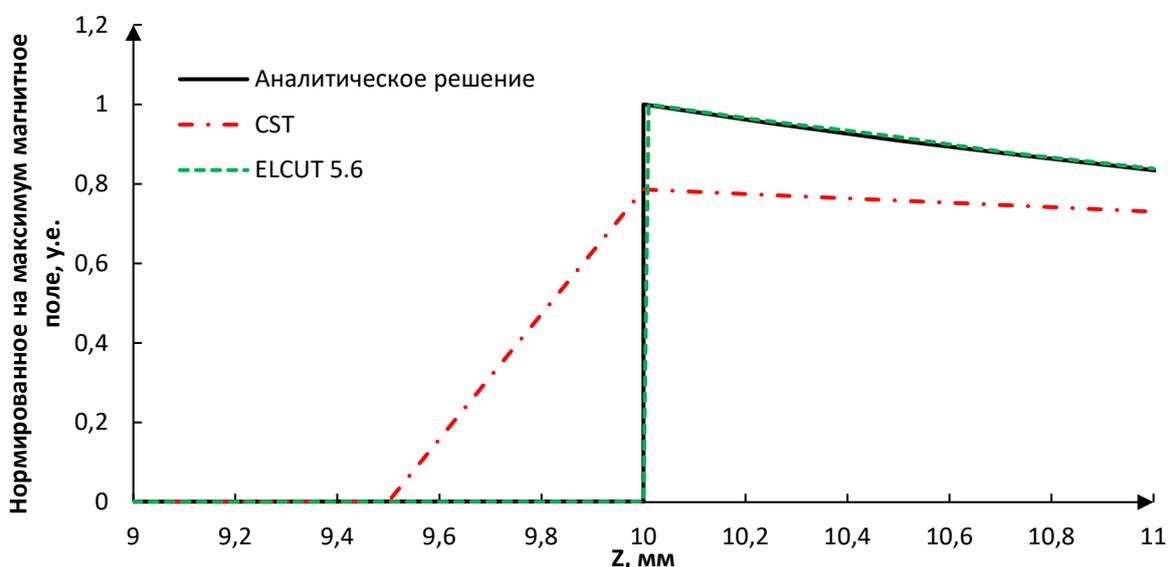
второй циклотронной гармонике. Указанная магнитная система обеспечивала индукцию в центре резонатора до 0.5 Т при длине однородного участка 100 мм. Далее указанная магнитная система окружалась системой ферромагнитных экранов, форма которых варьировалась с целью получения поля около 0.9 Т с длиной однородного участка 80 мм при минимальных энергозатратах на питание соленоида.

Расчет магнитного поля соленоида, окруженного ферромагнитными экранами представляет из себя достаточно сложную магнитостатическую задачу, которую в общем случае можно решить только численными методами. Существует достаточно много пакетов прикладных программ, способных решить указанную задачу. Ниже использовались комплексы CST Studio Suite и ELCUT. При численном решении задачи всегда возникает проблема оценки точности используемого численного метода. Указанную оценку, как и настройку счетных параметров (в частности – шагов сеток) целесообразно проводить на примере простых задач, которые легко решаются аналитически. Аналитическое решение задач нахождения ферромагнитных шара и цилиндра в однородном магнитном поле сведено в таблицу 1.

Таблица 1. Аналитическое решение распределения магнитного поля в ферромагнитных шаре и цилиндре.	
	
Напряженность магнитного поля внутри ферромагнетика однородна и аналитически выражается по формуле:	
$H_i = H_0 * \frac{3\mu_c}{2\mu_c + \mu_{ш}}$	$H_i = H_0 * \frac{2\mu_c}{\mu_c + \mu_{ш}}$
Напряженность внешнего магнитного имеет две компоненты:	
$H_{er} = H_0 * \left(1 - \frac{2R^3}{r^3} \frac{\mu_c - \mu_{ш}}{2\mu_c + \mu_{ш}}\right) \cos\theta$ $H_{et} = H_0 * \left(1 + \frac{R^3}{r^3} \frac{\mu_c - \mu_{ш}}{2\mu_c + \mu_{ш}}\right) \sin\theta$	$H_{er} = H_0 * \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \frac{\mu_{ш} - \mu_c}{\mu_c + \mu_{ш}}\right) \cos\theta$ $H_{et} = -H_0 * \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \frac{\mu_{ш} - \mu_c}{\mu_c + \mu_{ш}}\right) \sin\theta$

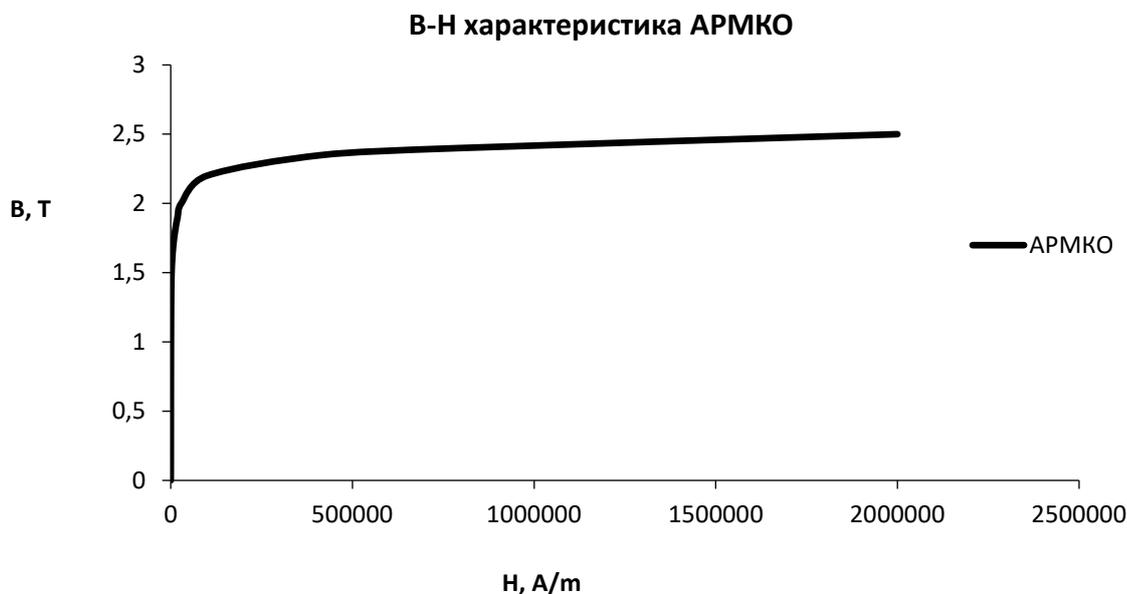
Далее, каждая из задач моделировалась в среде CST Studio Suit и ELCUT 5.6. Результаты аналитического и численного расчета в среднем различаются в масштабах 1 %, однако, присутствуют сильные скачки относительной погрешности на границе сред. Результаты сравнения моделирования в программах CST и ELCUT 5.6 и аналитических расчетов приведены

на рис. 6. Расхождение в полученных данных на границе двух сред прежде всего связано с качеством расчетной сетки. В программе ELCUT 5.6 размер ячейки треугольной сетки был выбран 0.1 мм, в CST Studio Suite вне ферромагнетика – 4 мм, внутри 1 мм. Причиной выбора таких размеров сеток было соответствие обеих программ быстрому расчету – менее получаса. Отметим, что даже в этом случае время расчета на CST более, чем на порядок уступало ELCUT 5.6. При задании сложной геометрии ферромагнетика лучше использовать как можно меньший размер ячейки сетки. С этой точки зрения ELCUT 5.6 имеет преимущество, так наличие адаптивной треугольной сетки с возможностью задания размера ячейки в определенной области значительно оптимизирует время расчета. Временные затраты трехмерного расчета электромагнитов с ферромагнитными вставками в CST Studio Suite усугубляются рассмотрением случая с магнитомягкими материалами с  $\mu \neq const$ .



**Рис. 6.** Сравнение результатов моделирования и аналитического расчета магнитного поля на границе свободного пространства и ферромагнетика

Добавление в задачу реальной В-Н характеристики металлов требует еще более точной сетки, которая влияет на процесс сходимости итерационного решения. Поэтому дальнейшие расчеты проводились на базе ELCUT 5.6, что значительно ускорило процесс оптимизации магнитных систем со сложной геометрией ферромагнетиков с нелинейной В-Н характеристикой. В качестве такого материала рассматривался наиболее доступный и дешевый сплав марки «АРМКО», имеющий насыщение вне рассматриваемых диапазонов магнитных полей (см. рис. 7).



*Рис. 7. В-Н характеристика сплава АРМКО.*

2.1.2 Оптимизация магнитной системы с различной конфигурацией ферромагнитных экранов для 24 ГГц / 25 кВт технологического гиротрона

Предыдущие результаты показали, что моделирование магнитных систем с наличием различных магнитомягких элементов позволяет производить расчеты с приемлемой точностью. Поэтому следующим этапом стала оптимизация энергопотребления основной магнитной системы с различной конфигурацией ферромагнитных экранов для гиротрона на 24 ГГц.

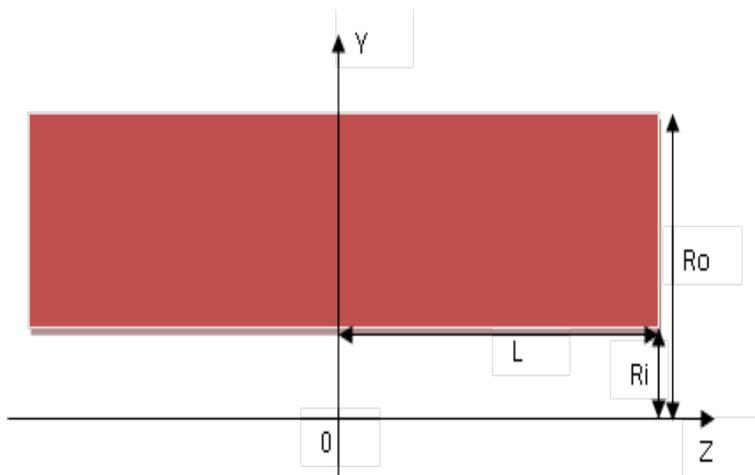
В качестве прототипа была взята действующая магнитная система, обеспечивающая поле до 0.67 Тл, которая позволяет работать как на 24 ГГц, так и на 28 ГГц на второй гармонике циклотронного резонанса. Ее геометрические размеры приведены в Таблице 2. Она состоит из трех соленоидов прямоугольного сечения (см. рис.9): основного и двух корректирующих.

<i>Таблица 2. Параметры магнита</i>					
<b>Соленоид, <math>\lambda=0.8</math></b>	<b>Ri, мм</b>	<b>Ro, мм</b>	<b>L, мм</b>	<b>Zc, мм</b>	<b>Bsob, Гс</b>
<b>Основной</b>	40	138	105	0	6333
<b>Левый и правый корректирующий</b>	35	40	25	-40/40	83,4

Здесь соответственно **Ri**, **Ro** внутренний и внешний радиусы соленоида, **L** -полуширина, **Zc** -положение центра, **Bsob** индукция в центре.

Первый этап расчетов заключался в подборе токов и витков катушек, обеспечивающих нужную индукцию в центре и, одновременно, требуемую степень однородности магнитного поля

в области резонатора длиной  $8-10 \lambda$  в системе без экранов. Для расчетов использовались хорошо известные соотношения теории катушек прямоугольного сечения [35].



**Рис. 8.** Схема использованных при расчете поля каждой катушки условных обозначений.

Для того, чтобы спроектировать соленоид, создающий заданное магнитное поле в центре, необходимо обратиться к формулам (1)-(5). Для моделирования любых магнитных систем в программах типа ELCUT и CST помимо геометрических размеров требуется задать параметр  $I * N$  (ампер-витки), где  $I$  – ток обмоток соленоида, а  $N$  – количество его витков. Для этого необходимо оценить

по формуле (1) плотность тока  $j$  соленоида. Результата вычисления  $j$  при задании  $H_0$ [Гс], коэффициенте заполнения  $\lambda$  (обычно 0.8) и геометрических данных в [см] имеет размерность  $[\frac{A}{cm^2}]$ .

$$(1) \quad j = \frac{10 * H_0}{4 * \pi * Ri * \beta * \lambda * \ln \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}}}, \quad \text{где } \alpha = \frac{Ro}{Ri}, \quad \beta = \frac{L}{Ri}$$

Этот параметр также очень важен для понимания того, какая система охлаждения требуется для работы электромагнита. В традиционных «теплых» соленоидах с масляным охлаждением плотность тока обычно составляет не более  $11 \text{ A/mm}^2$ . Далее, по формуле (2), получаем параметр  $I * N$ .

$$(2) \quad I * N = j * S_{\text{катушки}} * \lambda$$

Следующим шагом является оценка потребляемой мощности магнитной системы, которая может быть найдена по формуле (3):

$$(3) \quad W = 2 * \pi * \rho * j^2 * \lambda * Ri^3 * (\alpha^2 - 1) * \beta$$

Это даст понимание, какие потребуются источники питания, а именно их параметры напряжения  $U$  и электрического тока  $I$ . Важнее всего представлять значение силы тока, так как именно оно будет определять сечение используемого для намотки провода при заданной плотности тока (см. формула (4)).

$$(4) \quad S_{\text{провода}} = \frac{I}{j}$$

Полученная информация даст возможность сделать верный выбор шины, используемой для создания магнита. Кроме этого, имея достаточно сведений, по формуле (5) легко получить значение  $N$ , которое вместе с  $S_{\text{провода}}$  дает исчерпывающую информацию для точного

проектирования соленоида (размещение витков внутри магнита с учетом поперечных размеров провода и наличием отверстий для протока охлаждающей жидкости).

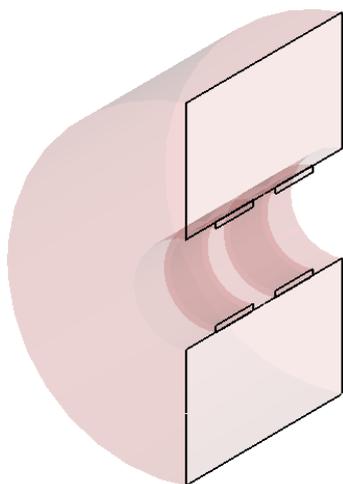
$$(5) \quad N = \frac{S_{\text{катушки}} * \lambda}{S_{\text{провода}}}$$

Таким образом можно создать проект магнитной системы в средах ELCUT и CST с дальнейшим процессом оптимизации, рассмотренным далее. Результаты расчетов магнитной системы на 0.67 Тл сведены в Таблицу 3. Стоит отметить, что важной особенностью было сохранение потребляемой мощности соленоидов на уровне, позволяющем использовать существующие источники питания. Кроме того, необходимо было, чтобы плотность тока позволяла использовать существующую систему охлаждения.

*Таблица 3. Расчётные параметры катушек индуктивности*

Катушка	$B$ , Тл	$j$ , $\frac{A}{\text{мм}^2}$	$I$ * $N$ , Гс * мм	$I$ , А	$N$	$W$ , Вт
<b>Главная</b>	0.6333	8.3	1.38 * $10^5$	52.764	2750	8150
<b>Боковые</b>	0.00834	3	598	52.764	34	4.8

Из Таблицы 3 видно, что основной нагрев в данной системе будет в основном соленоиде. Но для существующей системы охлаждения данная плотность тока не является критичной. Используя данные Таблиц 2 и 3, в программе CST была спроектирована модель магнитной системы, состоящей из трех катушек, которая изображена на Рис. 9.



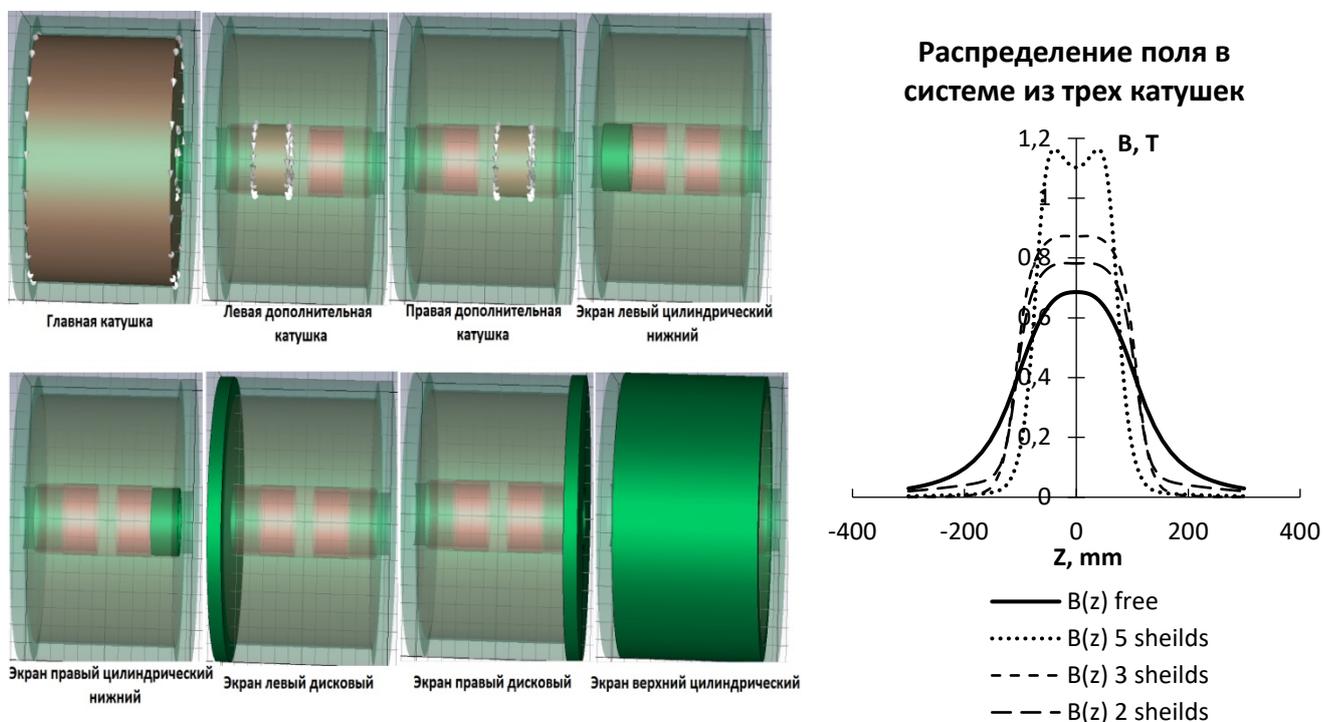
*Рис. 9. Модель системы из трех катушек в программе CST*



*Рис. 10. Распределение поля в системе из трех катушек*

Результаты распределения магнитного поля в данной системе приведены на Рис. 10. Максимальное значение магнитного поля в центре симметрии основного соленоида совпадает с требуемым значением с хорошей точностью.

На следующем этапе проектирования данная магнитная система была окружена различными наборами ферромагнитных экранов с целью оценки эффективности экранировки и соответствующей степени усиления рабочего магнитного поля в области электронно-волнового взаимодействия. Отметим, что для сокращения времени расчета в данном этапе оптимизации разумно было рассматривать ферромагнетики с  $\mu = const$ . На рис. 11. показана последовательная трансформация профиля магнитного поля при добавлении ферромагнитных экранов. Сначала были установлены только дисковые боковые экраны, затем к ним добавлен верхний цилиндрический, и наконец – два симметричных внутренних цилиндрических экрана, находящихся внутри соленоида.

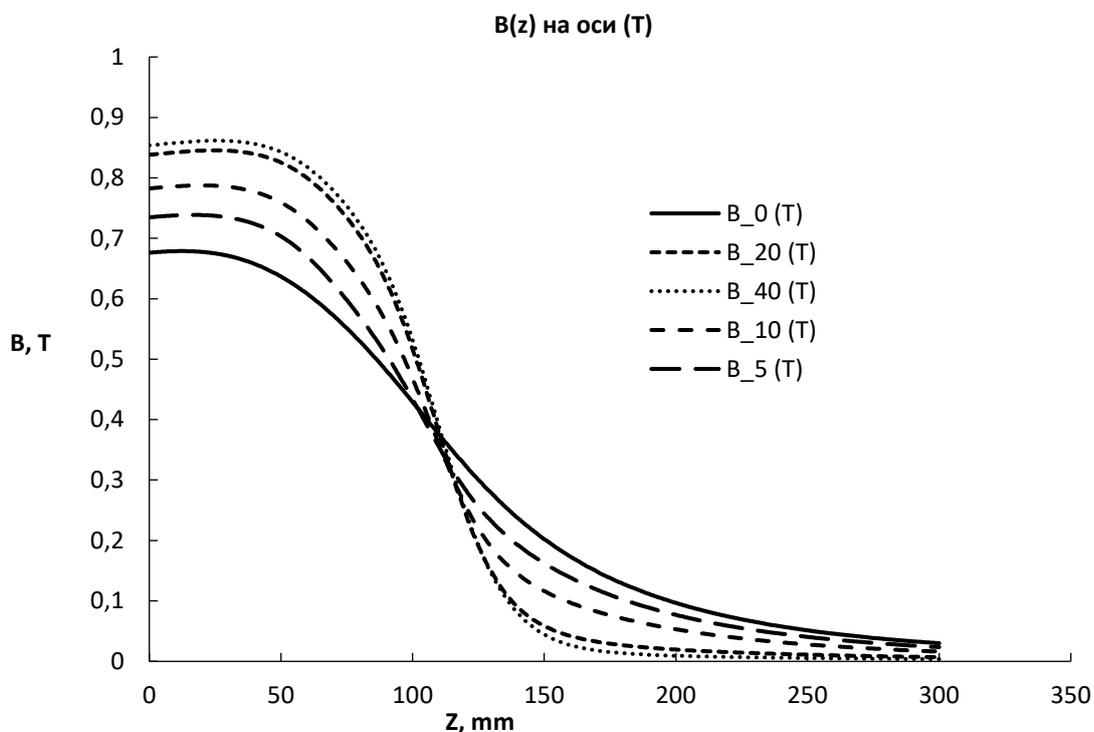


**Рис. 11.** Сравнение результатов распределение магнитного поля в системе из трех катушек с наличием двух, трех и пяти экранов.

Из анализа данных следует, что наибольшего эффекта усиления поля удастся добиться в системе с 5-ю экранами. Поэтому в дальнейших исследованиях анализировалась именно такая конфигурация. Здесь поле возрастает почти вдвое при тех же энергозатратах на питание катушек. Однако распределение в области резонатора становится существенно неоднородным. В центре магнитного поля появился минимум, который можно выровнять, установив в центр маломощную дополнительную катушку.

Очевидно, при прочих равных условиях, степень экранировки тем больше, чем толще экраны. Но при этом существенно возрастают габариты и особенно – вес системы. Кроме того, эффект экранировки нелинейно зависит от толщины ферромагнетика  $d$  и, начиная с некоторых  $d$ , выигрыш в степени экранировки становится незначительным.

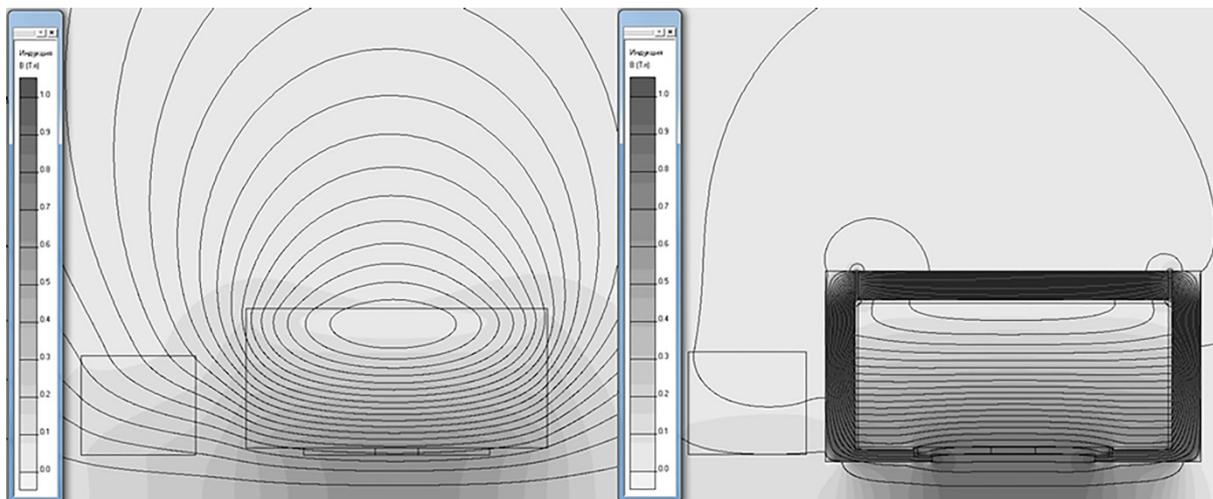
Поэтому далее анализировались варианты с различными толщинами внешних экранов при наличии реальной нелинейной В-Н характеристики сплава «АРМКО». Достаточно быстрый счет ELCUT 5.6 (1-5 минут) позволил использовать очень точную треугольную расчетную сетку и оценить различные толщины экранов, представленные на рис. 12. В ходе моделирования рассматривались экраны толщиной 5, 10, 20 и 40 мм, как цельковые, так и разбитые на несколько секций. Необходимо было понять, как влияет эффект дробления целикового экрана на секции на распределение магнитного поля в системе. Результаты данных исследований (см. рис. 12) показали, что самым оптимальным является использование 20 мм экрана.



**Рис. 12.** Сравнение результатов моделирования распределения магнитного поля с наличием ферромагнитных экранов различных толщин и конфигураций, выполненных с помощью Elcut 5.6.

В легенде число отвечает за толщину экрана в мм.

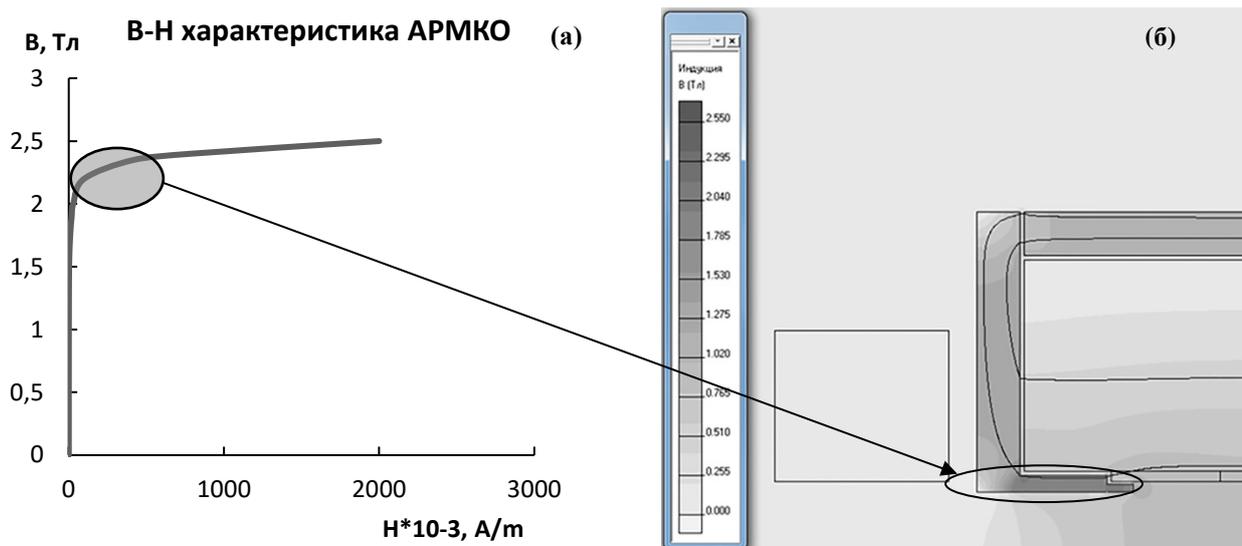
Оптимизация формы и расположения экранов, в совокупности с оптимизацией расположения и формы корректирующих соленоидов малой мощности, позволяет обеспечить большую степень однородности магнитного поля (вариация поля не превышает 0.5%) на длине, оптимальной с точки зрения электронно-волнового взаимодействия (на первой циклотронной гармонике, как правило, 5-7 длин волн) [36].



*Рис. 13. Карта силовых линий магнитного поля в системе без экранов (слева) и с экранами (справа). Градации цвета указывают величину модуля магнитного поля. Прямоугольником слева указано положение катодной корректирующей катушки.*

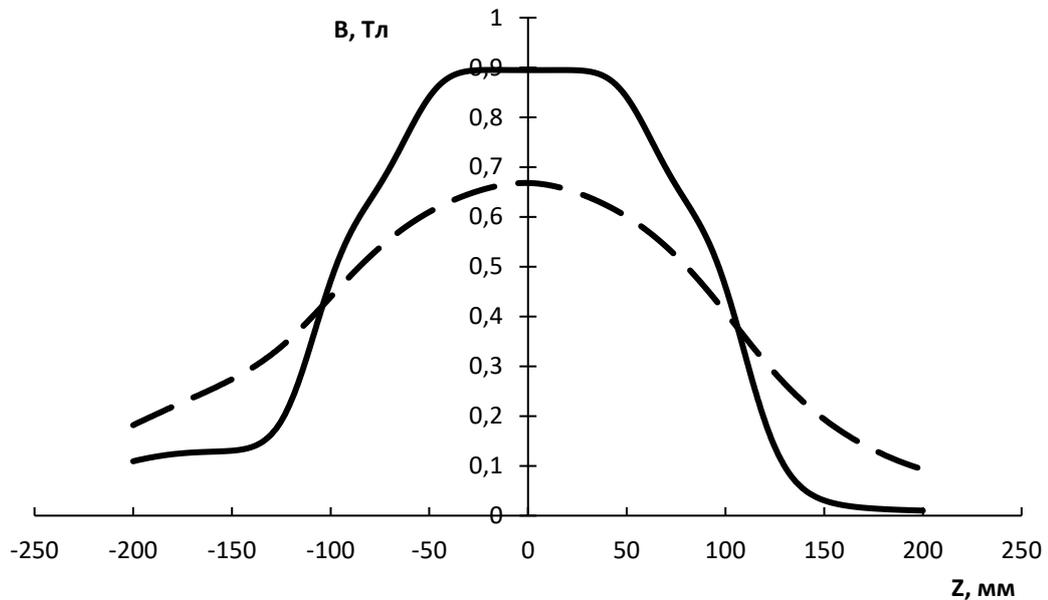
Экранировка поля осуществлялась набором дисковых и цилиндрических экранов, расположенных по бокам, а также снизу и сверху от основного соленоида (рис. 13). Для точной подстройки формы продольного распределения магнитного поля  $B_z(z)$  внутри резонатора использовались три маломощных катушки, расположенных внутри основного соленоида (см. рис. 13). Моделирование магнитной системы осуществлялось методом конечных элементов с помощью программы ELCUT 5.6. Для обеспечения высокой точности расчета характерный размер элемента сетки выбирался много меньше минимальной толщины экрана, а для получения высокой скорости расчетов применялась неэквилидистантная сетка. Общее число узлов в расчетной области составляло около 1 миллиона, время расчета одного варианта на персональном компьютере с тактовой частотой процессора 3 ГГц – около 7 мин. Расчеты проводились для экранов из различных магнитомягких материалов. Результаты моделирования показали, что наиболее простым и дешевым, а, следовательно, и более перспективным является использование сплава марки АРМКО с реальной В-Н характеристикой, представленной на рис. 14а. Следует отметить, что учет нелинейности В-Н характеристики принципиально важен для адекватного расчета распределения поля и его величины, поскольку из-за нелинейности  $B(H)$  эффект экранировки проявляется заметно слабее, чем это следует из анализа, сделанного в приближении с  $\mu = \text{const} \gg 1$ . В частности, за счет насыщения В-Н характеристики (рис. 14а) максимальная величина индукции увеличивается в 1.4 раза, в то время как в рамках линейной теории коэффициент увеличения равен 2. Следует отметить, что данное расхождение проявляется тем существеннее, чем больше величина рабочего магнитного поля. Это объясняется тем, что в области сильных магнитных полей вблизи нижних цилиндрических экранов соответствующая рабочая точка на В-Н характеристике оказывается в области насыщения (рис. 14 б) и величина  $\mu$  составляет лишь 4.5

при интенсивности магнитного поля внутри металла 2.3 Т. Соответственно, степень экранировки сильно падает.



**Рис. 14** Используемая  $B-H$  характеристика (а) и области насыщения (б) (отмечены овалом).

Оптимизация формы и расположения всех перечисленных выше элементов магнитной системы позволила получить распределение поля, представленное на рис. 15. Установка экранов позволила поднять максимум поля с 0.66 Т (в отсутствии экранов) до 0.89 Т и обеспечить на длине 80 мм степень неоднородности магнитного поля не более 1%. Две боковые катушки формируют четкие границы однородного участка, за счет наличия рядом внутренних цилиндрических ферромагнитных экранов. В традиционных магнитных системах оптимизация длины однородного участка может происходить варьированием длины основного соленоида или расположения корректирующих катушек. В случае экранированных систем, где внутренние экраны играют важную роль в величине используемого эффекта экранировки, возможности по увеличению длины однородного участка такими способами ограничены. В первую очередь, это связано с тем, что увеличение длины основного соленоида сильно повышает энергопотребление комплекса. В то же время, увеличение расстояния между внутренними боковыми катушками ограничено наличием экранов. Поэтому в данной системе дальнейшая оптимизация по увеличению размеров однородного участка проводилась за счет изменения форм боковых корректирующих соленоидов. Граница однородного участка в подобных системах сильно связана с местом расположения центра этих катушек. В связи с этим, можно уменьшить их ширину (что, конечно же, повлечет за собой увеличение  $R_{in}$  и  $R_{out}$ ), что даст возможность увеличить расстояние между ними и, как следствие, однородный участок. Как легко оценить, мощность питания в случае подобной оптимизации оказывается в 1.8 раза меньше, чем в традиционной магнитной системе без экранов.

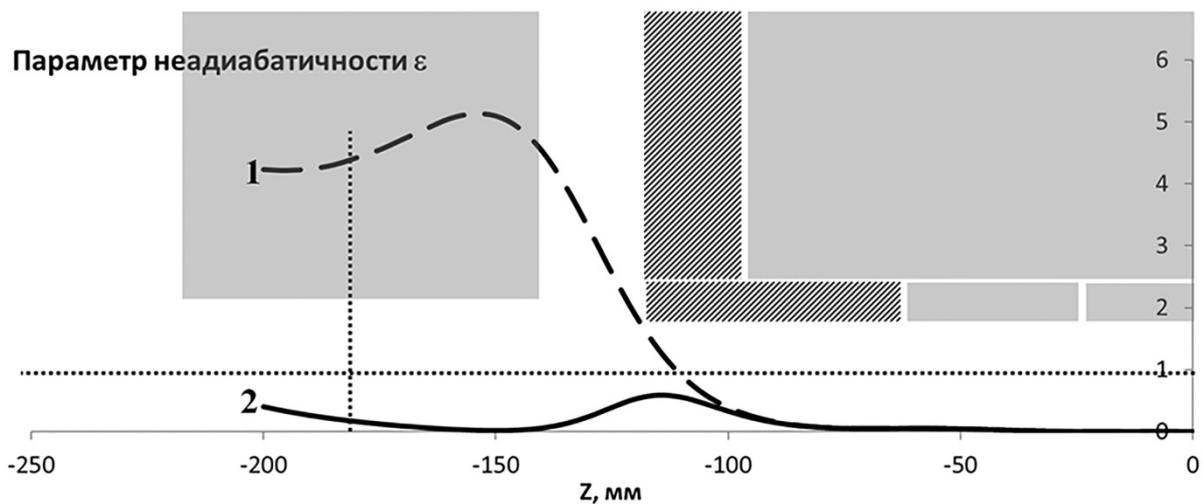


**Рис. 15.** Распределение магнитного поля в системе без экранов (1) и с экранами (2).

Распределение осевого магнитного поля, помимо требований к величине максимума и длине однородного участка, должно обеспечивать формирование электронного пучка с приемлемым качеством. Качество ВЭП и принцип работы системы формирования существенно зависят от степени неадиабатичности магнитного поля, которая может быть оценена соответствующим безразмерным коэффициентом как

$$(6) \quad \varepsilon = \left| \frac{dB_z}{dz} \right| \frac{2\pi\sqrt{2U}\eta}{\eta B_z^2}$$

Здесь  $B_z$  – текущее значение магнитного поля,  $U$  – ускоряющий потенциал,  $\eta$  – модуль удельного заряда электрона.



**Рис. 16.** Величина коэффициента неадиабатичности магнитного поля за экранами в случае отсутствия (1) и установки (2) катодной катушки. Координата  $z = 0$  соответствует центру

резонатора. Горизонтальная пунктирная линия  $\varepsilon=1$  разграничивает области с адиабатическим ( $\varepsilon < 1$ ) и неадиабатическим ( $\varepsilon > 1$ ) распределением магнитного поля. Вертикальная пунктирная линия указывает положение плоскости эмиттера. Область с серой заливкой соответствует области катушки соленоидов, заштрихованные области – ферромагнитным экранам.

Установка экранов резко увеличивает степень неоднородности магнитного поля ( $\varepsilon \gg 1$  при  $z > 110$  мм) в области за экранами, что затрудняет применение надежной и хорошо отработанной на практике адиабатической схемы формирования электронного пучка [37, 38]. Поэтому, для снижения величины  $\varepsilon$  в области формирования в магнитную систему была добавлена катодная корректирующая катушка, расположенная над центром эмиттера (см. рис. 16). Величина индукции катушки и ее геометрия подбирались так, чтобы обеспечить требуемую величину магнитного поля на эмиттере (см. подробнее ниже),  $\varepsilon < 1$  и малое энергопотребление катушки по сравнению с мощностью основного соленоида. Рис. 16 иллюстрирует зависимость  $\varepsilon(z)$  в оптимизированной системе.

## **2.2 Оптимизация электронно-оптической системы для 24 ГГц/25 кВт гиротрона с МЭС**

Разрабатываемый непрерывный гиротрон рассчитан на работу на моде TE<sub>02</sub> на первой гармонике циклотронной частоты и имеет параметры, перечисленные в таблице 4. Включение в магнитную систему дополнительной катодной катушки с низким энергопотреблением позволяет резко снизить степень неадиабатичности магнитного поля и использовать традиционную магнетронно-инжекторную пушку, формирующую винтовые электронные пучки с приемлемыми параметрами. Первоначальные параметры МИП находились на основе адиабатической теории [37, 38] и сведены в таблице 5. Рассматривался диодный режим работы МИП. Для снижения влияния поля пространственного заряда угол наклона образующей катодного конуса к оси системы был выбран равным 30 градусов, чтобы обеспечить формирование ламинарного ВЭП [39, 40].

<i>Таблица 4. Основные параметры гиротрона</i>	
Ускоряющее напряжение, кВ	30
Рабочее магнитное поле, Т	0.89
Номер гармоники гирочастоты	1
Ток пучка, А	3
Средний радиус ведущего центра электронов в резонаторе, мм	3.6
Питч-фактор (отношение вращательной и продольной скоростей электронов)	1.4

Таблица 5. Данные МИП	
Радиус катода, мм	11
Коэффициент перемангничивания	7.2
Магнитное поле на катоде, Т	0.12
Расстояние от центра магнитной системы до центра эмиттера, мм	180
Ширина эмиттера, мм	2
Разброс ведущих центров электронных орбит, мм	0.377
Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	2
Ток эмиссии, А	3
Электрическое поле на катоде, кВ/мм	4.6

Последующая численная оптимизация геометрии электродов МИП (см. рис. 17) проводилась по развитой в работах [40-42] методике минимизации позиционного скоростного разброса и разброса, вызванного влиянием поля пространственного заряда в рамках физической модели с нулевыми начальными скоростями стартующих частиц. Использовалась программа CST Studio Suite, в которую импортировалось преобразованное из двумерного в трехмерное магнитное поле, полученное в программе Elcut. Расчетная трехмерная сетка содержала 16 млн ячеек, число траекторий – 4 000, время расчета одного варианта с учетом пространственного заряда – 4 часа. Зависимости питч-фактора и скоростного разброса от тока пучка в оптимизированной геометрии МИП приведены на рис. 18. Отметим, что в расчетном режиме ( $I_0=3$  А) формируется достаточно интенсивный ВЭП с отношением тока к ленгмюровскому току пушки  $t_j=0.12$ . Тем не менее, электронно-оптическая система характеризуется вполне приемлемыми параметрами ВЭП, что позволяет надеяться на реализацию непрерывной выходной мощности гиротрона порядка 30 кВт на частоте 24 ГГц.

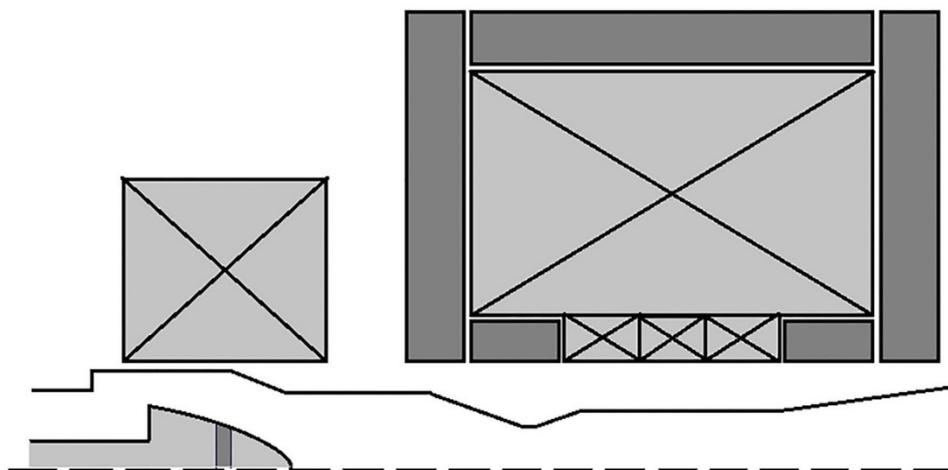
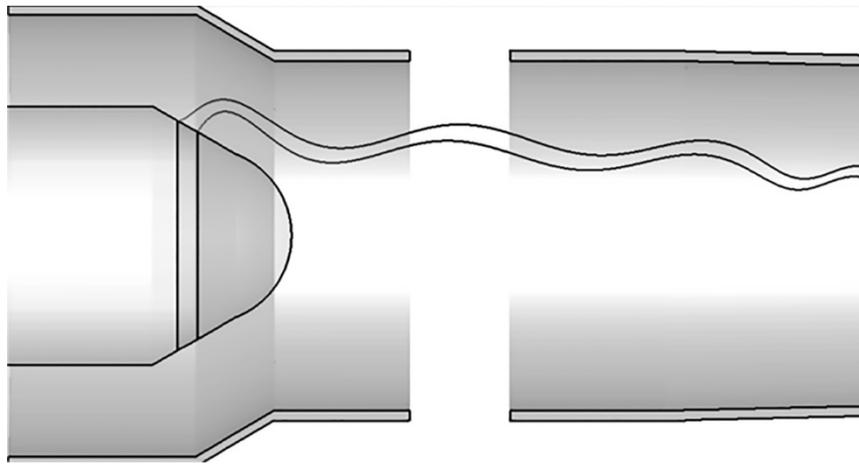
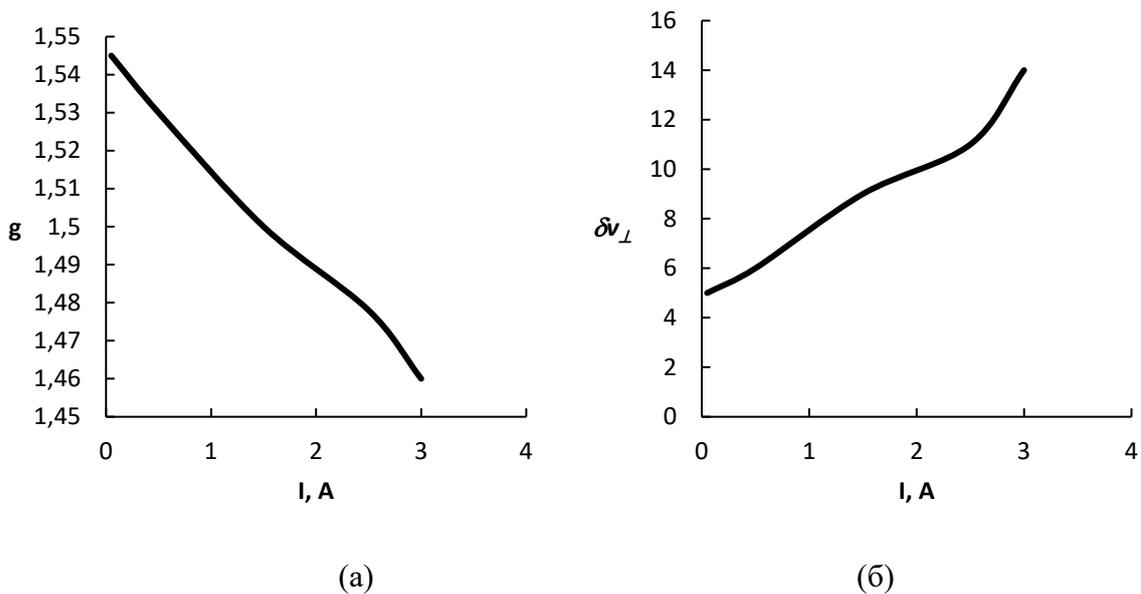


Рис. 17а. Общая схема ЭОС.



**Рис. 17б.** Оптимизированная геометрия МИП.



**Рис. 18.** Зависимость питч-фактора  $g$  (а) и скоростного разброса  $\delta v_{\perp}$  (в %) (б) от тока пучка.

С ростом тока пучка увеличивается степень экранировки электрического поля на эмиттере собственным пространственным зарядом пучка, а распределение электрического поля вдоль эмиттера и в переходной области «пушка-резонатор» становится более неоднородным. Соответственно, питч-фактор падает, а скоростной разброс возрастает.

В результате, несмотря на сложности в оптимизации МИП в условиях МЭС, представляется возможным использовать надежную адиабатическую электронно-оптическую систему, способную формировать качественный с точки зрения электронно-волнового взаимодействия ВЭП. Установка вокруг основного теплового соленоида ферромагнитных экранов позволяет снизить энергозатраты на формирование магнитного поля почти в 2 раза. При этом переход к работе на основном циклотронном резонансе позволяет рассчитывать на повышение КПД гиротрона до 35-40%, и до 60-65% с использованием рекуперации остаточной энергии электронного пучка [43]. В результате становится возможным реализовать непрерывную генерацию на уровнях мощности в

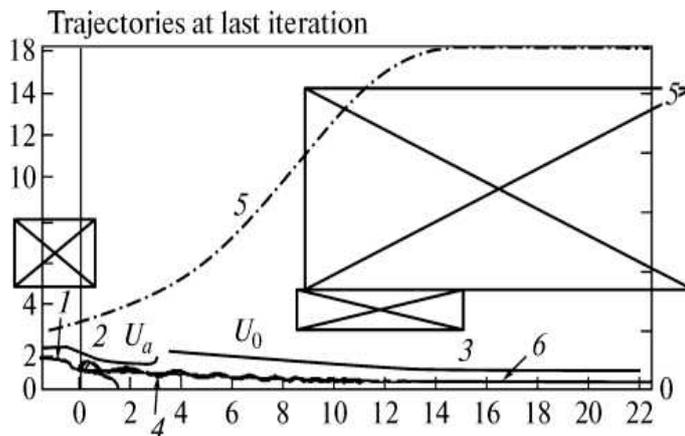
несколько десятков киловатт, что в несколько раз превышает типичные мощности современных технологических гиротронов и актуально для многочисленных приложений, требующих высокого уровня СВЧ-мощности.

### **2.3 Увеличение долговечности катода**

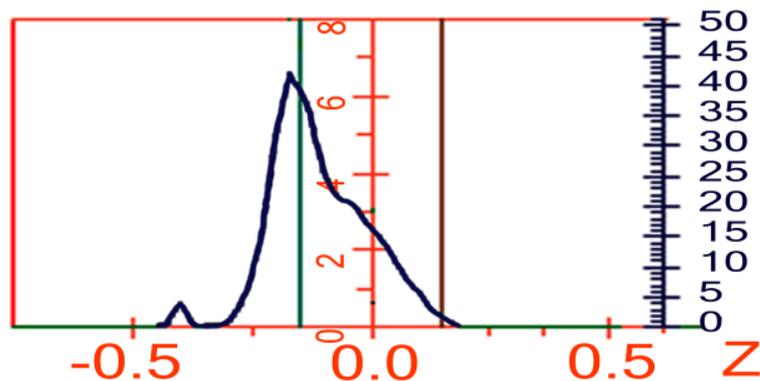
Одним из ключевых элементов гиротрона является магнетронно-инжекторная пушка (МИП) [37]. Неотъемлемой спецификой МИП является разброс вращательных скоростей электронов. Скоростной разброс служит причиной того, что часть электронов отражается от магнитного зеркала и возвращается в прикатодную область, вызывая накопление пространственного заряда между катодом и магнитной пробкой и, как следствие, развитие различных неустойчивостей электронного пучка при попытке превысить некоторую предельную величину колебательной энергии в сформированном пучке [44]. Т.е. как правило, этот фактор является негативным. Однако эффект отражения части электронов от магнитной пробки можно постараться использовать и как положительный фактор. Как известно, часть отраженных электронов способна бомбардировать катод и вызывать дополнительный разогрев эмиттера. Интенсивность бомбардировки катода тем больше, чем больше величина питч-фактора  $g$  (отношения вращательной и поступательной скоростей электронов в резонаторе). Поэтому если использовать режим МИП с большими  $g \sim 1.7-2$  (типичные для МИП гиротронов значения питч-фактора составляют  $g \sim 1.5$  или даже ниже), то мощность бомбардировки становится сопоставимой с мощностью подогревателя эмиттера, что позволяет существенно снизить мощность накала подогревателя  $P_T$ . Поскольку срок эксплуатации МИП зачастую определяется именно сроком службы подогревателя катода, то снижение  $P_T$ , очевидно, ведет к увеличению срока службы катода МИП.

Основываясь на этой идее, ниже предложена и оптимизирована система, в которой подогрев катода частично осуществляется за счет бомбардировки катода отраженными электронами (см. Рис. 19 и Рис. 20(A)). Благодаря снижению мощности накала подогревателя удастся увеличить срок эксплуатации в несколько раз (см. ниже). Основной задачей оптимизации МИП в этом случае является поиск геометрии электродов и режима МИП, позволяющей бомбардировать катод вблизи эмиттера отраженными от магнитной пробки частицами, разогревая его, и в то же время формировать электронный пучок с приемлемыми значениями питч-фактора и разброса. Решение задачи выполнялось циклическим выполнением двух шагов: расчетом параметров электронного потока, определением зоны бомбардировки и мощности бомбардировки катода при заданных значениях анодного напряжения и компрессии пучка с помощью программы EPOSR-T [42], основанной на динамической аксиально-симметричной модели пучка; и затем расчетом программой ELCUT 5.6 [31] распределения температур на катоде при заданной мощности подогревателя катода  $P_T$  и вычисленной по программе EPOSR-T мощности бомбардировки и ее

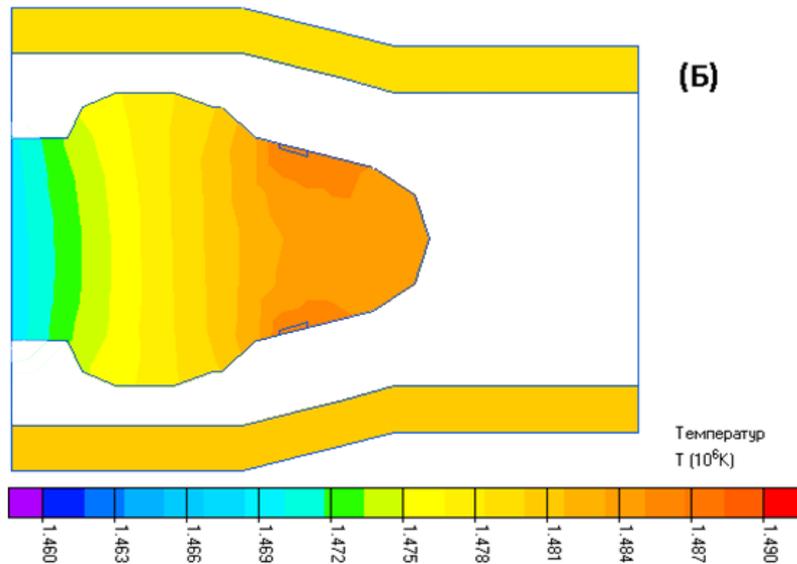
распределения вдоль поверхности катода (рис. 20(а)). Величина  $P_T$  варьировалась до тех пор, пока не обеспечивалась заданная температура эмиттера и таким образом – требуемая плотность тока эмиссии. После этого оценивалось снижение требуемой мощности подогревателя при сохранении эмиссионного тока. Указанный цикл расчетов образовывал одну итерацию цикла оптимизации. После этого изменялась форма электродов, вновь проводился траекторный анализ, подбирались новое  $P_T$  и т.д., вплоть до нахождения конфигурации электродов, позволяющей максимально снизить мощность подогревателя и сохранить параметры электронного потока, достаточные для реализации высокого КПД. Найденная геометрия электродов представлена на Рис. 19, а карта распределения температуры при мощности электронной бомбардировки 29,2 Вт на Рис. 20(б).



**Рис. 19.** Главный вид электронно-оптической системы: (1) катод, (2) анод, (3) место заземления лампы (4) электронная траектория, (5) распределение магнитного поля (6) часть магнитной линии; главная и дополнительная (при катодная). Размеры даны в сантиметрах.

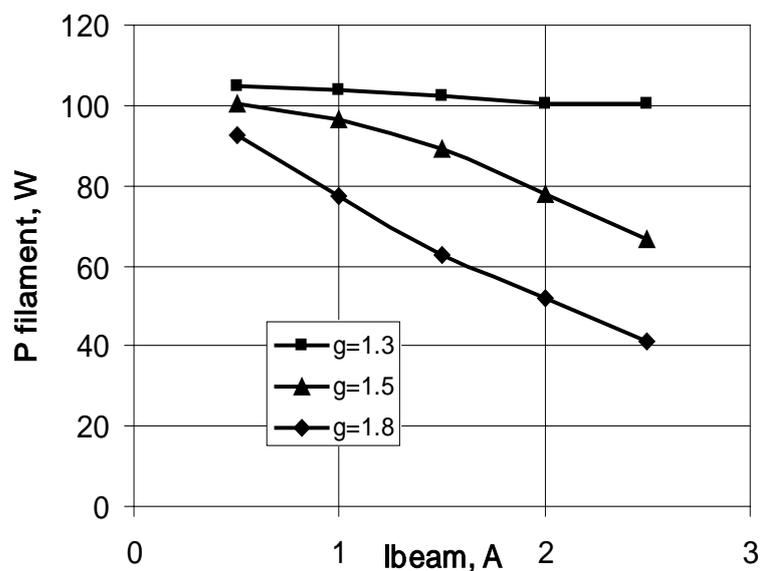


**Рис. 20(а).** Распределение бомбардирующих электронов вдоль поверхности катода (а.и.). Вертикальными линиями отмечены границы эмиттера.



*Рис. 20(б). Температурное распределение в прикатодной области.*

Поскольку распределение тока бомбардировки близко к несимметричному треугольнику (см. Рис. 20(а)), а энергия бомбардировки при изменении режима МИП меняется мало, то распределение мощности нагрева отраженными электронами также представляет собой несимметричный треугольник. Для численного моделирования дополнительный источник тепла, возникающий из-за бомбардировки, задавался в виде гистограммы из 3-х прямоугольников, расположенной в области бомбардировки. При расчете распределения температур задавались потери на излучение с катода и граничное условие в виде постоянной температуры внешнего анода, охлаждаемого проточной водой. Константы для моделирования поля температур подбирались таким образом, чтобы в отсутствии бомбардировки получить температуру катода, равную измеренной пирометрическим методом в испытательном стенде при заданной мощности подогревателя. Неоднородность нагрева эмиттирующего пояса вследствие бомбардировки отраженными электронами не превышает 5 К. Используя рассчитанную мощность бомбардировки катода для различных питч-факторов, можно вычислить снижение мощности подогревателя в зависимости от тока пучка (рис. 21) при сохранении параметров электронного потока, обеспечивающих требуемые КПД и мощность излучения гиротрона.



**Рис. 21.** Зависимость мощности подогревателя катода от тока при различных питч-факторах.

Мощность подогревателя при оптимальной геометрии и режиме МИП снижается на 38% (с 106 до 65 Вт), а совместное воздействие подогревателя и бомбардировки обеспечивает необходимую рабочую температуру эмиттера (~1800 К).

Нагрев катода потоком отраженных электронов позволяет снизить мощность подогревателя катода, и, соответственно, уменьшить рабочую температуру подогревателя, что должно отразиться на изменении его срока службы. Чем выше температура подогревателя, тем выше скорость испарения его материала и, соответственно, меньше его время жизни. Долговечность подогревателя принято определять временем, в течение которого его объем уменьшается на 10%, естественно, полное время жизни может быть существенно больше. Оценим изменение долговечности нагревателя за счет снижения его рабочей температуры. В гиротроне с рабочей частотой 28 ГГц при токе пучка 2А усредненный расчетный питч-фактор электронов равен  $g \sim 1.35$ , соответственно мощность нагрева катода отраженными электронами (см. рис. 20(а)) составляет около 10 Вт. Воспользовавшись формулой (7):

$$(7) \quad t_{\text{макс}} = 8,45 \cdot 10^{-3} \frac{d}{M_1 \beta}$$

– [40, 42] для оценки долговечности нагревателя, где  $d$  – диаметр нагревателя,  $M_1$  – скорость испарения материала нагревателя с поверхности единичного цилиндра, г/сек,  $\beta$  коэффициент, зависящий от температуры и режима эксплуатации (в нашем случае, при поддержании постоянной температуры нагревателя равен 1), можно сравнить долговечность катода в режимах с бомбардировкой и без нее. Без бомбардировки температура подогревателя катода составляет 3300 К, что дает долговечность около 200 часов, а наличие бомбардировки позволяет снизить температуру нагревателя до 3100 К, что увеличивает долговечность втрое – до 600 часов.

Конечно, сделанные оценки весьма приблизительны, кроме того, температура катода и подогревателя в составе прибора может отличаться от измеренной при пирометрировании, т.к. наличие анода и других конструктивных элементов гиротрона может влиять на распределение температуры на поверхности катода. Если температура подогревателя 3000 К, а ее снижение из-за бомбардировки вновь составляет величину порядка 200 К, описанный механизм даст еще больший выигрыш в долговечности – в 6-7 раз.

Для экспериментальной проверки возможности снижения накала при бомбардировке катода отраженным электронным пучком был проведен эксперимент с непрерывным гиротроном с рабочей частотой 28 ГГц. Геометрия пушки специально не оптимизировалась, использовалась стандартная промышленная лампа, и задачей было зафиксировать принципиальную возможность снижения тока накала при появлении бомбардировки с ростом питч-фактора и сохранении постоянных значений тока пучка, мощности и эффективности генерации. Величина питч-фактора регулировалась дополнительным соленоидом, размещенным в области катода и менявшим степень компрессии магнитного поля (осцилляторная скорость  $V_{\perp} \sim E/B$ ,  $E$  и  $B$  – напряженность электрического и интенсивность магнитного поля на катоде, соответственно). Максимальное снижение мощности подогревателя в эксперименте составило 22% для тока электронного пучка 1,5 А, что свидетельствует о правильности предлагаемого подхода.

Успешные результаты экспериментов и обнадеживающие расчеты подтверждают эффективность использования данного метода для увеличения срока службы комплекса.

#### **2.4 Методы численного моделирования электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона**

Расчеты электронной оптики с учетом пространственного заряда и рассмотрения большого количества частиц являются серьезной задачей, требующей больших вычислительных мощностей и времени. Отметим, что оптимизация ЭОС требует перебора очень большого числа вариантов с комбинацией различных геометрических и физических параметров. Поэтому принципиальное значение приобретает производительность применяемого программного обеспечения. Используемый ранее комплекс программ CST Studio Suite при необходимой для обеспечения высокой точности расчетов шестигранной сетке с несколькими десятками миллионов ячеек и большом (несколько сотен тысяч) числе частиц требует для моделирования одного варианта (с учетом пространственного заряда) нескольких десятков часов даже при распараллеливании задачи на шесть процессорных ядер. Как показала практика расчетов, более перспективным оказывается написание собственного программного кода с применением библиотеки IBSIMU [45]. Главными преимуществами написанного кода являются высокая скорость расчета и последующая обработка данных (вплоть до двух порядков быстрее, чем CST Studio при большом количестве частиц и мелкой сетке), меньшие требования к памяти при тех же

параметрах, а также доступность всех данных расчета, позволяющая более подробно анализировать динамику электронного пучка.

Помимо расчета ЭОС giroприборов, не менее ресурсозатратной частью является расчет электронно-волнового взаимодействия. В готовых пакетах программ подобные вычисления занимают очень много времени и являются больше инструментом финальной проверки, нежели инструментом оптимизации. Поэтому существует важная задача создания узконаправленных и хорошо оптимизированных для конкретного типа задач программ, позволяющих с высокой точностью и минимальными вычислительными и временными ресурсами проводить первичный процесс разработки электродинамических элементов giroприборов.

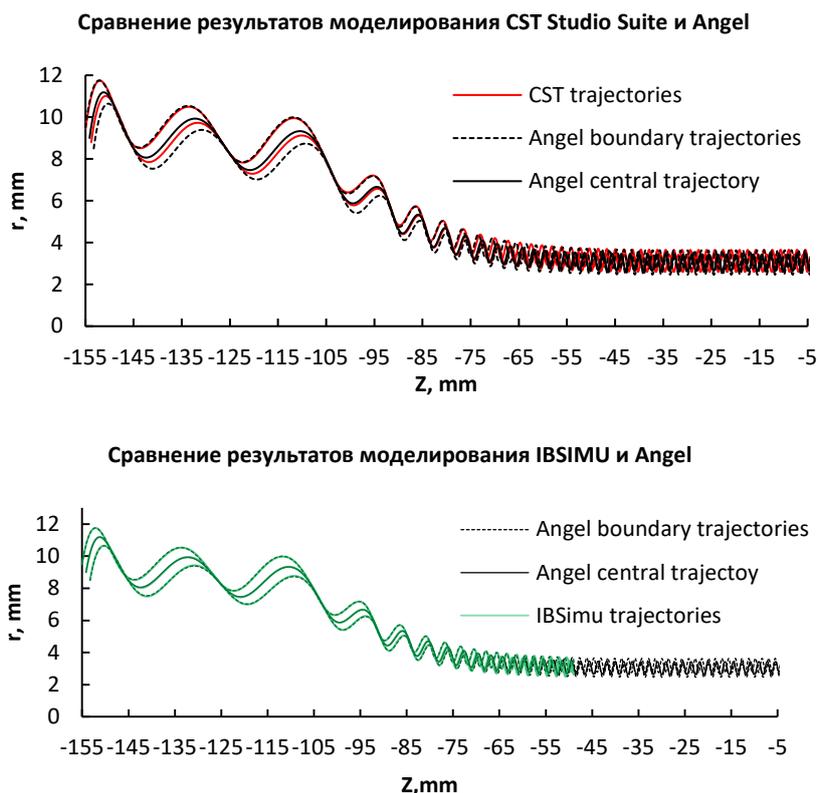
Наличие таких инструментов расчета ЭОС и электродинамической систем гиротрона являются необходимым условием дальнейшей работы по созданию и исследованию гиротронных комплексов, особенно с магнито-экранированными системами.

#### 2.4.1 Исследование способов расчета электронно-оптической подсистемы гиротрона с большим количеством частиц.

Предыдущий опыт расчета и оптимизации электронно-оптической систем гиротрона на 24 ГГц показал, что для более быстрого и точного с точки зрения количества используемых при расчете частиц (особенно важно для случая учета пространственного заряда) необходим новый инструмент численного моделирования. Поэтому совместно с Морозкиным М.В. был реализован на базе открытой библиотеки IBSIMU программный код, позволяющий на порядок увеличить скорость вычислений электронных траекторий в электронно-оптических системах формирования и посадки электронных потоков. В качестве анализа корректности работы программы, было проведено сравнение результатов численного моделирования в программах CST Studio Suite 2018, Angel и созданного кода.

Расчеты были проведены для электронно-оптической системы гиротрона, рассмотренного в п.3.3. Численное моделирование было проведено с учетом пространственного заряда, количество частиц составляло около 1 миллиона. Для анализа результатов из полного пучка были выбраны лишь несколько траекторий, имеющих одинаковую начальную азимутальную и разные продольные координаты на эмиттере. Отметим, что недостатком работы пакета программ CST Studio Suite в очередной раз оказалось долгое время расчета. Кроме того, процесс импорта траекторий регулярно меняется с выпуском новой версии, что приводит к необходимости изменения программы-обработчика, написанной для этих целей. Процесс импорта большого файла, содержащего полный массив данных всех частиц, занимает также очень много времени (особенно в случае рассматриваемого количества частиц). В случае кода, основанного на IBSIMU, данных проблем не возникает, а благодаря возможности исправления и настройки кода под собственные задачи можно проводить импорт только выбранных траекторий с определенными

параметрами без использования всего массива данных. Сравнение результатов моделирования приведено на рис. 22.



**Рис. 22.** Сравнение результатов расчета численного моделирования траекторий электронного потока из катодной области в область резонатора гиротрона с частотой генерации 28 ГГц, выполненных в CST Studio Suite (красная линия), программы Angel (черная линия) и кода, основанного на базе библиотеки IBSIMU (зеленая).

Хорошее соответствие полученных результатов трех программ позволяет в дальнейшем проводить расчеты в более универсальной и подходящей для конкретной задачи программе. Возможность сравнения результатов расчета и их детальное исследование повысит шансы на успешную реализацию гиротронного комплекса на базе МЭС.

#### 2.4.2 Создание программы для расчета электронно-волнового взаимодействия

Расчет электродинамической части гиротрона 24 ГГц был осуществлен на созданном компьютерном коде на базе уравнений с фиксированной (Гауссовой) структурой поля взаимодействия [36]. Такой подход является достаточным с точки зрения предварительной оценки параметров системы, требующихся для дальнейшей проработки других узлов прибора. Однако, с точки зрения реализации СВЧ-генератора и его оптимизации этого недостаточно, так как результат, например, КПД и мощность генерации, сильно зависят как от области интегрирования данной функции распределения высокочастотного (ВЧ) поля, так и от его реальной структуры, изменяющейся в процессе взаимодействия с электронным пучком. Прямое численное моделирование в готовых пакетах программ является очень долгой процедурой, которая является больше инструментом финальной проверки, нежели разработки и оптимизации. Кроме того, в случае высоких частот генерации, требования к расчетному оборудованию сильно возрастают, что в ряде случаев приводит к невозможности расчета всей системы. Данный недостаток готовых

пакетов программ связан с их мультизадачностью, что в частном случае совершенно не оптимально. В связи с этим разработка собственных кодов, направленных на решение конкретных задач, является крайне важным направлением. Решением таких вопросов в ИПФ РАН занимались давно [46], однако с учетом развития вычислительных мощностей существующие коды требуют доработки и добавления новых модулей, учитывающих большее количество физических факторов. Совершенствование кодов выполнено совместно с Е.С.Семеновым, при активном участии автора исходной программы – Н.А.Завольского, поддержавшего необходимость этой работы. В качестве основной задачи была рассмотрена система самосогласованных уравнений с нефиксированной структурой поля взаимодействия (8).

$$(8) \quad \begin{cases} \frac{dp_c}{dz} = f_{p_c}(z, p_c, p_{\parallel}, F, F')\{\theta_0, g, R_b, \gamma_0\}, \\ \frac{dp_{\parallel}}{dz} = f_{p_{\parallel}}(z, p_c, p_{\parallel}, F, F')\{\theta_0, g, R_b, \gamma_0\}, \\ \frac{d^2F}{dz^2} = f_F(z, p_c, p_{\parallel}, F, F'), \quad F' \equiv \frac{dF}{dz}. \end{cases}$$

с начальными условиями

$$(9) \quad F(z_{in}) = F_{in}, \quad p_c(z_{in}) = p_{c,in}, \quad p_{\parallel}(z_{in}) = p_{\parallel,in}$$

и граничными условиями излучения

$$(10) \quad \frac{dF}{dz} - i\kappa_{\parallel}F = 0, \quad z = z_{in}, \quad \frac{dF}{dz} + i\kappa_{\parallel}F = 0, \quad z = z_{out}.$$

Количество решаемых уравнений соответственно равно  $N_{\theta} \times N_g \times N_R \times N_{\gamma}$ , где  $N_{\theta}$  – количество фракций по начальным фазам электронов,  $N_g$  – количество фракций по питч-факторам электронов,  $N_R$  – количество фракций радиусам ведущих центров электронных орбит,  $N_{\gamma}$  – количество фракций по начальным энергиям электронов. Полные правые части данных уравнение приведены в формулах (11)-(13). Нормированный комплексный поперечный импульс каждого электрона при движении вдоль продольной оси  $z \in [z_{in}, z_{out}]$  описывается уравнением (4), где последние два слагаемых отражают влияние неоднородного статического магнитного поля и пространственного заряда электронного пучка соответственно.

$$(11) \quad \frac{dp_c}{dz} + i \frac{p_c}{p_{\parallel}} * \left( \gamma \frac{k}{n} - \frac{\omega_{H0}}{c} \right) = \kappa_{\perp} * J_{m-n} * \left\{ \left( \frac{i\gamma F}{p_{\parallel}} + \frac{1}{k} \frac{dF}{dz} \right) * (p_c^*)^{n-1} * \left( \frac{J_{n-1}}{2p_{\perp}^{n-1}} \right) + \left( \frac{i\gamma F^*}{p_{\parallel}} - \frac{1}{k} \frac{dF^*}{dz} \right) * p_c^{n+1} * \left( \frac{J_{n+1}}{2p_{\perp}^{n+1}} \right) - ip_c * Re \left( \frac{F}{p_{\parallel}} * (p_c^*)^n \right) * \left( \frac{J_n}{p_{\perp}^n} * \frac{k_{\perp}}{k} \right) \right\} + \frac{p_c}{2H_0} * \frac{dH_0}{dz} - \frac{iS\gamma(z)}{p_{\parallel}} * \left\langle \frac{\hbar_e}{p_{\parallel}} \right\rangle$$

Продольная компонента нормированного импульса, где последнее слагаемое отражает влияние неоднородного статического магнитного поля, выражается по формуле (12).

$$(12) \quad \frac{dp_{\parallel}}{dz} = -Re \left( \frac{1}{k} \frac{dF}{dz} * (p_c^*)^n \right) * \frac{J_n'}{p_{\perp}^{n-1}} * \frac{\kappa_{\perp} * J_{m-n}}{p_{\parallel}} - \frac{p_{\perp}^2}{p_{\parallel} * 2H_0} * \frac{dH_0}{dz}$$

Продольная структура поля с учетом влияния электронного пучка вычисляется по формуле (13):

$$(13) \quad \frac{d^2 F}{dz^2} + k_{\parallel}^2 * F = I * k * k_{\perp} * \langle \langle J_{m-n} * \frac{p_c^n}{p_{\parallel}} * \frac{J_n'}{p_{\perp}^{n-1}} \rangle \rangle$$

Данная система полных уравнений имеет ряд преимуществ по сравнению с ранее используемой системой на базе укороченных уравнений [47]. Результаты расчетов электронно-волнового взаимодействия, получаемые в рамках этих двух моделей, близки для первых продольных вариаций поля взаимодействия в резонаторе, но с ростом номера вариации  $q$  (по мере увеличения магнитного поля  $B_0$ ) различия возрастают и возможность корректного счета ограничивается  $q=2$ . Несмотря на значительное (примерно в 10 раз) преимущество в скорости счета при использовании укороченных уравнений, время расчета полных уравнений на несколько порядков быстрее по сравнению с аналогичным численным моделированием, например, в CST Studio Suite и составляет несколько минут. Еще одним немаловажным преимуществом полных уравнений является возможность учета слабой неоднородности магнитного поля в области резонатора, что в случае проведенных работ в п. 1.2 и 3.2 является важной задачей при оптимизации режима работы гиротронов и позволяет значительно поднять эффективность прибора.

Для решения данной системы сперва необходимо численно задать начальные условия (в области  $z=z_{in}$ ), однозначно определяющие начальную амплитуду поля и частоту (волновое число). Точность их первоначальной оценки является определяющей в процессе сходимости уравнений и поиска решения. Поэтому, зная все входные параметры задачи (такие, как ток пучка, ускоряющее напряжение, номер моды, профиль резонатора и т.д.), для корректного задания начальных условий удобно использовать результаты, полученные из «холодной» задачи, которые в среде Angel вычисляются за характерное время меньше одной секунды. С введенными начальными условиями решается самосогласованная система уравнений (11)-(13) в области продольной координаты  $z_{in}$ - $z_{out}$  и заданного профиля резонатора. В результате первой итерации получается профиль высокочастотного поля, который в итоге должен удовлетворять в конечной точке интервала интегрирования условию излучения (14):

$$(14) \quad \frac{dF}{dz} + i \kappa_{\parallel} F = 0, \quad z = z_{out}.$$

Очевидно, что полностью удовлетворить этому условию невозможно, поэтому необходимо определить критерий точности. Поэтому в качестве невязки используется коэффициент отражения от выходного сечения (15):

$$(15) \quad |R_2|^2 = \left| \left( \frac{dF}{dz} + i \kappa_{\parallel} F \right) / \left( \frac{dF}{dz} - i \kappa_{\parallel} F \right) \right|^2, \quad z = z_{out}$$

В процессе работы с такой многопараметрической системой сразу становится понятна потребность в автоматизации оптимизации начальных условий посредством минимизации невязки в заданном диапазоне начальных значений амплитуды высокочастотного поля и частоты. Решение данной задачи было успешно реализовано программно-графически в среде Angel. В результате расчета невязки в заданной области начальных условий с заданным шагом по каждому из них выводится цветная карта. Наиболее красные области в этой диаграмме соответствуют наименьшему значению невязки и, следовательно, верным начальным условиям. Именно в этих областях обеспечивается сходимость системы уравнений и находятся верные решения параметров.

Для оценки корректности работы программы был проведен расчет резонатора гиротрона с частотой излучения 28 ГГц на кодах, разработанных ранее О.Думбрайсом и Н.А.Завольским. Результаты расчетов приведены на рис. 23.



**Рис. 23.** Сравнение результатов расчета численного моделирования резонатора гиротрона с частотой генерации 28 ГГц, выполненных на авторских кодах Н.А.Завольского (черный пунктир), О.Думбрайса (красная штрихованная) и программы Angel (черная линия).

Отметим, что полученные результаты хорошо согласуются друг с другом, в особенности данные расчетов авторского кода Н.А.Завольского и Angel, однако представленные данные

демонстрируют превосходство нового кода в точности и разрешении. Результаты работы по совершенствованию кодов позволяют использовать их с последними версиями операционных систем и проводить численное моделирование и оптимизацию процессов электронно-волнового взаимодействия на современных вычислительных средствах.

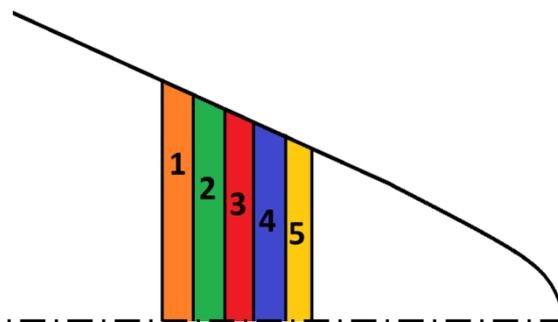
Подробная методика расчета электродинамической системы гиротрона на базе описанных выше уравнений детально разобрана в методических материалах к программе Angel, разработанной Е.С.Семеновым.

Таким образом, на данном этапе проведен достаточный объем подготовительных работ, созданы и изучены все инструменты для разработки нового поколения мощных технологических гиротронов, первому из которых будет посвящена Глава 3. В следующем разделе будет предложен и детально рассмотрен новый подход к оптимизации функции распределения электронов по поперечным скоростям с точки зрения эффективности взаимодействия с электромагнитной волной резонатора гиротрона.

### **2.5 Метод оптимизации электронно-оптической системы с учетом влияния на КПД генерации фракций электронного пучка для широких эмиттеров.**

Интерес к разработке мощных гиротронов субмиллиметрового и терагерцового диапазонов для различных приложений [48-51] непрерывно растет. Кроме того, современное развитие установок управляемого термоядерного синтеза вызывает потребность в создании низкочастотных [16, 2А] мультимегаваттных гиротронов. Такие гиротроны работают в сверхпроводящих соленоидах, стоимость которых быстро увеличивается с увеличением диаметра внутреннего отверстия. С другой стороны, для низкочастотных комплексов можно было бы использовать теплые соленоиды, однако, даже использование МЭС не позволит снизить растущее из-за размера проходного отверстия (более 180 мм) энергопотребление таких систем до приемлемого уровня. Такой размер внутреннего отверстия обусловлен поперечными размерами всех элементов электронных пушек и, в частности, диаметром эмиттеров. Поэтому для дальнейшего увеличения мощности гиротрона (и / или снижения стоимости гиротронов с заданным уровнем мощности) имеет смысл сохранить фиксированный диаметр эмиттеров, но увеличить ширину эмиттера. Однако это утолщение винтовых пучков может привести к увеличению позиционного и скоростного разбросов, что вызовет снижение эффективности СВЧ-генератора. Влияние толщины пучка на снижение эффективности и конкуренцию мод изучалось в [52, 53]. В общих чертах разброс скоростей в электронных пушках с широкими эмиттерами был описан в [37], а затем более подробно в [42, 54]. Однако влияние этого разброса на эффективность не было изучено достаточно точно.

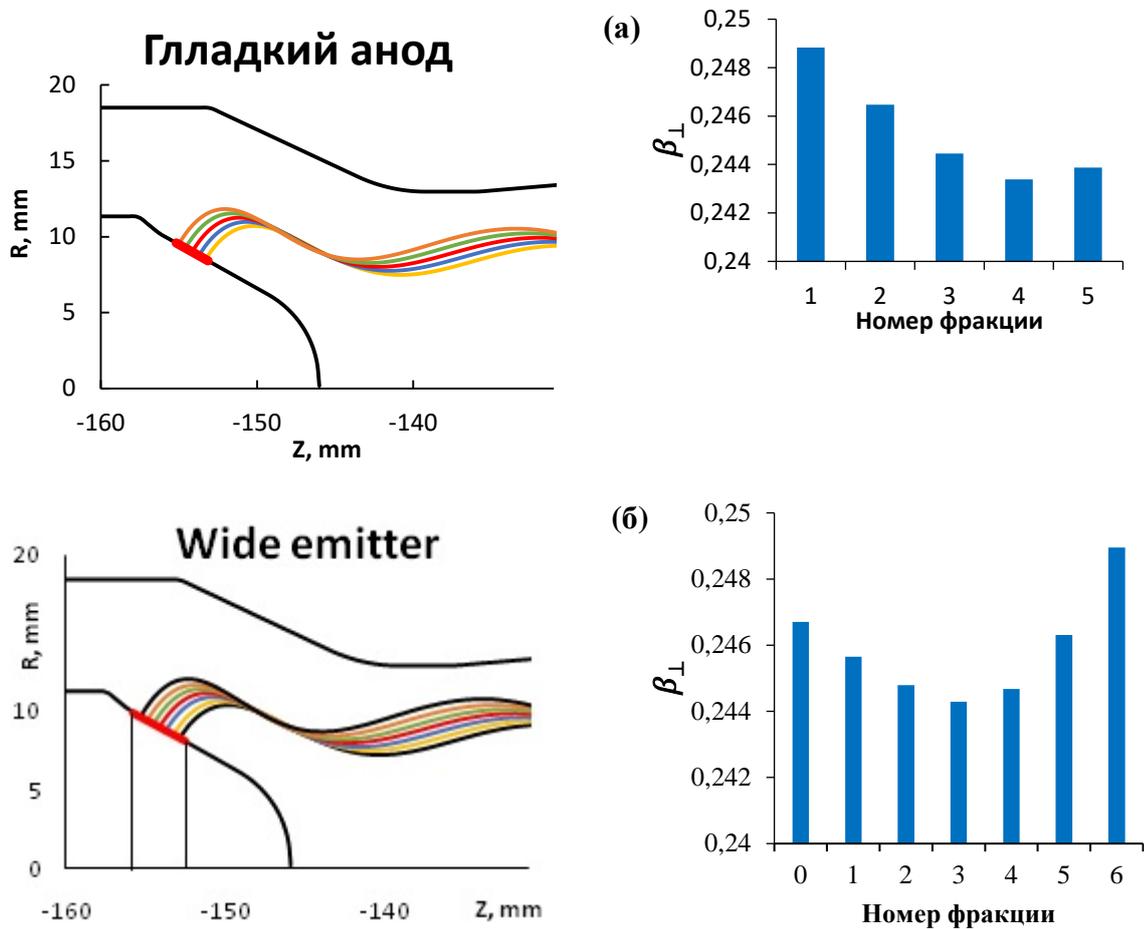
Первая часть данного исследования посвящена исследованию разброса скоростей в пучках, создаваемых электронно-оптическими системами (ЭОС) со стандартным и широким эмиттерами. Для более точного анализа влияния ширины эмиттера на разброс скоростей эмиттер будет разделен на 5 фракций, как показано на рис.24.



*Рис. 24. Схематическое изображение эмиттера в виде суперпозиции тонких колец*

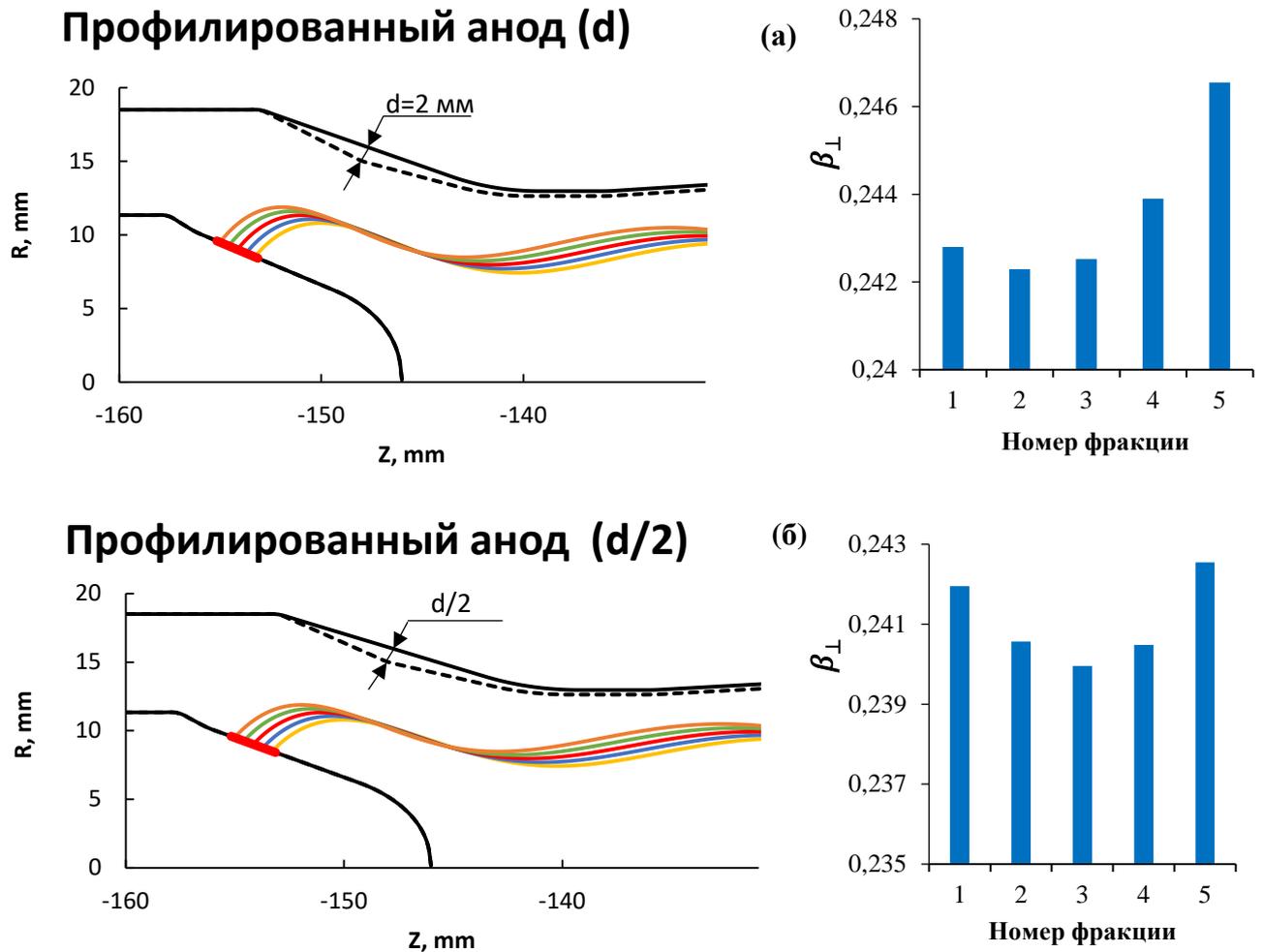
На первом этапе оптимизация электронно-оптической системы, как всегда, была сосредоточена на возможности формирования электронного пучка с большим питч-фактором и малым разбросом скоростей. Ввиду того, что данное исследование ориентировано на широкие эмиттеры, необходимо было также учесть разброс электронных центров в резонаторе. Сначала были исследованы характеристики электронного пучка, испускаемого стандартным эмиттером, состоящим из 5 слоев. Затем аналогичное исследование было выполнено для широкого эмиттера, состоящего из 7 слоев. Соответственно, полный ток пучка был увеличен в 1,4 раза. Предполагалось, что напряжение электронного пучка находится в диапазоне 20-25 кВ, ток пучка в случае стандартного эмиттера составляет 2,4 А, плотность тока на катоде составляет 2,1 А / см<sup>2</sup>, а электрическое поле на поверхности катода составляет около 2,7 кВ / мм.

При моделировании использовались программы IBSIMU и ANGEL. Проведено 3D-моделирование всего пучка с учетом полей пространственного заряда. Затем был получен полный набор параметров (разброс поперечных скоростей, питч-фактор, радиальные координаты центров электронного вращения) для каждой фракции пучка. На рис. 25 показаны конфигурации электронно-оптической системы (ЭОС), траектория пучка и значения поперечных скоростей в каждой фракции для различных версий магнетронно-инжекторной пушки (МИП).



**Рис. 25.** Электронно-оптическая система и траектории электронов (слева) и поперечные скорости электронов (нормированные на скорость света), эмитированных разными фракциями (справа) в стандартном ЭОС (верхний ряд) и ЭОС с расширенным эмиттером (нижний ряд).

Как показано на рис. 25, имеется некоторая неоднородность в распределении поперечных скоростей фракций, однако в обоих случаях эти скорости меняются практически в одном диапазоне: от 0,243 до 0,249 в стандартной ЭОС и от 0,244 до 0,249 в ЭОС с широким эмиттером. Эти результаты получены в системах с простой геометрией: поверхности катода и анода параллельны друг другу. Как известно [55], неоднородность распределения по орбитальным скоростям можно уменьшить различными способами; одним из самых простых является профилирование поверхности анода. Результаты моделирования разброса скоростей в ЭОС с простым профилированием показаны на рис.26 для двух случаев глубины отклонения анода:  $d$  и  $d/2$ , где  $d = 2$  мм ( $z = -148$  мм).

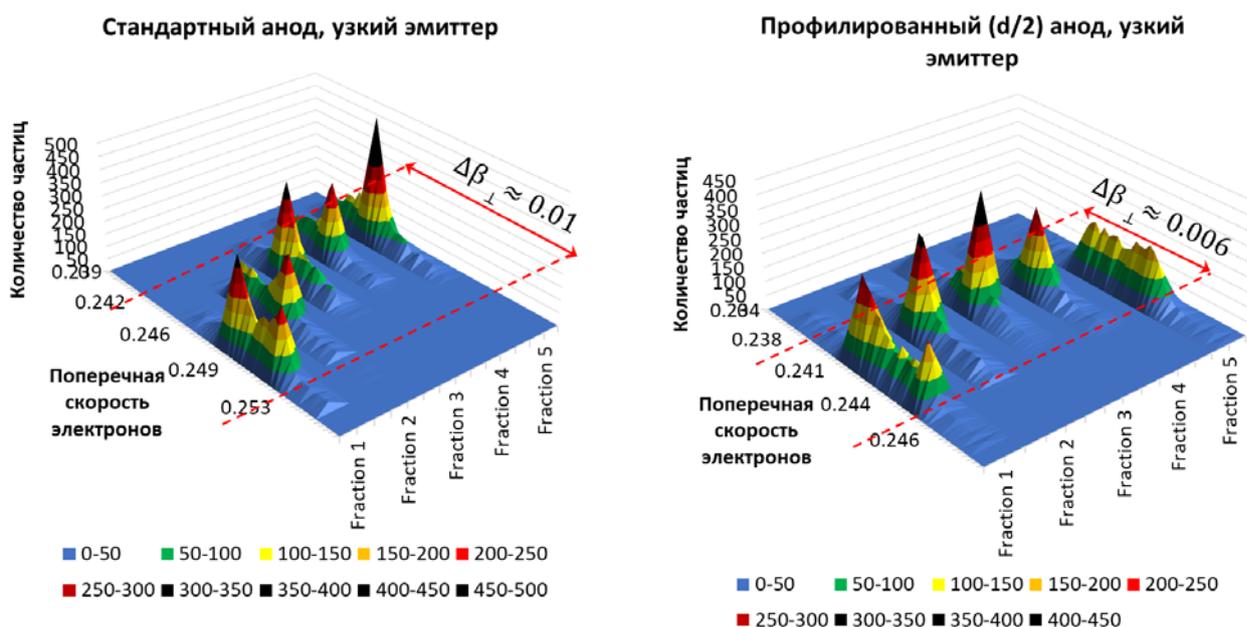


*Рис. 26. Функция распределения для случая с профилированным анодом.*

Как следует из сравнения рис. 26а с рис. 25а, профилирование анода глубиной  $d$  зеркально меняет картину поперечных скоростей фракций эмиттера: в то время как в случае анода, параллельного катоду (рис. 25а), первый срез эмиттера генерирует электроны с наибольшей поперечной скоростью, в другом случае (см. рис. 26а) наибольшие поперечные скорости имеют электроны в пятом (последнем) срезе. В случае профилирования с  $d/2$  это распределение более равномерное, хотя в среднем поперечные скорости на рис. 26б немного ниже, чем на рис. 26а. Последний эффект можно компенсировать небольшим увеличением электрического поля на катоде.

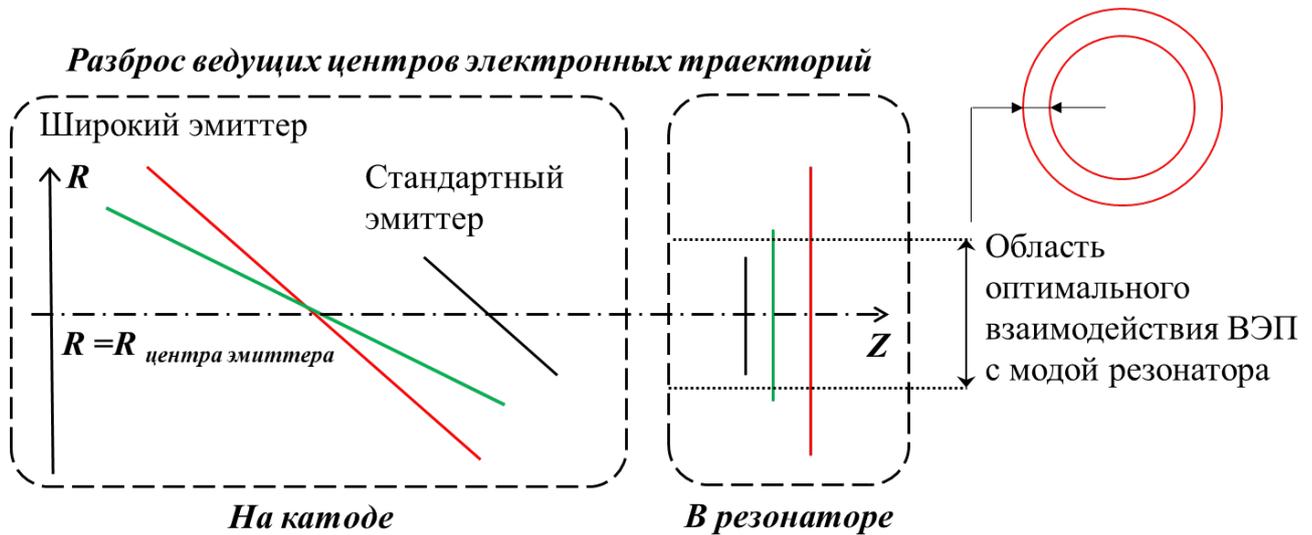
Такое рассмотрение электронного пучка наглядно демонстрирует путь оптимизации как разброса поперечных скоростей электронов, так и позиционного разброса. Вид функции распределения по поперечным скоростям отдельной фракции и ее место расположение на эмиттере позволяет значительно быстрее оптимизировать геометрию электродов. Интегральная функция распределения ВЭП не дает информации о том, в каком месте на эмиттере необходимо скорректировать условия формирования электронного потока. Функция распределения (ФР) отдельной фракции и ее среднее значение, позволяет понять, необходимо ли в ее эмиттерной

области, например, скорректировать расстояние до анода, увеличивая или уменьшая соотношение поперечной и продольной компонент скорости электронов. Влияние на отдельную фракцию ВЭП можно обеспечить за счет точечной гофрировки анода, что позволяет быстро синтезировать оптимальный профиль анода и наклона электродов. На рис. 27 приведено сравнение оптимизированных функций распределения интегральным методом и дискретным (отдельным рассмотрением фракций пучка). В оптимальном случае ФР каждой фракции должны выглядеть в виде узких пиков и находится на одной прямой, что также видно из рис. 27. Помимо практически двукратного снижения разброса поперечных скоростей (с 10% до 6%), дискретный метод значительно снижает время на оптимизацию.



*Рис. 27. Функции распределения фракций пучка в гиротроне с гладким и оптимальным профилированным анодами.*

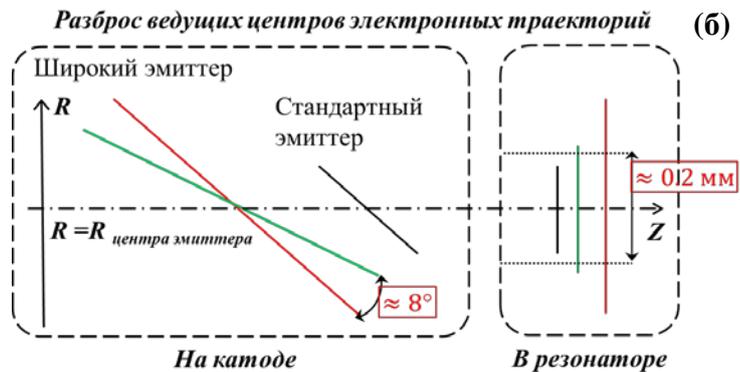
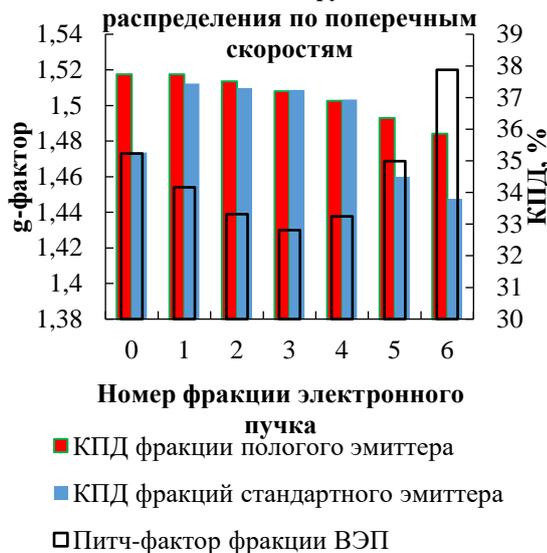
Но даже оптимальная функция распределения электронного пучка может быть бесполезной в случае большого позиционного разброса, что особенно важно для гиротронов мегаваттного уровня мощности. Рассмотрим оптимизированный вариант МИП с уширенным эмиттером. Рассмотрим рис. 28. В случае широкого эмиттера толщина ВЭП в резонаторе может оказаться довольно большой. Краевые фракции электронного пучка могут плохо или вообще не взаимодействовать с рабочей модой резонатора, в результате чего КПД генерации будет далек от оптимального. Исправить это можно наклоном эмиттера, сохранив при этом площадь эмиссии. Однако, при уходе от оптимальных углов подхода силовых линий магнитного поля к поверхности эмиттера [39], качество электронного пучка заметно ухудшается и решение данной проблемы может быть найдено как раз профилированием анода.



**Рис. 28.** Влияние ширины эмиттера и его наклона на эффективность взаимодействия электронного пучка с модой резонатора.

Рассмотрим оптимизированную функцию распределения уширенного эмиттера (рис. 29(а)). Из данного рисунка видно, что несмотря на небольшое увеличение питч-фактора у краевых фракций пучка, КПД генерации не увеличивается, а у фракций 0, 5 и 6 так и вовсе снижается (синие столбцы). Данный факт демонстрирует недостаточную эффективность взаимодействия данных фракций с волной, что вызвано неоптимальным положением ведущих центров. Следовательно, дальнейший путь максимизации КПД – уменьшение толщины ВЭП в резонаторе путем наклона эмиттера и смещение ведущих центров электронного пучка в область больших радиусов (так как центр эффективного взаимодействия лежит в области фракций 1,2 и 3 с большими радиусами). Из расчетов зависимости КПД генерации от радиуса ведущих центров было получено, что область оптимального взаимодействия составляет 0.2 мм (рис. 29(б)). Уход из этого диапазона будет сопровождаться снижением КПД, поэтому для минимизации негативного эффекта отклонение должно быть симметричным. Для это угол наклона эмиттера к оси симметрии гиротрона был уменьшен. Сильное изменение угла и компрессия толщины может привести к возмущению ВЭП из-за большой плотности заряда. В результате численного моделирования электронных траекторий удалось добиться формирования ВЭП без потери качества его параметров при уменьшении угла наклона эмиттера на  $8^\circ$  (рис. 29(б)). Результаты КПД генерации каждой фракции пучка приведены на рис. 29(а) в виде красных столбцов.

(а) КПД фракций электронного пучка с широким эмиттером для двух углов наклона катода при неизменной функции



**Рис. 29.** КПД генерации для стандартного угла наклона эмиттера (синие столбцы) и уменьшенного (красные столбцы) и питч-фактор фракций ВЭП (а). Схема положения ВЭП в области эмиттера и резонаторе для стандартного угла наклона и уменьшенного (б).

Сравнивая КПД генерации фракций (красные и синие столбцы на рис. 29(а)), видно, что такой подход к оптимизации электронного пучка дает возможность дополнительного существенного (до 3%) повышения эффективности взаимодействия фракций электронного пучка с рабочей волной резонатора. Таким образом, наклон эмиттера позволит не только уменьшить поперечные размеры ЭОС гиротрона при сохранении качества ВЭП, но и повысить эффективность генерации. Отметим, что даже малое увеличение КПД в случае гиротронов мегаваттного уровня мощности является существенным как с точки зрения получения большей мощности генерации, так и уменьшения нагрузки на коллектор. Уменьшение поперечных размеров ЭОС позволит упростить и удешевить магнитную систему гиротрона, что также является важной задачей, особенно при продвижении в область больших частот, где уменьшение диаметра проходного отверстия магнита играет важную роль.

## 2.6 Разработка магнитной системы для неадиабатической ЭОС и расчет распределения температуры в катодном узле

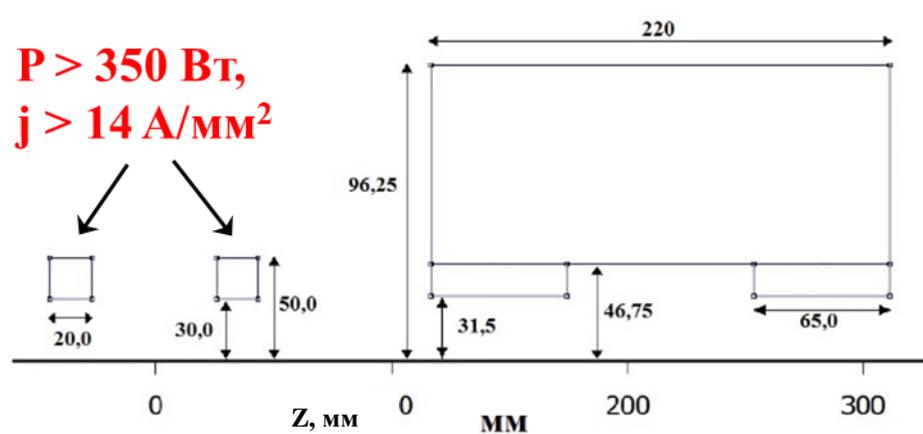
В настоящее время в гиротронах для формирования винтового электронного пучка (ВЭП) повсеместно используют магнетронно-инжекторные пушки (МИП) с адиабатической схемой формирования электронного потока как наиболее проверенной и надежной. Но, несмотря на все достоинства адиабатической МИП, вследствие специфики формирования ВЭП в адиабатических полях, на процесс формирования электронного пучка сильное влияние оказывают такие

принципиально не устранимые факторы как тепловые скорости стартующих электронов, шероховатость эмиттера и ряд других. В результате типичная суммарная величина разброса вращательных скоростей электронов  $\delta v_{\perp}$  перед входом в резонатор прибора за счет указанных факторов достигает 20-25%, что затрудняет, вследствие наличия магнитного зеркала перед входом в резонатор, реализацию пучков с большими (порядка 1.5 и более) питч-факторами. Последнее, в свою очередь, ограничивает КПД и выходную мощность прибора.

Роль указанных выше негативных факторов, влияющих на величину  $\delta v_{\perp}$ , можно полностью устранить или, по крайней мере, резко уменьшить при использовании неадиабатических систем формирования ВЭП, предложенных в работах [17, 18], что открывает возможности дальнейшего увеличения мощности и КПД технологических гиротронов.

### 2.6.1. Синтез конфигурации катодных катушек и формы ферромагнитной вставки для формирования заданного профиля магнитного поля.

Как отмечалось ранее, магнитная система гиротрона с неадиабатической схемой формирования винтового электронного пучка состоит из основного соленоида, обеспечивающего требуемое для электронно-циклотронного резонанса магнитное поле, и системы маломощных катушек, создающих определенную конфигурацию магнитного поля в катодной области. В качестве основной магнитной системы (рис. 30) планируется использовать существующий соленоид с однородным участком магнитного поля интенсивностью 0.46 Т. Специфика используемой схемы формирования ВЭП требует обеспечения достаточно большого наклона магнитного поля к оси системы в области установки торцевого катода. С этой целью, первоначально, как и в более ранних работах [28, 56] симметрично относительно плоскости эмиттера устанавливалась пара встречных катушек, позволяющая создать требуемые компоненты магнитного поля  $B_r$  и  $B_z$  в зоне формирования электронного пучка. Однако даже после оптимизации конфигурации и продольного положения указанных катушек они характеризовались крайне высокой потребляемой мощностью  $P$  и плотностью тока  $J$ :  $P > 350 \text{ Вт}$ ,  $J > 14 \text{ А/мм}^2$ . В силу столь высокой плотности тока эффективное охлаждение и, соответственно, работа в непрерывном режиме представляются нереализуемыми.



*Рис. 30. Схема первоначальной версии магнитной системы для гиротрона с неадиабатической системой формирования ВЭП.*

В связи с этим была поставлена задача создания конфигурации соленоидов в катодной области с существенно сниженным потреблением мощности. При этом необходимо было сохранить распределение магнитного поля в области формирования пучка, а именно его компонент  $B_r$  и  $B_z$ .

Как известно, существенно снизить потребление соленоидов возможно с применением ферромагнитных экранов, концентрирующих магнитное поле в интересующей области. Особенно эффективно использование данного метода в областях с низкой интенсивностью полей – в тех областях значений, где коэффициент магнитной проницаемости для доступных металлов с нелинейной В-Н характеристикой  $\mu \gg 1$ .

Первоначальная схема магнитной системы и распределение магнитного поля представлено на рис. 30 и далее 32 (черная линия). Для того, чтобы добиться такого же распределения магнитного поля в области катода было предложено использовать ферромагнитную вставку. Ее установка не только должна искривлять определенным образом силовые линии магнитного поля между встречными катушками, но и снизить их энергопотребление. При этом необходимо было подобрать такую конфигурацию ферромагнетика и катодных катушек, которая бы обеспечивала заданный профиль компонент магнитного поля  $B_r$  и  $B_z$ .

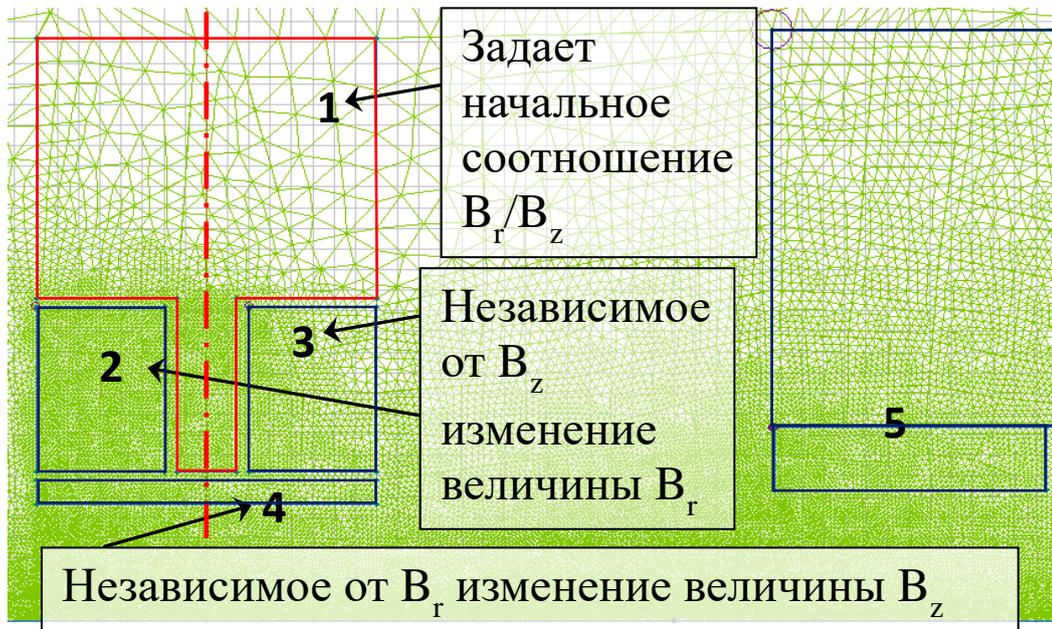
Метод простого подбора форм экранов, геометрии и мощности соленоидов не может дать быстрого и правильного ответа на поставленную задачу при наличии связи  $B$ ,  $B_r$ ,  $B_z$  и использования нелинейного материала. Дальнейшее решение задачи может осуществляться двумя способами. Первый – написание сложного программного кода оптимизации по множеству параметров, второй – разработка метода подбора, учитывающего физику распределения  $B_r$  и  $B_z$  в таких системах. В связи с тем, что написание подобного кода требует много времени и усилий, было принято остановиться на последнем варианте.

Для того, чтобы подобрать определенные значения для  $dB_z/dz$ ,  $B$ ,  $B_r$  и  $B_z$  в заданной точке, необходимо научиться изменять каждый из параметров независимо от других. В первую очередь,

рассмотрим вариант независимого подбора  $B_r$ . Известно, что симметричные катушки с одинаковым по модулю, но разным по направлению полем будут создавать в вертикальной плоскости (назовем ее нулевой плоскостью, изображена штрих-пунктиром на рис. 31) симметрии  $B_z=0$  и  $B_r \neq 0$ . Данное утверждение возьмем за основу дальнейших рассуждений и сформулируем методику расчета подобных задач.

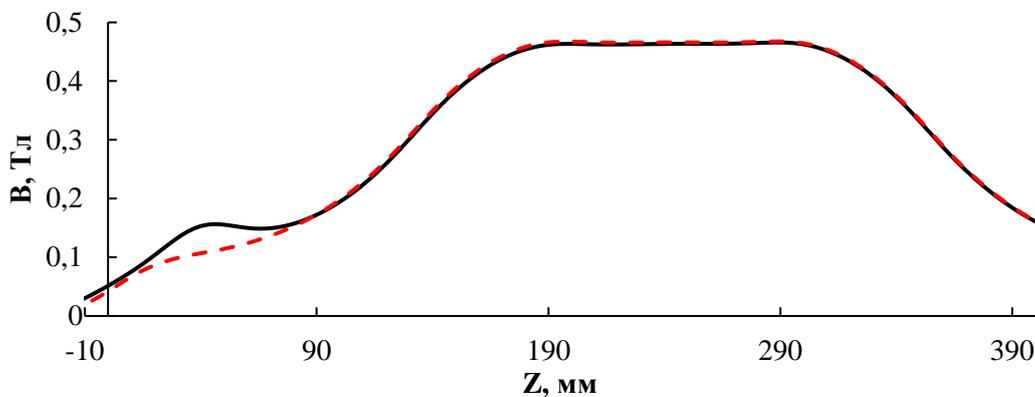
Для повышения магнитного поля в интересующей нас области требуется использование ферромагнетика. Несимметричность его формы относительно нулевой плоскости при наличии встречных катушек заметно усложнит подбор требуемой конфигурации магнитного поля. Поэтому будет использована (для первого этапа расчетов) симметричная Т-образная форма экрана, помещенная между катодных катушек.

Сперва, было проведено моделирование распределения магнитного поля с наличием основного соленоида и Т-образной вставки без катодных катушек. Ферромагнетик в области малого магнитного поля (конец фронта магнитного поля основного соленоида) сильно искажает его силовые линии, увеличивая  $B_r$  и уменьшая  $B_z$ . Таким образом мы зафиксировали начальные значения данных компонент магнитного поля, близких к искомым. Затем были добавлены встречные катушки в ферромагнитную вставку. Учитывая симметрию данного изменения системы, наличие катушек не повлияет на компоненту  $B_z$ , но заметно повысит  $B_r$ . Таким образом мы получили возможность независимого управления г-товой компонентой магнитного поля. Доведя данное значение до требуемых величин путем варьирования тока обмоток, необходимо добиться требуемых значения для  $B_z$ . Очевидно, что сделать это за счет увеличения мощности основного соленоида нельзя в виду его влияния на все поле в целом. Однако, можно снова воспользоваться принципом симметрии и ввести дополнительную плоскую катушку с положительным направлением тока (как и у основного соленоида), имеющую симметричную форму относительно нулевой плоскости. Данное решение позволяет изменять  $B_z$  без влияния на  $B_r$ . Таким образом, подобная конфигурация ферромагнетика и катушек дает возможность независимой корректировки  $B_r$  и  $B_z$ , что и требовалось для решения поставленной задачи. Схема конфигурации магнитов и экранов представлена на рис. 31.



*Рис. 31. Конфигурация магнитной системы. 1 – симметричная ферромагнитная вставка, 2 и 3 – катушки Гельмгольца, 4 – дополнительный соленоид для корректировки  $V_z$ , 5 – основная магнитная система.*

Результаты моделирования распределения магнитного поля в данной системе и сравнение с заданным профилем показаны на рисунке 32. Как видно из данных графиков, совпадение с первоначальным распределением поля достигнуто с хорошей точностью. Дальнейшая оптимизация может обеспечить еще большее соответствие первоначальной модели благодаря возможности независимой подстройки  $V_r$  и  $V_z$ . В данном случае, профиль магнитного поля за областью первого шага электронной траектории оказался более приемлемым с точки зрения формирования ВЭП ввиду лучшей монотонности. Поэтому было принято решение использовать данный профиль магнитного поля в расчете электронной оптики. Наличие ферромагнитной вставки позволило снизить потребление катушек практически в 20 раз (до 18 Вт), что снимает барьеры на их реализацию.



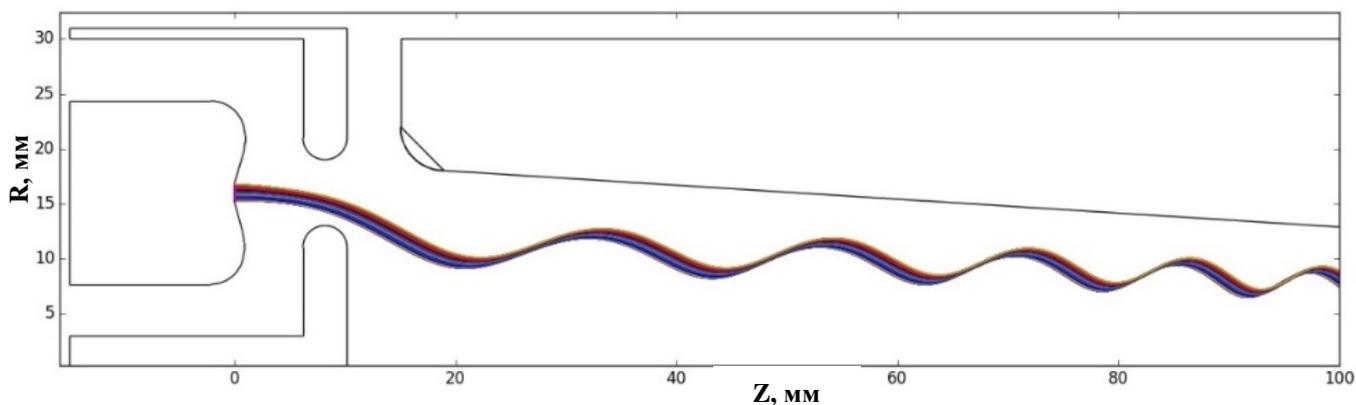
*Рис. 32. Сравнения результатов распределения профиля магнитного поля в новой магнитной системе (красная штрихованная линия) и исходной (черная линия).*

Влияние катушек Гельмгольца в системе с ферромагнитной вставкой минимизирует влияние на магнитное поле основного соленоида в области компрессии электронного пучка. Это позволяет избежать немонотонности магнитного поля и, следовательно, негативных возмущений электронного потока. В результате, разброс поперечных скоростей при рабочем токе  $I = 3$  А оказался вдвое меньше, чем в исходной системе, и практически не зависил от роста рабочего тока.

Траекторный анализ проводился с помощью программы CST STUDIO SUITE и программ обработки, реализованных на языке Python [57]. Расчет траекторий (рис. 33) велся до сечения, где магнитное поле составляет 90% от рабочего, далее параметры пучка пересчитывались в рабочее пространство прибора по адиабатической теории. Расчетные параметры пучка при различном токе приведены в таблице 6.

<i>Таблица 6. Параметры ВЭП</i>		
<b>I, А</b>	<b>g</b>	<b><math>\delta v_{\perp},\%</math></b>
0.001	1.64	5.15
1.0	1.69	5.28
2.0	1.74	5.29
3.0	1.79	5.8

Отметим, что установка ферромагнитной вставки положительно сказалась на характеристиках ВЭП: разброс осцилляторных скоростей уменьшился вдвое, по сравнению с электронно-оптической системой (ЭОС), использующей исходную конфигурацию соленоидов, что открывает пути увеличения рабочего питч-фактора вплоть до 2, или даже больше. Интересно, что в отличие от традиционных МИП гиротронов питч-фактор увеличивается с ростом тока (такое поведение типично для неадиабатических систем), в то время как скоростной разброс практически не меняется и остается на уровне, существенно меньшем, чем в адиабатических МИП.



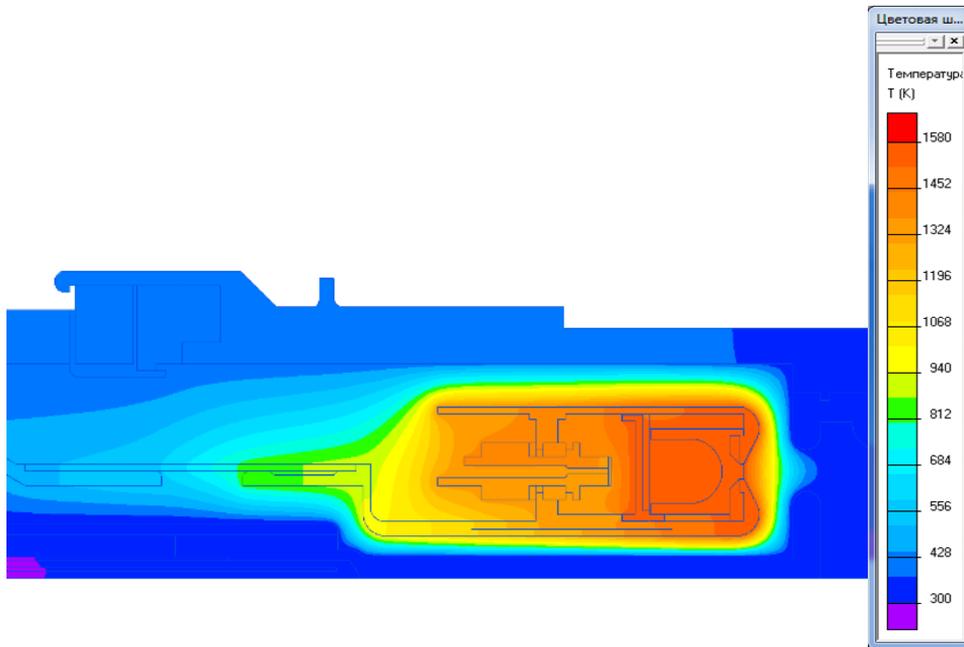
**Рисунок 33.** Геометрия диодной электронной пушки. Показан ход электронных траекторий для случая с ферромагнетиком. Эмиттер находится в плоскости начала координат. Все размеры даны в мм.

### 2.6.2 Расчет распределения температуры в катодном узле неадиабатической ЭОС

Подобные системы до сих пор не получили широкого распространения, в основном, по причине сложности конструкции электродов и температурных деформаций в процессе работы. Критичность к данным эффектам обусловлена наличием длинных элементов электродов, которые должны оставаться соосными в процессе длительного нагрева и дальнейшего охлаждения в процессе выключения работы прибора. Поэтому детальный расчет температурного распределения, учет сдвигов и оптимизация конструкции таких пушек является важной задачей, необходимой для реализации подобных систем в гиротронах.

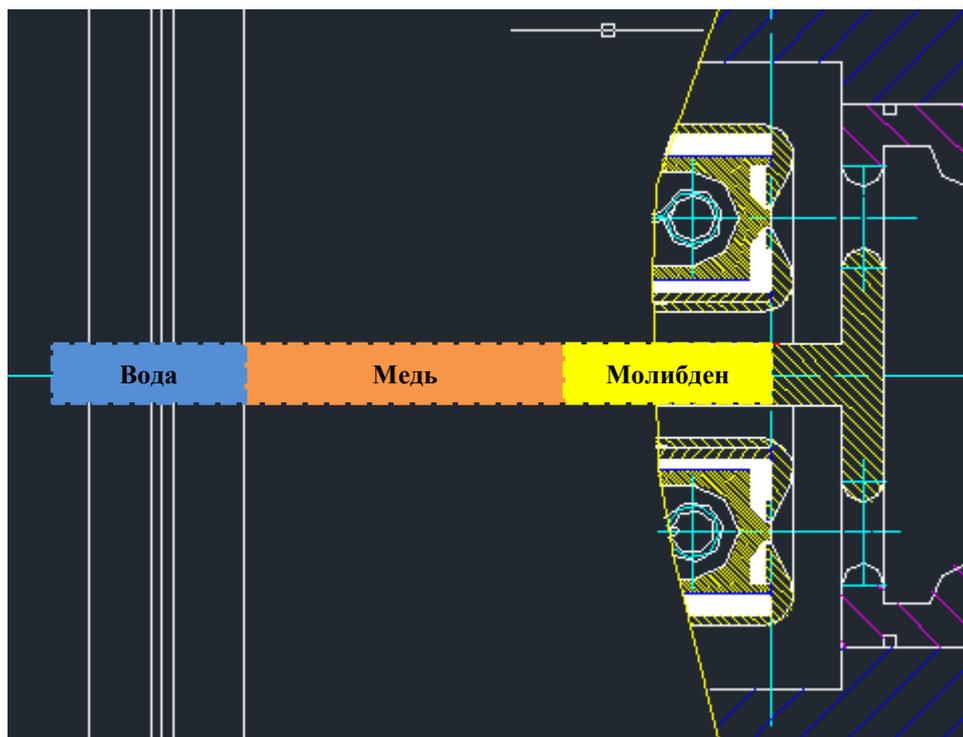
Одной из проблем является создание центрального анода, состоящего из нескольких деталей и имеющего длину несколько сотен миллиметров. Горизонтальное положение, наличие нескольких элементов конструкции из разных материалов усложняет возможность сохранения аксиальной симметрии относительно центральной оси гироприбора, особенно в процессе сильного нагрева при работе. Различное температурное расширение используемых материалов может сильно сказаться на прочности фиксации деталей данного электрода.

Детали, расположенные в зоне эмиттера, наиболее сильно подвержены термической деформации, которая может привести как к изменению формы электродов, так и к загрязнению вакуума. В этой связи, в данной области крайне важно подобрать правильные материалы деталей конструкции. Для выявления наиболее горячих областей в программе ELCUT 5.6 было проведено численное моделирование распределения температуры. Для корректного анализа были заданы свойства используемых элементов, точки постоянных температур (эмиссия, охлаждение). Результатом моделирования стала карта температур. Самые горячие области, в частности катод и часть центрального анода, было решено сделать из молибдена. Данный материал крайне устойчив в рассматриваемых температурных условиях, например, по сравнению с медью. Но вторая обладает лучшей теплопроводностью, поэтому медный элемент послужит мостом теплоотвода между молибденовым стержнем (центральным анодом) и системой водяного охлаждения.



*Рис. 34. Распределение температуры в катодной области.*

Полученные результаты были использованы для подбора формы и материалов элементов конструкции, обеспечивающих наиболее надежную конструкцию и эффективный теплоотвод.



*Рис. 35. Схема устройства внутреннего анода.*

Корректность используемых моделей подтверждена результатами пирометрирования. Анализ распределения температуры позволил определить самые горячие области и дать рекомендации по выбору материалов и оценить относительные удлинения электродов в процессе нагрева.

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ МАГНИТО-ЭКРАНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

### 3.1. Разработка и экспериментальное тестирование МЭС для технологических гиротронов нового поколения

Гироприборы К-диапазона используются в качестве источников мощного непрерывного электромагнитного излучения в технологических комплексах для получения алмазных пленок и дисков, синтеза диэлектрических материалов с уникальными физико-техническими свойствами, производства пучков многозарядных ионов [2–4]. Типичная мощность гироприборов, входящих в состав лабораторных комплексов, составляет несколько киловатт. Новые потенциальные применения технологических гиротронов, а также переход к промышленным установкам требуют повышения мощности в несколько раз (до 25–30 кВт), что в совокупности с непрерывным режимом работы обуславливает необходимость повышения энергоэффективности комплекса в целом. Подавляющее число современных технологических гиротронов работает на второй гармонике циклотронной частоты [1], что позволяет использовать соленоиды с водяным (или масляным) охлаждением, магнитной индукцией около 0.5 Тл и умеренным (10–15 кВт) энергопотреблением. Полный КПД таких комплексов составляет около 20%.

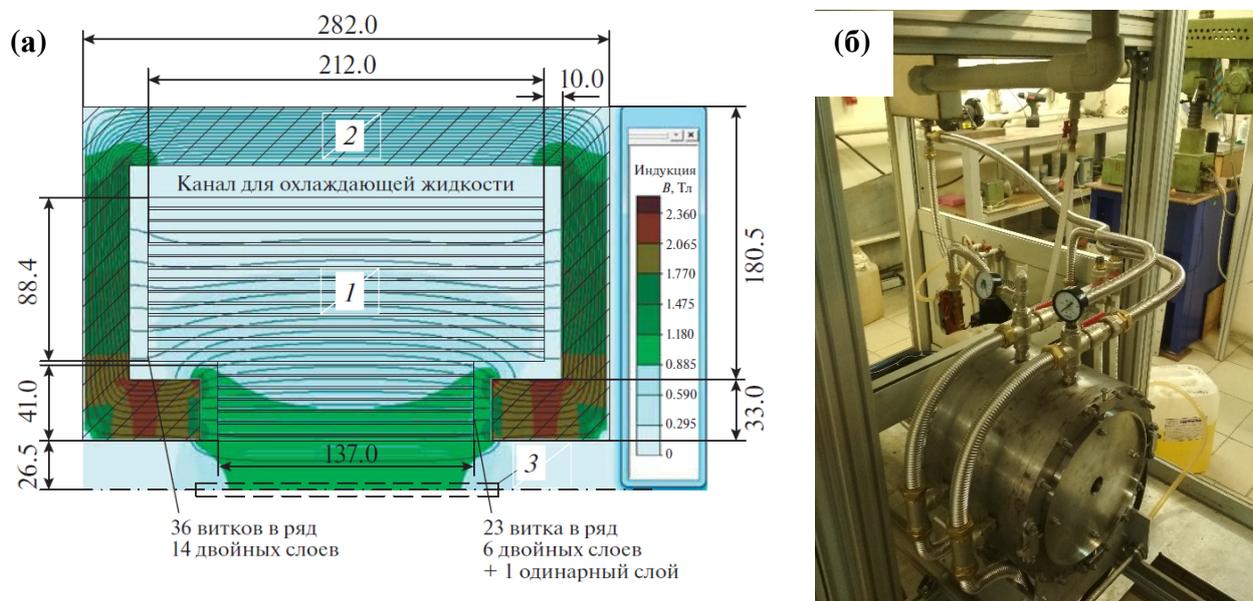
По мере повышения генерируемой мощности существенным ограничивающим фактором становится обеспечение устойчивой одномодовой генерации рабочего типа колебаний в широком диапазоне технических параметров. При этом в гиротронах на гармониках гирочастоты наибольшую опасность представляет возбуждение паразитных мод. Наиболее просто проблема селекции рабочей моды решается путем перехода к работе на основном циклотронном резонансе. Кроме того, электронно-волновое взаимодействие с первой гармоникой рабочего типа колебаний обеспечивает при выборе соответствующих условий максимально возможный КПД [10]. Однако переход к генерации на основном циклотронном резонансе сопровождается двукратным повышением рабочего магнитного поля, что влечет за собой четырехкратное повышение мощности питания магнитной системы. В связи с этим актуальной задачей является снижение мощности питания магнитной системы, особенно для долговременных процессов, продолжительность которых может достигать нескольких недель (CVD технологии).

Эффективным методом снижения энергопотребления магнитной системы является экранирование магнитного поля рассеяния, что позволяет либо радикально уменьшить мощность источников питания при фиксированном значении магнитной индукции, либо обеспечить заметное повышение магнитного поля при фиксированной мощности. В частности, для существующих технологических комплексов рабочие частоты могут быть сдвинуты даже в W-диапазон без использования сложных и дорогостоящих криомагнитов. В данном разделе представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования

магнито-экранированной системы (МЭС), предназначенной для непрерывных гироприборов, работающих на основном циклотронном резонансе с рабочей частотой 24–50 ГГц.

Основной задачей является создание магнитной системы для технологических комплексов (однородный участок магнитного поля длиной 65 мм, индукция 1.024 Тл), требующей минимальных изменений источников питания (энергопотребление <15 кВт, предельные значения рабочих тока и напряжения 120 А и 120 В соответственно). Простые оценки показывают, что в такой системе энергопотребление снижается более чем в 3 раза по сравнению с аналогичной системой без экранов. Первоначальная форма экранов выбиралась **аналогично п. 2.1**. Последующая численная оптимизация с помощью программы ELCUT 5.6 позволила определить форму и размеры катушек и ферромагнитных экранов (рис. 36а).

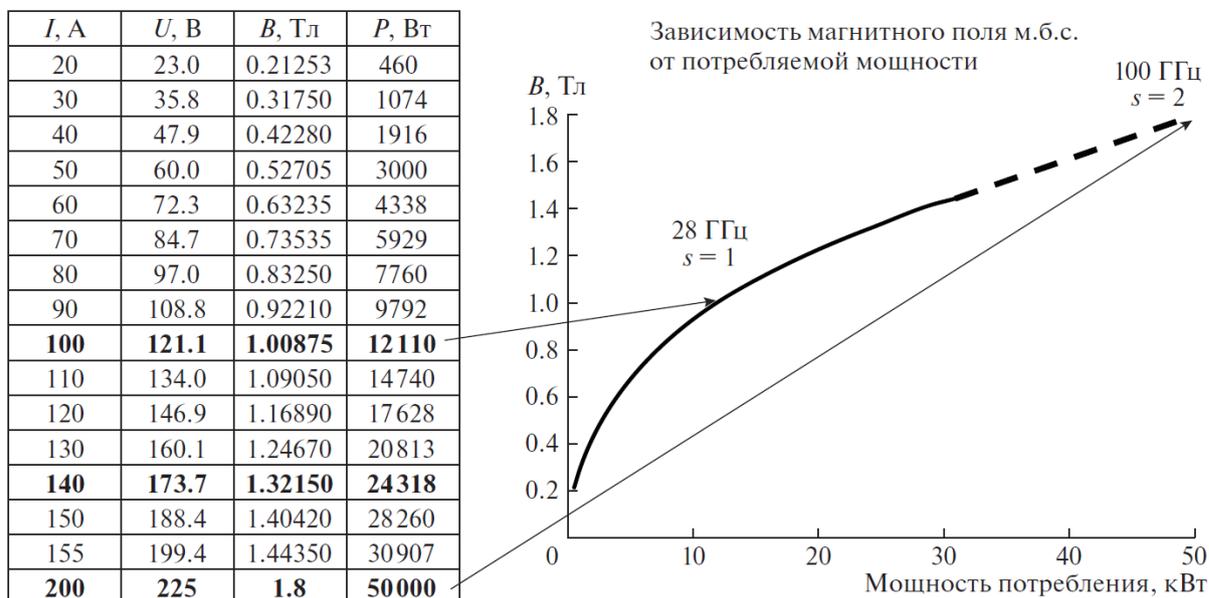
В качестве материала для экранов использована сталь АРМКО. Экспериментальный стенд показан на рис. 36б. Для охлаждения соленоида используется полиметилсилоксановая жидкость ПМС-5 и теплообменник ПМС-5/вода.



**Рис. 36. (а)** - общий вид магнитной системы и карта интенсивности магнитного поля в оптимизированной МЭС 1 – медная обмотка (шина сечением  $5.8 \times 2.8 \text{ мм}^2$  с лаковой изоляцией, сечение медного провода  $5.17 \times 2.65 \text{ мм}^2$ ), 2 – ферромагнитный корпус системы, 3 – характерный масштаб области электронного пучка (штриховая линия). Размеры даны в миллиметрах; **(б)** - фотография МЭС в экспериментальном стенде.

Измерения индукции магнитного поля выполнены датчиком Холла (модель Lake Shore Gaussmeter Model 450) с погрешностью не более  $\pm 0.10\%$ . В ходе эксперимента получена зависимость интенсивности поля  $B$  в центре соленоида от мощности источников питания  $P$  (рис. 37). В эксперименте максимальная мощность потребления составила 31 кВт, что позволило достичь индукции магнитного поля 1.45 Тл. Экстраполяция данных до 50 кВт потребляемой

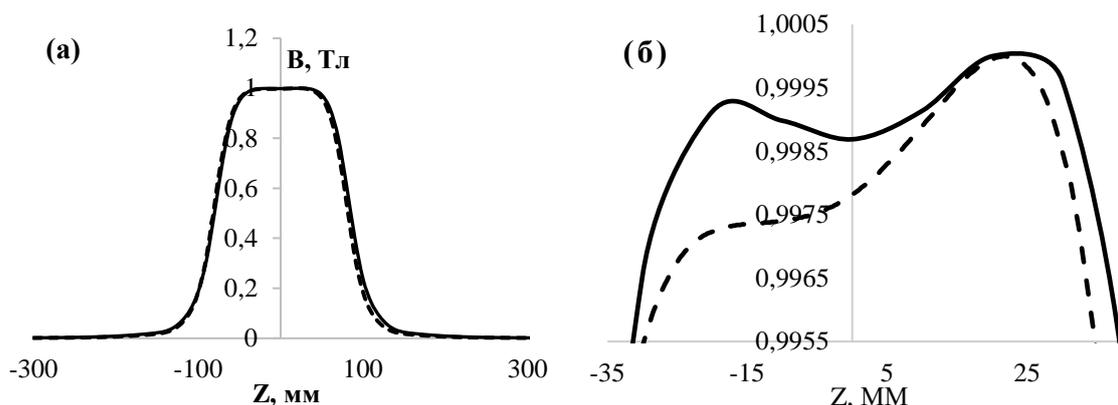
мощности с учетом нелинейной зависимости  $B(H)$ , связанной с насыщением материала экранов, указывает на возможность генерации колебаний с рабочими частотами до 50 ГГц на первой гармонике гирочастоты (и соответственно до 100 ГГц на второй гармонике). Во всех экспериментальных режимах МЭС демонстрировала долговременную стабильную работу со стационарной температурой корпуса системы не выше 40°C.



**Рис. 37.** Экспериментальная зависимость индукции от потребляемой мощности. Указаны соответствующие частоты генерации при работе на первой ( $s = 1$ ) и второй ( $s = 2$ ) гармониках циклотронной частоты. Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – экстраполяция.

В дальнейшем при модернизации МЭС могут быть использованы сплавы с другими В–Н-характеристиками, что позволяет надеяться на дальнейшее снижение энергопотребления при тех же значениях магнитных полей. Таким образом, например, для СВЧ-приборов, работающих в диапазоне 20–40 ГГц на второй гармонике, может быть реализована МЭС с еще более эффективным магнитопроводом за счет использования сплава пермаллоя. Данный материал раньше входит в насыщение по сравнению с АРМКО, однако на уровне магнитных полей до 1 Тл некоторые модификации пермаллоя имеют в несколько раз большие значения магнитной проницаемости. Приблизительные оценки мощности потребления подобных систем (в случае АРМКО для 28 ГГц на второй гармонике потребуется в 2 раза меньшее магнитное поле и соответственно в 4 раза меньшее энергопотребление (около 3 кВт) и еще меньшее в случае использования пермаллоя) позволяют надеяться на возможность создания МЭС без жидкостной системы охлаждения. Применение сплавов с большей индукцией насыщения (пермендюр, суперпермендюр) и утолщение экранов могут обеспечить возможность использования МЭС в более высоких магнитных полях. Отметим, что достигнутые в эксперименте значения магнитной

индукции позволяют использовать разработанную магнитную систему для широкого класса гиросприборов (генераторов и усилителей) диапазона 24–50 ГГц.



**Рис. 38.** Расчетное (штриховая кривая) и измеренное (сплошная кривая) распределения осевого магнитного поля, включающего соответственно область формирования электронного потока (а) и пространство взаимодействия в масштабе 0.5% по магнитному полю (нормированные значения полей) (б).

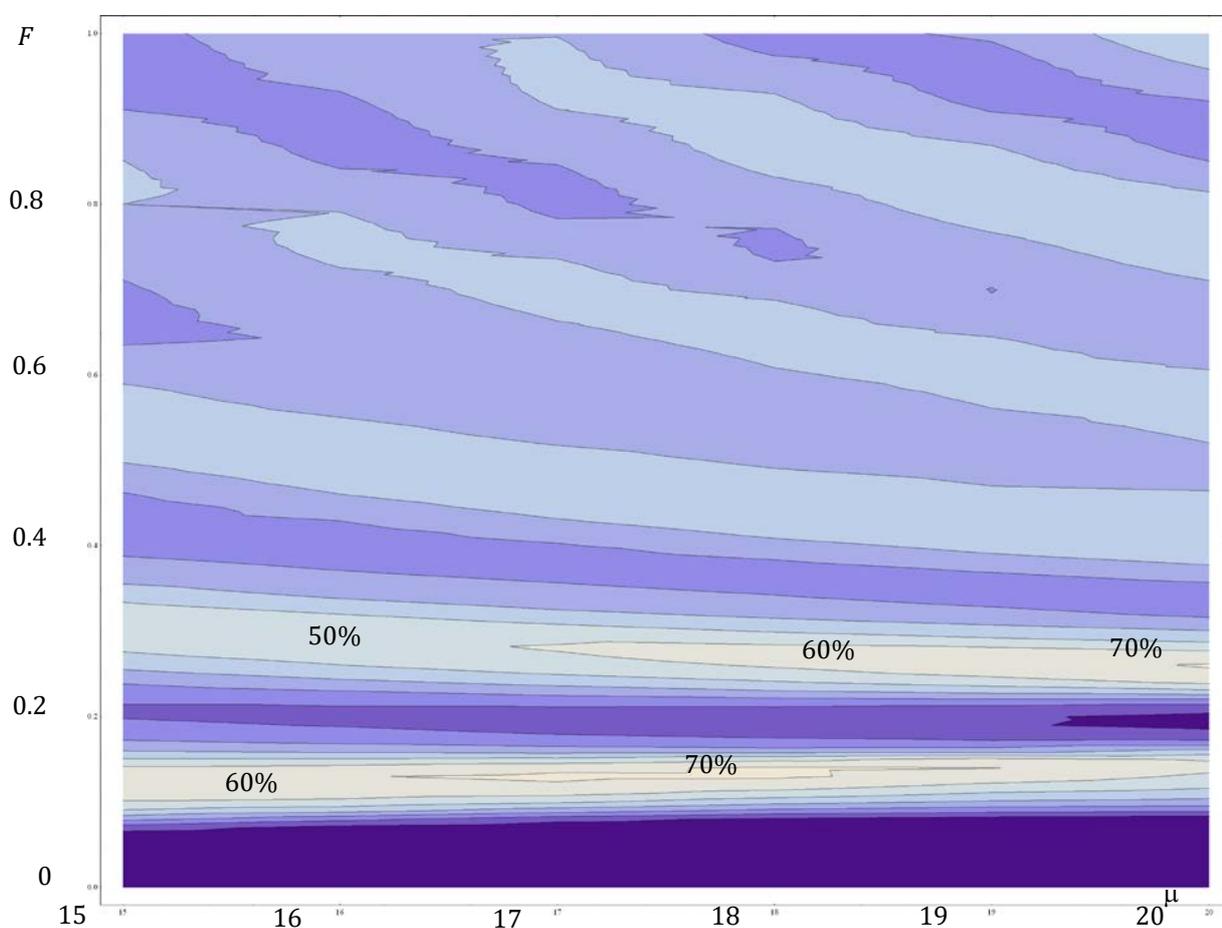
Для режима  $I = 100$  А,  $U = 121$  В, соответствующего входящим в состав технологических стендов источникам питания и позволяющего получить магнитную индукцию 1.024 Тл, необходимую для генерации колебаний с рабочей частотой 28 ГГц, было измерено распределение магнитного поля. Продольное распределение поля на оси симметрии системы представлено на рис. 38а, а более детальный профиль поля в области пространства взаимодействия – на рис. 38б. В ходе экспериментов нарушений аксиальной симметрии магнитного поля не выявлено. Результаты экспериментов согласуются с расчетными данными. Незначительные отличия экспериментальных и расчетных данных связаны с расхождением реальных В–Н-характеристик от использованных в расчетной модели и могут быть легко скорректированы.

### **3.2. Оптимизация параметров электронно-волнового взаимодействия для основного режима работы гиротрона 28 ГГц/25 кВт. Анализ возможности генерации на частотах 35, 45 и 95 ГГц.**

Для удешевления изготовления экспериментального образца гиротрона в нем предполагается использовать существующие источники питания. Это однозначно определяет ускоряющее напряжение и ток пучка:  $U = 23$  кВ,  $I = 2.4$  А. Опыт расчета гиротрона на 24 ГГц, а также расчета ряда других технологических гиротронов показывает, что в рассматриваемом диапазоне частот можно реализовать достаточно высокий пич-фактор, более 1.5. поэтому далее полагалось, что ЭОС гиротрона способна сформировать ВЭП с  $g = 1.6$ .

Теоретический анализ и расчет любого гиротрона всегда целесообразно начинать с выбора рабочей моды и анализа электронно-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона. Однако в

данной задаче, из соображений минимизации потребления электроэнергии всего комплекса, сначала оценивался КПД всей системы. Первой попыткой поиска рабочих параметров было использование диаграмм изо-КПД, представленных в работе [36]. Рассматривалась диаграмма поперечного изо-КПД в зависимости от рабочих параметров  $F$  и  $\mu$ . Из существующих карт трудно определять значения параметров в различных точках диаграмм, ввиду их излишне большого масштаба и экспоненциального вида шкал. Поэтому, используя модель с фиксированной структурой поля, была решена система уравнений (16)-(23) с численным перебором параметров в области максимальных значений поперечного КПД, которые, согласно [36], находятся в диапазоне  $F \in [0,1]$  и  $\mu \in [15,20]$ . Величина  $\Delta$  для оптимума поперечного КПД, согласно [36], близка к 0.5. Поэтому, при решении уравнений (16)-(23)  $\Delta$  полагалась равной 0.5. Результаты решения данной системы приведены на диаграмме изо-КПД (см. Рис. 39).



**Рис. 39.** Карта постоянных значений поперечного КПД  $\eta_{\perp}$  от  $F$  и  $\mu$  при  $\Delta = 0.5$  для первой гармоники  $n=1$ . Градации цвета указывают величину  $\eta_{\perp}$ .

$$(16) \quad f(z) = e^{-\left(\frac{z}{L}\right)^2}$$

$$(17) \quad \frac{da}{d\zeta} - \frac{i}{n}(\Delta + |a|^2 - 1) = i\Phi_n^* f(\zeta)F, \quad \text{где } a\left(\zeta_{\text{вход}}\right) = e^{-i\frac{\theta_0}{n}}$$

Здесь:

$\theta_0$  – фаза вращательного движения электронов в магнитном поле

$F$  – параметр, пропорциональный амплитуде высокочастотного поля

$$(18) \quad \zeta = \pi \frac{\beta_{\perp}^2}{\beta_{\parallel}} \frac{z}{\lambda} - \text{безразмерная продольная координата}$$

$\beta_{\parallel}$  и  $\beta_{\perp}$  – соответственно отношение продольной и поперечной компонент скорости электрона к скорости света

$$(19) \quad f(\zeta) = e^{-\left(\frac{2\zeta}{\mu}\right)^2}$$

$$(20) \quad \Phi_n^* = (a^{n-1})^*$$

$$(21) \quad \mu = \pi \frac{\beta_{\perp}^2}{\beta_{\parallel}} \frac{L}{\lambda} - \text{параметр, пропорциональный длине резонатора}$$

$$(22) \quad \Delta = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \left( 1 - \frac{n\omega_{Ho}}{\omega} \left( 1 - \frac{\beta_{\perp}^2}{2} - \frac{\beta_{\parallel}^2}{2} \right) \right) -$$

– безразмерная расстройка между частотой рабочего типа колебаний  $\omega$  и резонансной гармоникой гирочастоты

При приведенной выше нормировке поперечный КПД:

$$(23) \quad \eta_{\perp} = 1 - \int_0^{2\pi} |a(\zeta_{\text{выход}})|^2 d\theta_0$$

После анализа нескольких точек в области максимально возможных поперечных значений КПД стало понятно, что максимальный полный  $\eta$  гиротрона не соответствует максимальной эффективности комплекса в целом (с учетом магнитной системы). Это связано с несколькими факторами. Во-первых,  $\eta_{\perp} = 70\%$ , достигается на весьма больших значениях  $\mu$ , которое напрямую (см. формулу (21)) связано с длиной участка однородного магнитного поля. Ранее было выяснено, что основная мощность питания экранированных магнитных систем идет на создание однородного участка, следовательно, его увеличение снизит эффективность всего комплекса. С другой стороны, при пересчете  $\eta_{\perp}$  в  $\eta$ , получается, что полный КПД сильно уменьшается. Это связано с влиянием дифракционной и омической добротностями (см. формулы 24-25).

$$(24) \quad Q_{dif} = 8 * \pi * \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2$$

$$(25) \quad Q_{ohm} = 650 * \nu * \lambda^{1/2} * \left(1 - \frac{m^2}{\nu^2}\right)$$

Несмотря на то, что в гиротронах, работающих в частотном диапазоне 24-30 ГГц, доминирует омическая добротность, при больших  $\mu$  (примерные значения 15-20) и, соответственно,  $L$  влияние дифракционной заметно растет. Обратимся к формуле (26), в которой выражен полный КПД гиротрона.

$$(26) \quad \eta = \frac{g^2}{1+g^2} \eta_{\perp} \left(1 - \frac{Q}{Q_{ohm}}\right)$$

Из нее видно, что эффективность перехода от  $\eta_{\perp}$  к  $\eta$  сильно зависит от множителя  $1 - \frac{Q}{Q_{ohm}}$ , где

$Q$  – полная добротность, определяемая формулой (27):

$$(27) \quad Q = \frac{Q_{dif} * Q_{ohm}}{Q_{dif} + Q_{ohm}}$$

Подставив в формулу (26) формулы (24), (25) и (27), получаем явный вид зависимости (формула (21))  $\eta$  от  $Q_{dif}$  и  $Q_{ohm}$ , выраженную через параметры  $L$ ,  $g$ ,  $\lambda$ ,  $v$ ,  $\nu$ .

$$(28) \quad \eta = \frac{g^2}{1+g^2} \eta_{\perp} \left( 1 - \frac{8\pi * (\frac{L}{\lambda})^2}{8\pi * (\frac{L}{\lambda})^2 + 650 * \nu * \lambda^{1/2} * (1 - \frac{m^2}{v^2})} \right)$$

$\nu = kR$  – корень функции Бесселя, где  $R$  – радиус резонатора,  $k = \frac{\omega}{c}$

С ростом  $L$ ,  $Q_{dif}$  увеличивается и может достичь значений, сопоставимых с  $Q_{ohm}$ . В случае, если  $Q_{dif} = Q_{ohm}$  и питч-факторе  $g = 1.6$  мы получим, что  $\eta = 0.36\eta_{\perp}$ , что даже при максимально возможных  $\eta_{\perp} = 70\%$  очень мало. Это означает, что необходимо искать оптимальную рабочую точку на диаграмме изо-КПД в области меньших  $\mu$ . Чтобы получить полный набор параметров, позволяющих максимально оптимизировать  $\eta$ , необходимо учесть зависимость  $F$ ,  $\mu$ ,  $\Delta$ ,  $\eta_{\perp}$  от параметра тока пучка  $I$ , которая выражается по формуле (29):

$$(29) \quad I = \left( F^2 * \frac{\mu^{2(3-n)}}{\eta_{\perp}} \right)$$

где  $n$  – гармоника циклотронного резонанса

Для реальных задач используется ток в Амперах  $I$  [A], который может быть получен из параметра тока через формулу (30):

$$(30) \quad I [A] = \frac{I}{(0.24 * Q * 10^{-3} * (\pi * g)^{2 * (3-n)} * (\frac{L}{\lambda})^{5-2 * n})} * G$$

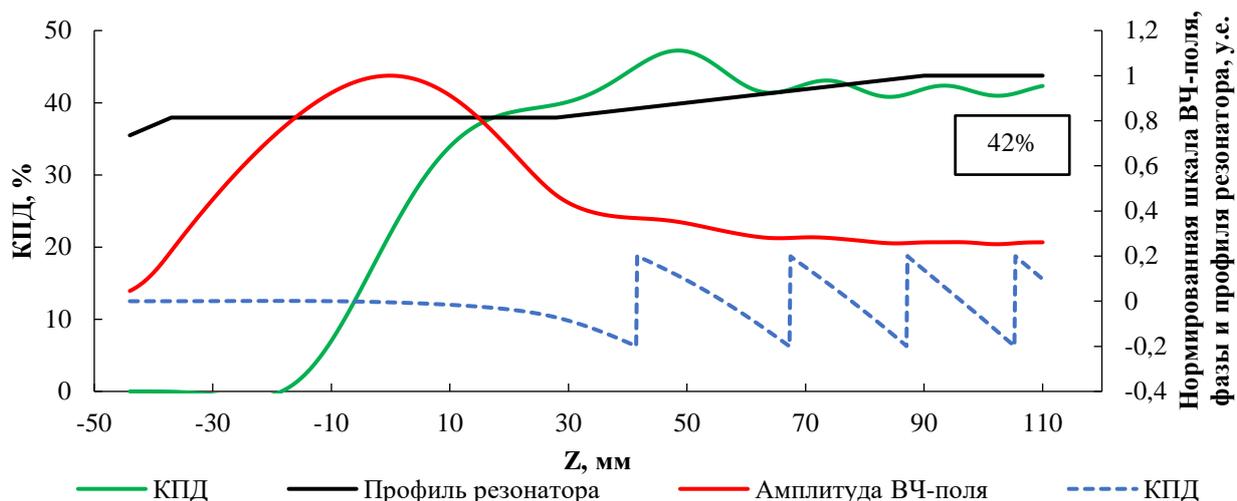
Здесь  $G$  – фактор возбуждения моды, который вычисляется по формуле (31):

$$(31) \quad G = \frac{(v^2 - m^2) * J_m^2[v]}{\left(\frac{n^n}{2^n n!}\right)^2 * J_{m-n}^2[v * \rho / R]}$$

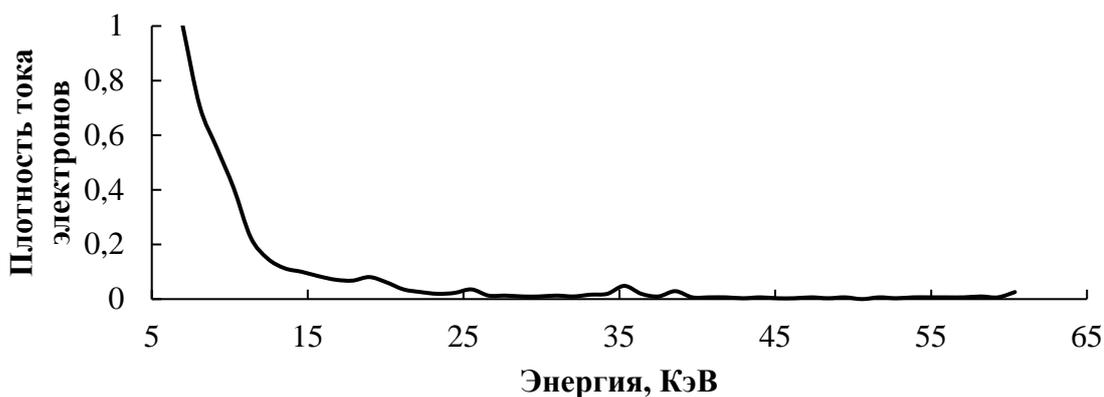
Таким образом, предварительные оценки обозначили границы рабочих параметров, в пределах которых необходимо проводить дальнейшую оптимизацию системы. Длина однородного участка магнитного поля  $L$  варьировалась в диапазоне [50 мм; 70 мм], оптимальным с точки зрения энергетики экранированной магнитной системы. Для работы на низших модах, с учетом геометрии электродов катодной и коллекторной области (требования к малым углам раскрыва резонатора) в условиях заданного диаметра проходного отверстия магнитной системы 53 мм, радиус резонатора был выбран равным  $R=9.05$  мм.

Дальнейшее численное моделирование и оптимизация рабочих параметров проводилось в программах Angel и CST Studio Suite. В качестве рабочей была выбрана мода на первой гармонике циклотронного резонанса  $TE_{12}$ , частота генерации которой при выбранном радиусе резонатора составляет около 28.1 ГГц. Также выбор данной моды обусловлен редким спектром паразитных мод в окрестности рабочей моды. Так, основными конкурентами  $TE_{12}$  можно считать моды на первой гармонике  $TE_{31}$  и  $TE_{22}$ , однако по магнитному полю рассматриваемые моды разнесены достаточно далеко от рабочей (более, чем на 25%), что делает их менее опасными с точки зрения

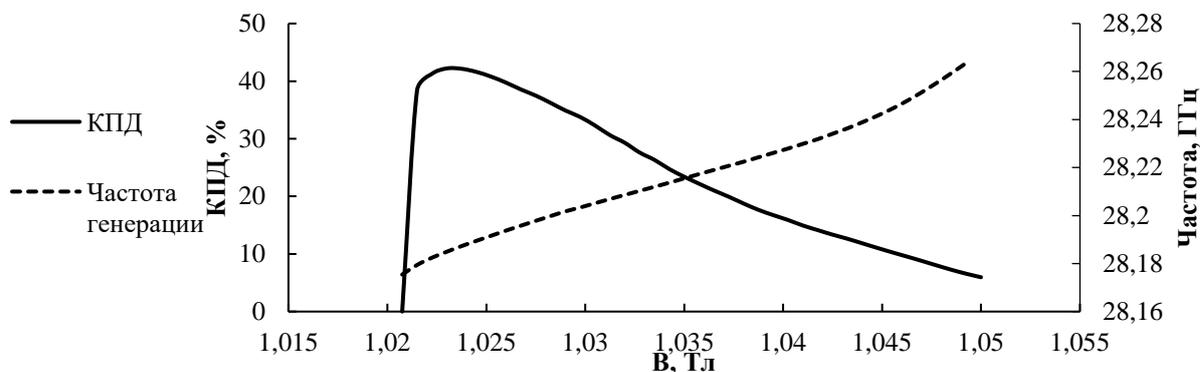
паразитного возбуждения. Радиус встрела электронного пучка в результате первых оценок находился в пределах 2-4 мм. В процессе численного моделирования оптимальным с точки зрения КПД генерации был выбран радиус пучка в резонаторе  $R=3$  мм. Результаты численного моделирования оптимизированного профиля резонатора для случая  $g = 1.6$ ,  $I = 2.4$  А и  $U = 23$  кВ представлены на рис. 40. Положение резонатора относительно однородного участка магнитного поля выбиралось исходя из оптимизации группировки электронов, визуализация которой представлена в виде функции распределения на рис. 41, реализованной в Angel. Оптимизация и расчет зоны генерации по магнитному полю представлены на рис. 42.



**Рис. 40.** Результаты расчета для случая однородного магнитного поля: КПД генерации, фазы волны, профиля и амплитуды высокочастотного поля для оптимизированного профиля резонатора. Волновой КПД равен 42%.

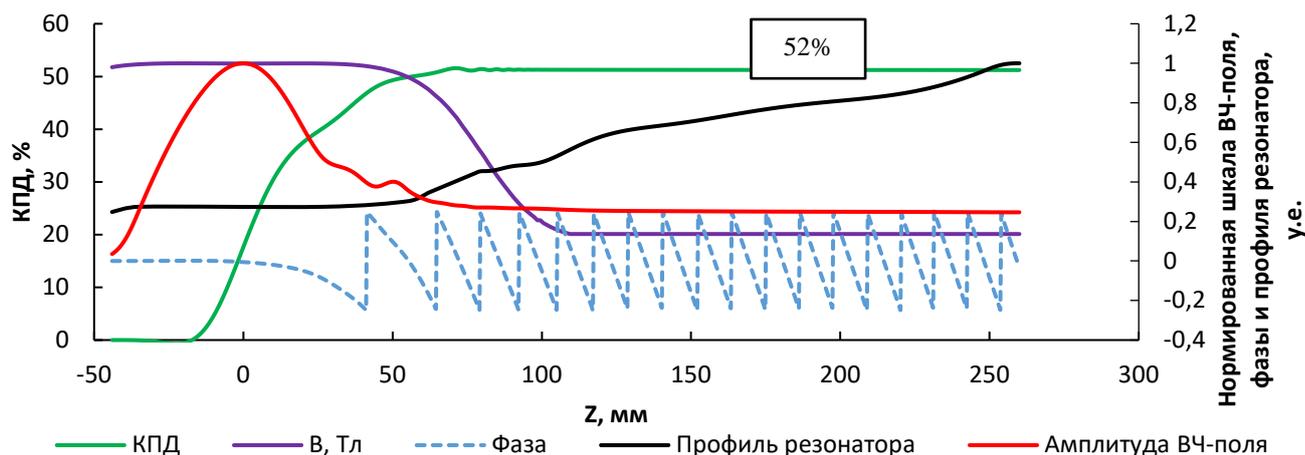


**Рис. 41.** Функция распределения электронов на выходе из резонатора.

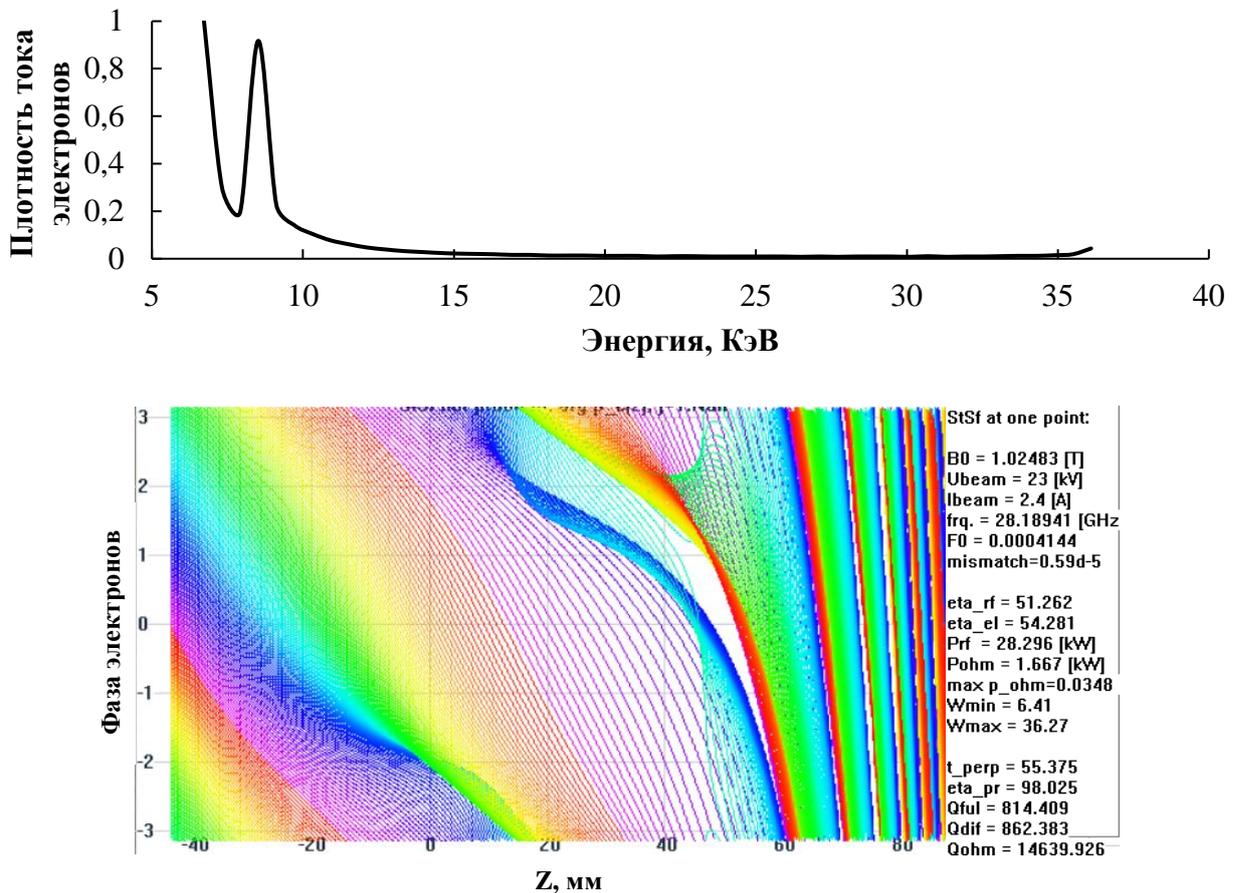


**Рис. 42.** Результаты расчета зоны генерации рабочей моды  $TE_{12}$  по магнитному полю.

Исходя из результатов предыдущего раздела, а также представлений об оптимальном профиле однородного участка магнитного поля был проведен расчет резонатора с учетом наличия выходного волновода и профиля магнитного поля, полученного экспериментально в МЭС, предназначенной для исследуемого гиротрона. В результате оптимизации всех рабочих параметров, удалось добиться значения полного КПД гиротрона 52%. Результаты расчетов приведены на рис. 43. Положение резонатора относительно однородного участка магнитного поля выбиралось исходя из оптимизации группировки электронов, визуализация которой представлена в виде цветовой карты на рис. 44. На входе в резонатор электроны равномерно распределены по фазам (полный диапазон начальных фаз ( $2\pi$ ) и маркированы цветом. По мере электронно-волнового взаимодействия происходит группировка (фракции разного цвета собираются в узкой области по продольной координате). Приведенные данные позволяют наглядно представить процессы в электронном пучке и помогают при оптимизации геометрии резонатора и его положения относительно центра магнитной системы.



**Рис. 43.** Результаты расчета для случая экспериментального магнитного поля МЭС и оптимизированного положения резонатора относительно центра магнитной системы: КПД генерации, фазы волны, профиля и амплитуды высокочастотного поля для оптимизированного профиля резонатора. Волновой КПД равен 52%.



*Рис. 44. Верхний график демонстрирует функцию распределения плотности тока электронов на выходе из области взаимодействия. На нижнем рисунке представлена фазовая группировка ВЭП по мере движения электронов вдоль оси системы.*

В технологических гиротронах, вследствие малых поперечных размеров прибора обычно используют прямой вывод СВЧ излучения. При этом коллектор электронов играет также роль выходного волновода. Оценки показывают, что для реализации непрерывного режима с мощностью в десятки кВт необходим пространственно развитый коллектор с диаметром порядка 70 мм. Быстрая расходимость силовых линий в экранированном соленоиде, вдоль которых движется ВЭП, и, соответственно, близость зоны оседания электронного пучка к центру резонатора приводит к необходимости синтеза оптимизированного профиля поверхности, обеспечивающего минимальную трансформацию рабочего типа колебаний и приемлемую плотность мощности электронного потока.

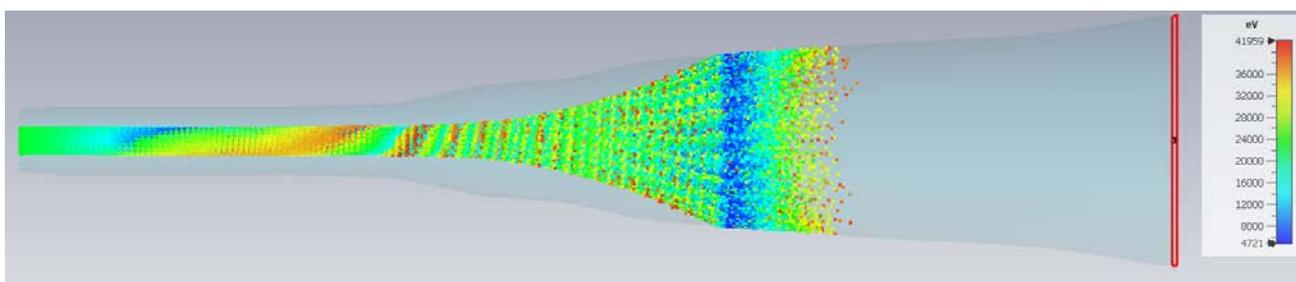
Необходимым условием при синтезе профиля выходного волновода был запрет возможности токооседания на его стенках. Зная топологию ВЭП в данной области, на основе метода синтеза слабонерегулярных волноводов, находился профиль выходного волновода, обеспечивающий малый (менее 2%) коэффициент трансформации рабочего колебания  $TE_{12}$  в другие моды [58]. Перспектива реализации других режимов генерации вплоть до 95 ГГц на второй

гармонике циклотронного резонанса добавляет требований к профилю выходного волновода. Помимо основного режима на моде  $TE_{12}$ , данный электродинамический элемент должен также эффективно сохранять рабочие моды  $TE_{22}$ ,  $TE_{13}$  и  $TE_{16}$  (для режимов 35,45 и 95 ГГц соответственно). В результате расчетов удалось добиться искомого профиля волновода, который с одной стороны обеспечивал малую трансформацию рабочей моды для всех режимов и с другой стороны обеспечивал свободное прохождение ВЭП в область коллектора. Подробное исследование электронного пучка будет продемонстрировано в п. 3.3.

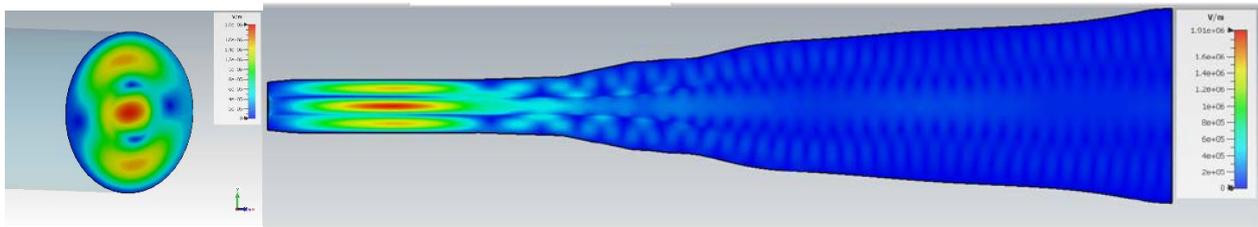
Для проверки работоспособности всей электродинамической системы (резонатор и выходной волновод), были проведены расчеты данной конфигурации как в Angel (с использованием самосогласованной системы полных уравнений с нефиксированным полем), так и методом PIC моделирования в CST Studio Suite.

Результаты численного моделирования в Angel всей системы хорошо соответствуют результатам расчета только резонатора (КПД 43% и 42% соответственно), что подтверждает корректность используемого профиля выходного волновода (отсутствие отражений, влияющих на генерацию).

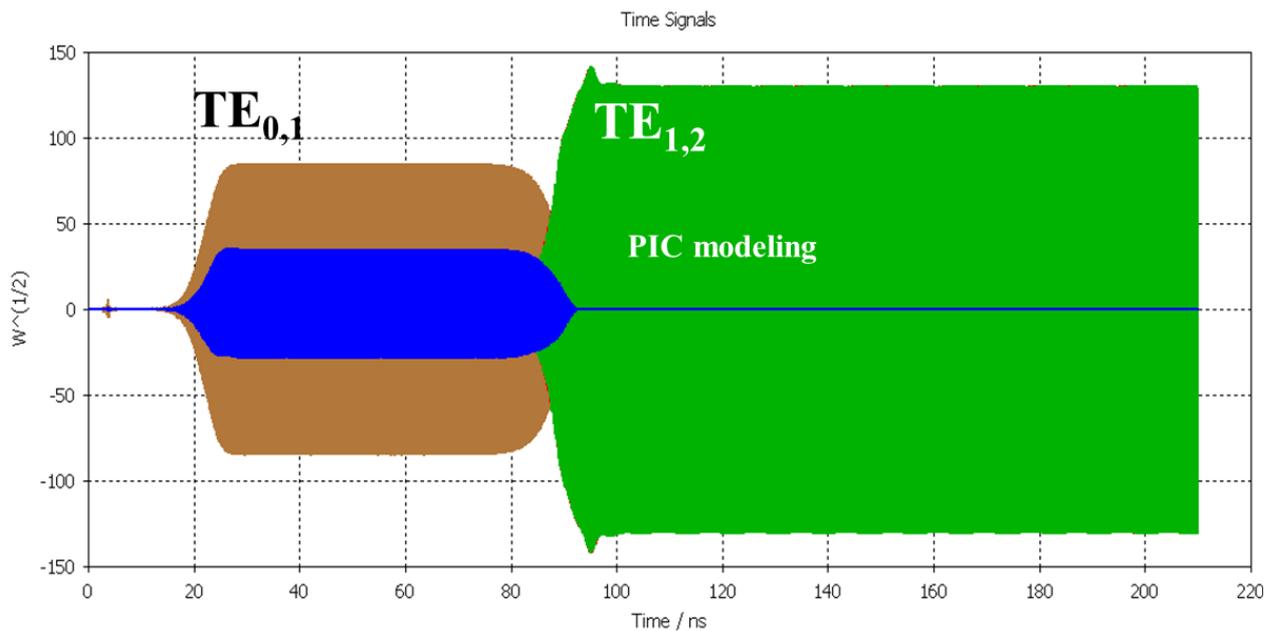
Для верификации проведенных расчетов был проведен небольшой (исходя из долгого времени счета) цикл PIC моделирования данной системы в CST. Для создания электронного пучка с заданными параметрами ( $g = 1.6$ ,  $I = 2.4$  А и  $U = 23$  кВ, разброс поперечных скоростей 20%) был использован усеченный конус, боковая поверхность которого выступала в роли эмиттера, наклон образующий задавал значение питч-фактора электронов, энергия и ток электронов задавались в виде параметров, разброс также задавался численно. Вид траекторий электронного пучка и электродинамической системы показан на рис. 45. Структура электрического поля генерируемой волны приведена на рис. 46, которое соответствует ожидаемой рабочей моде  $TE_{12}$ . Мощность излучения приведена на рис. 47. Отметим, что во избежание расчетов в области срыва генерации по магнитному полю, рабочее магнитное поле выбиралось заведомо неоптимальным. Проход по магнитному полю до момента срыва не был произведен исходя из длительного (дни) процесса расчета. Несмотря на это, полученные значения мощности соответствуют результатам, полученным в Angel.



**Рис. 45.** Вид электронных траекторий в электродинамической системе гиротрона с учетом модуляции за счет электронно-волнового взаимодействия.



**Рис. 46.** Структура электрического поля генерируемой в резонаторе волны: слева – поперечный срез, справа – продольный.



**Рис. 47.** Динамика возбуждения рабочей моды  $TE_{12}$ . Моделирование проведено при небольшой отстройке по магнитному полю от оптимального (полученного в Angel), где заведомо должна наблюдаться генерация. В данном случае мощность генерации соответствует  $\approx 20$  кВт.

Как уже отмечалось ранее, использование МЭС сильно снижает поле рассеяния и для требуемых условия формирования ВЭП используется катодная катушка. Таким образом, появляется возможность изменить радиус пучка в резонаторе в довольно больших пределах, что крайне важно в случае возбуждения колебаний на разных частотах в одном и том же резонаторе. Однако, для рассматриваемых далее режимов генерации на частотах 35, 45, и 95 ГГц изменение встра пучка требовалось лишь в последнем случае.

В режиме генерации излучения на частоте 35 ГГц была выбрана мода  $TE_{22}$  на первой гармонике. Радиус пучка в резонаторе был оставлен без изменений ( $R_b=3$  мм). Спектр близлежащих мод и их факторы возбуждения приведены на рис. 48. Расчеты генерации моды  $TE_{22}$  выполнены с учетом реального распределения магнитного поля МЭС в резонаторе при токе пучка  $I_b=2.4$  А и ускоряющем напряжении  $U_a=23$  кВ. В результате расчетов КПД генерации составило 28.5%, мощность излучения около 15 кВт при оптимальном магнитном поле  $B=1.3$  Тл. (см. рис.

49). Таких значений удалось добиться благодаря исследованию группировки ВЭП. Цветовая карта фаз электронов на рис. 49 демонстрирует максимальную группировку электронов вблизи координаты 30 мм. Для обеспечения обрыва взаимодействия ВЭП с электромагнитной волной после этой области резонатор гиротрона был сдвинут в область правого фронта магнитного поля.

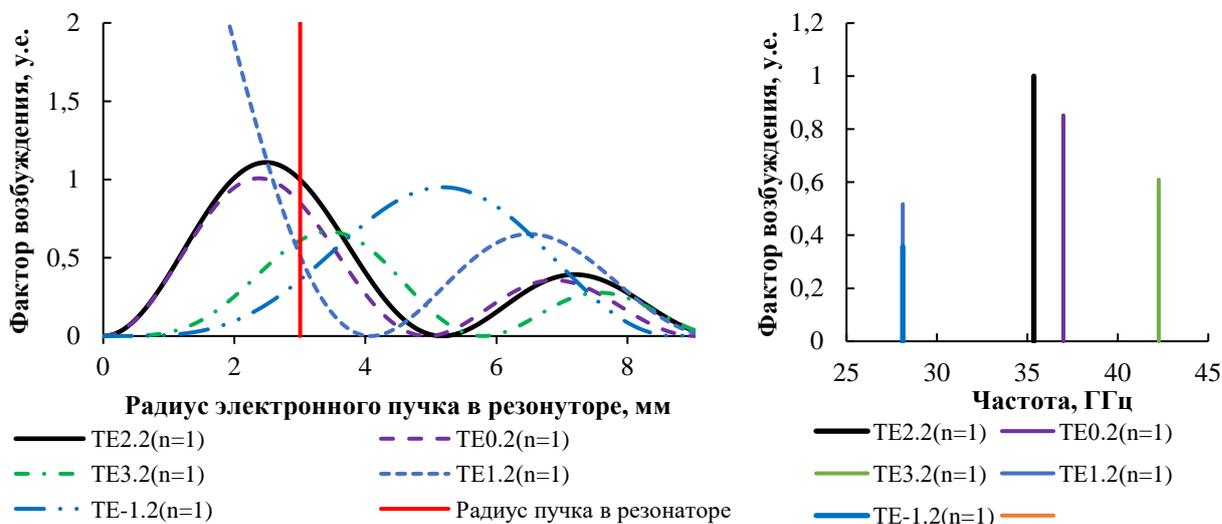


Рис. 48. Спектр близлежащих к рабочей  $TE_{22}$  мод и их факторы возбуждения.

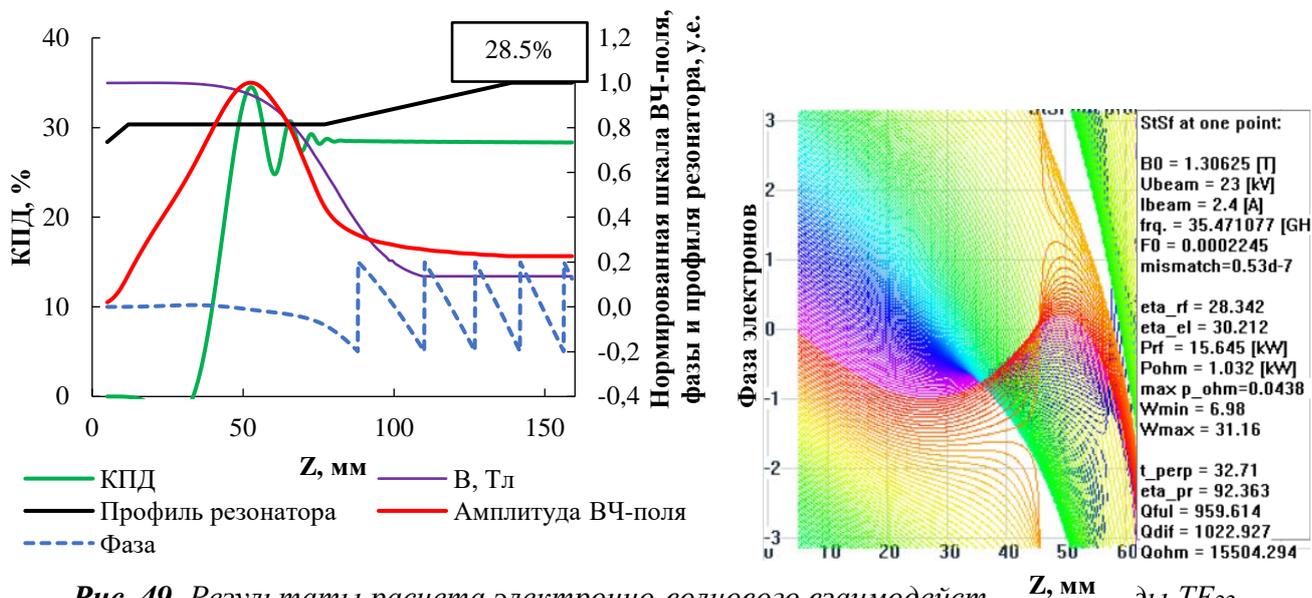
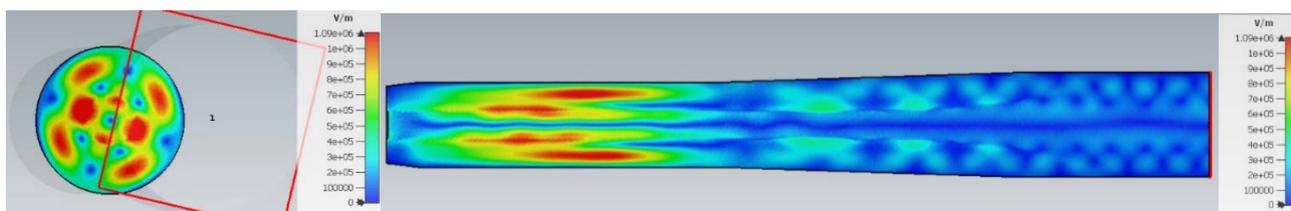


Рис. 49. Результаты расчета электронно-волнового взаимодействия  $TE_{22}$  моды.

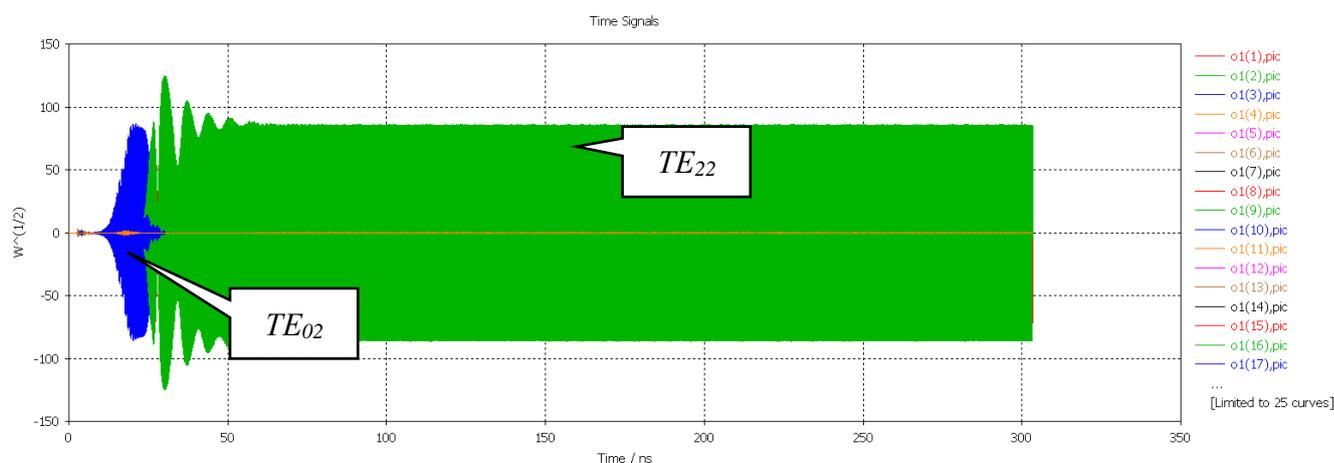
Мощность генерации на частоте 35.4 ГГц составляет  $\approx 15.7$  кВт.

Дальнейшее моделирование режима генерации с учетом конкуренции мод было проведено в CST Studio Suite методом PIC моделирования. В качестве рабочего магнитного поля использовано реальное распределение магнитного поля с интенсивностью в области взаимодействия  $B=1.3$  Тл, что обеспечивает устойчивую генерацию рабочего типа колебаний. В результате моделирования была получена генерация рабочей моды с уровнем мощности около 8 кВт. Рис. 50 демонстрирует структуру электрического поля в установившемся режиме генерации,

соответствующему моде  $TE_{22}$ . На рис. 51. видно, что сначала кратковременно возбуждается самая близкая паразитная мода  $TE_{02}$ , затем – рабочая  $TE_{22}$ .

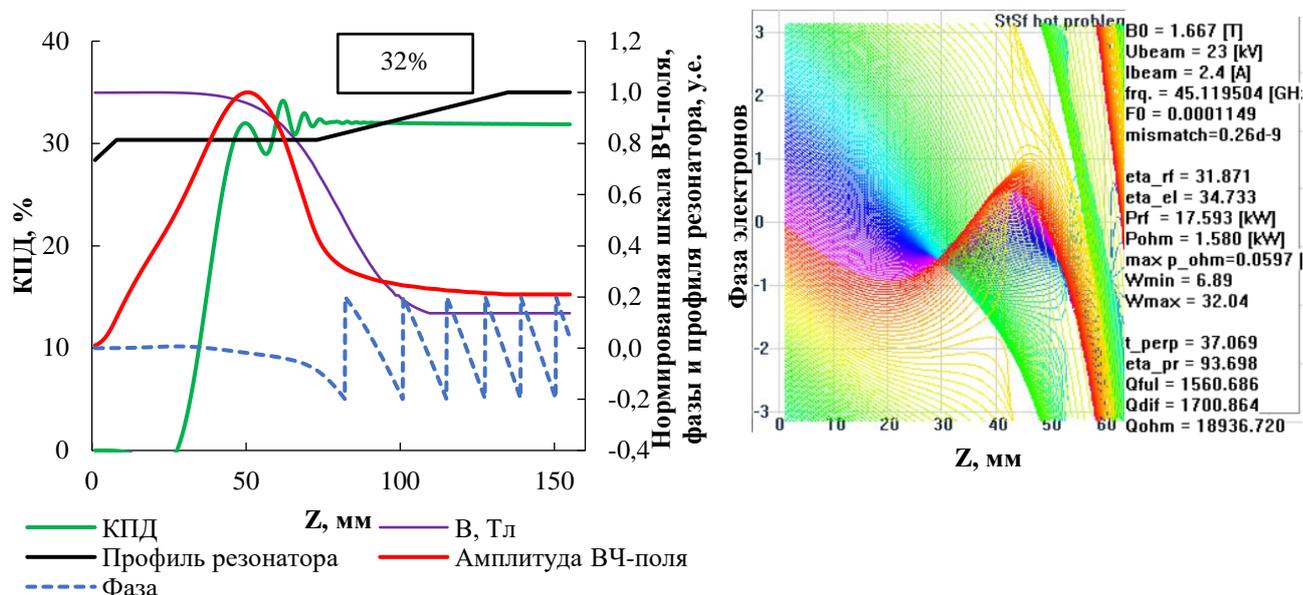


**Рис. 50.** Структура электрического поля генерируемой в резонаторе волны: слева – поперечный срез, справа – продольный.



**Рис. 51.** Динамика возбуждения рабочей моды  $TE_{22}$ . Моделирование проведено при небольшой отстройке по магнитному полю от оптимального (полученного в Angel), где заведомо должна наблюдаться генерация. В данном случае мощность генерации соответствует  $\approx 8$  кВт.

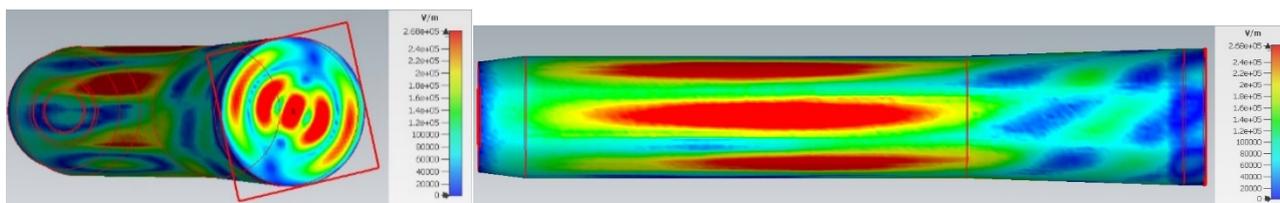
Следующая характерная частота, используемая в системах генерации многозарядных ионов, составляет 45 ГГц. Для этого режима с мульткиловаттным уровнем мощности использована мода  $TE_{-13}$  на основном циклотронном резонансе. Параметры ВЭП оставлены без изменений. Для данной моды оптимальным с точки зрения эффективности генерации рабочим магнитным полем является  $B=1.642$  Тл. При этом, ближайшим паразитным типом колебаний является мода на первой гармонике  $TE_{32}$  (рис. 52). Путем оптимизации продольного положения лампы в магнитном поле можно достичь мощности излучения 10 кВт. Соответственно, эффективную длину взаимодействия можно сократить, перемещая резонатор из однородного участка.



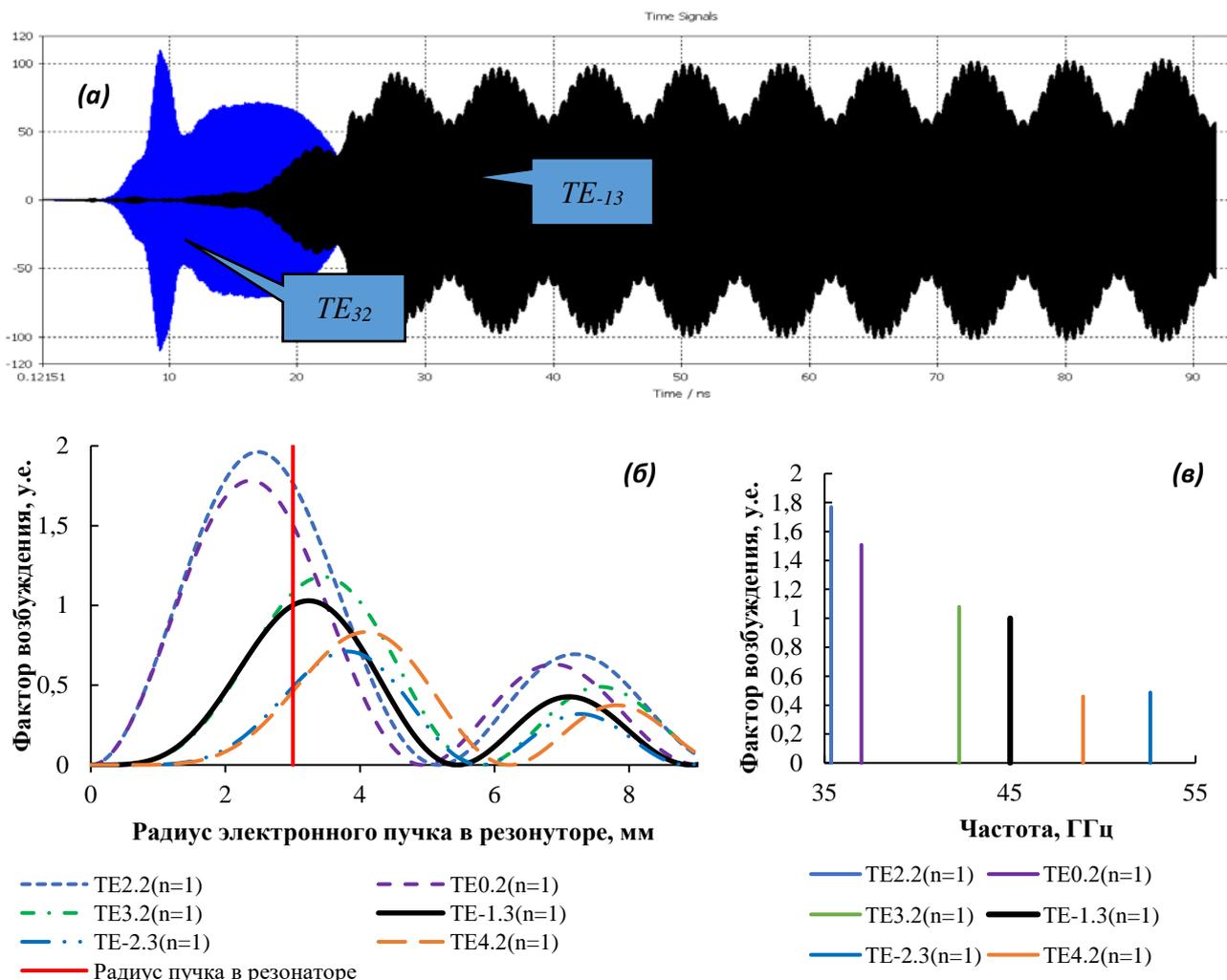
**Рис. 52.** Результаты расчета электронно-волнового взаимодействия для моды  $TE_{13}$ .

Мощность генерации на частоте 45.12 ГГц составляет  $\approx 18$  кВт.

Для подтверждения возможности устойчивой одномодовой генерации было проведено PIC моделирование в CST. На рис. 53-54 продемонстрированы результаты расчета. Видно, что в начальный момент времени сначала возбуждается паразитная мода, затем она затухает и устанавливается рабочий тип колебаний. Осцилляции мощности рабочей моды вызваны неоптимальным подбором параметров и легко устраняется. Однако, в связи с множеством факторов, отличающих реальный прибор от виртуального, данный расчет не был оптимизирован с точки зрения выхода мощности на стационар.



**Рис. 53.** Структура электрического поля генерируемой в резонаторе волны: слева – поперечный срез, справа – продольный.



**Рис. 54.** Динамика возбуждения рабочей моды  $TE_{-13}$ (а), факторы возбуждения рабочего и паразитных типов колебаний в резонаторе от радиуса ведущих центров электронов в резонаторе (б) и спектр мод резонатора в частотном диапазоне 35-55 ГГц.

Предельным частотным значением, планируемым в исследуемом гиротроне, является генерация 95 ГГц на второй гармонике циклотронного резонанса. Предел в первую очередь связан с максимально приемлемым энергопотреблением МЭС, которое в данном режиме должно составлять около 50 кВт. В качестве рабочей была выбрана мода на второй гармонике циклотронного резонанса  $TE_{-16}$ , спектр мод вблизи которой достаточно редок (см. рис. 55). Для ее возбуждения радиус встрела пучка был выбран равным  $R_b=2.1$  мм. Для этого необходимо увеличить магнитное поле на катоде. Учитывая увеличение поля рассеяния МЭС при таких полях (за счет эффекта насыщения ферромагнитного банджа), данная задача не является проблемой и легко решается наличием катодной катушки для более точной подстройки. Спектр паразитных мод в окрестности рабочей достаточно редок и не имеет опасных конкурентов на первой гармонике, что увеличивает шансы на устойчивую одномодовую генерацию. Одномодовая модель расчета в Angel при токе электронного пучка  $I_b=2.4$  А и  $U_a=23$  кV при магнитном поле 1.7495 Тл дает 11 кВт на частоте 95.005 ГГц (рис. 56).

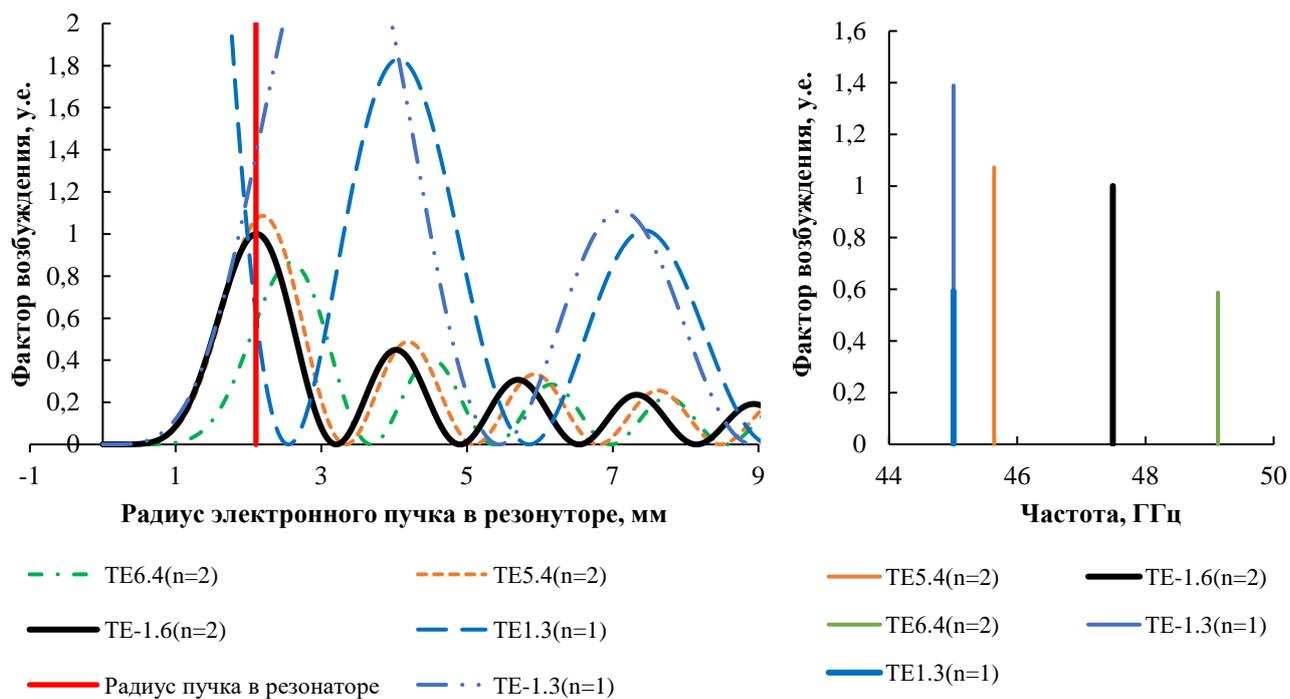


Рис. 55. Спектр близлежащих к рабочей TE<sub>16</sub> мод и их факторы возбуждения.

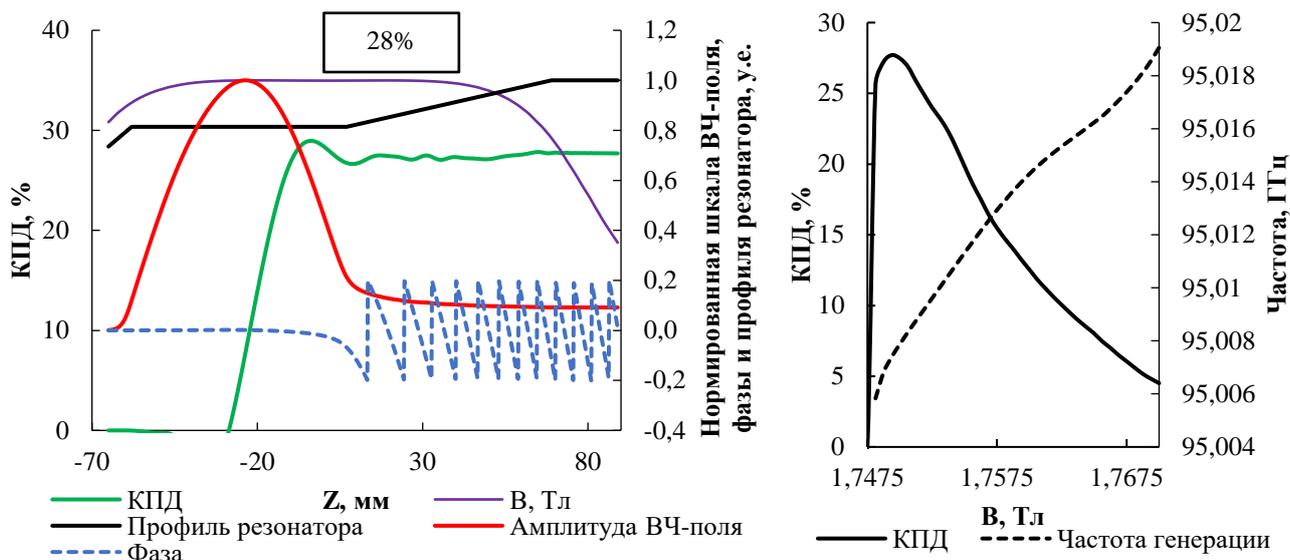
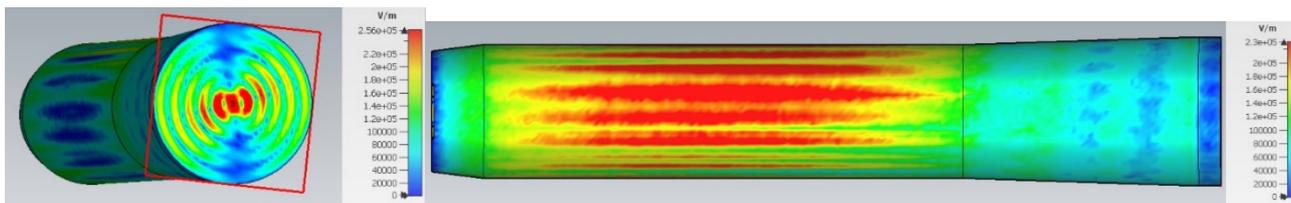


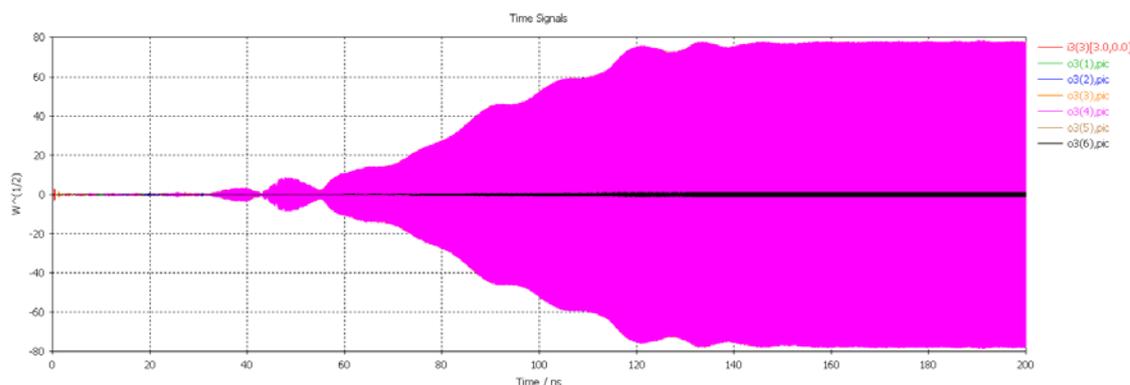
Рис. 56. Результаты расчета генерации моды TE<sub>16</sub>: слева – интегральный КПД генерации при оптимальном магнитном поле, амплитуда высокочастотного поля, фаза волны, справа – зависимость КПД и частоты генерации от величины магнитного поля. Максимальный КПД составляет 28%, что соответствует мощности генерации 15.3 кВт.

Для проверки устойчивого возбуждения одномодовой генерации с учетом паразитных колебаний было проведено РИС моделирование, результаты которого приведены на рис. 57-58. Мощность генерации составила около 6.5 кВт, что потенциально может быть улучшено за счет оптимального расположения резонатора в однородном магнитном поле (так как длина резонатора

не оптимальна, хотя, с другой стороны, ситуация не столь остра из-за работы на второй гармонике гирочастоты, которая требует более длинный участок взаимодействия). Результат расчетов демонстрирует чистое возбуждение рабочей моды без возбуждения паразитных.



**Рис. 57.** Структура электрического поля генерируемой в резонаторе волны: слева – поперечный срез, справа – продольный.



**Рис. 58.** Динамика возбуждения рабочей моды  $TE_{16}$ .

Таким образом, все рассмотренные режимы генерации в различных программах демонстрируют потенциальную возможность осуществления в одном и том же гиротроне. Для технологических гиротронов при существенно разных типах рабочих мод возможность такой широкополосной генерации является уникальным параметром. Стартовые токи рабочих мод не были подробно изложены, так как рабочие токи заведомо превышают пороговые значения. Система формирования электронного потока практически для каждого из режимов не требует серьезных изменений параметров. Однако в области посадки ВЭП на коллектор при работе на разных магнитных полях появляется отдельная задача осаждения электронного потока на стенки коллектора с приемлемым уровнем плотности мощности, которая подробно будет изложена далее.

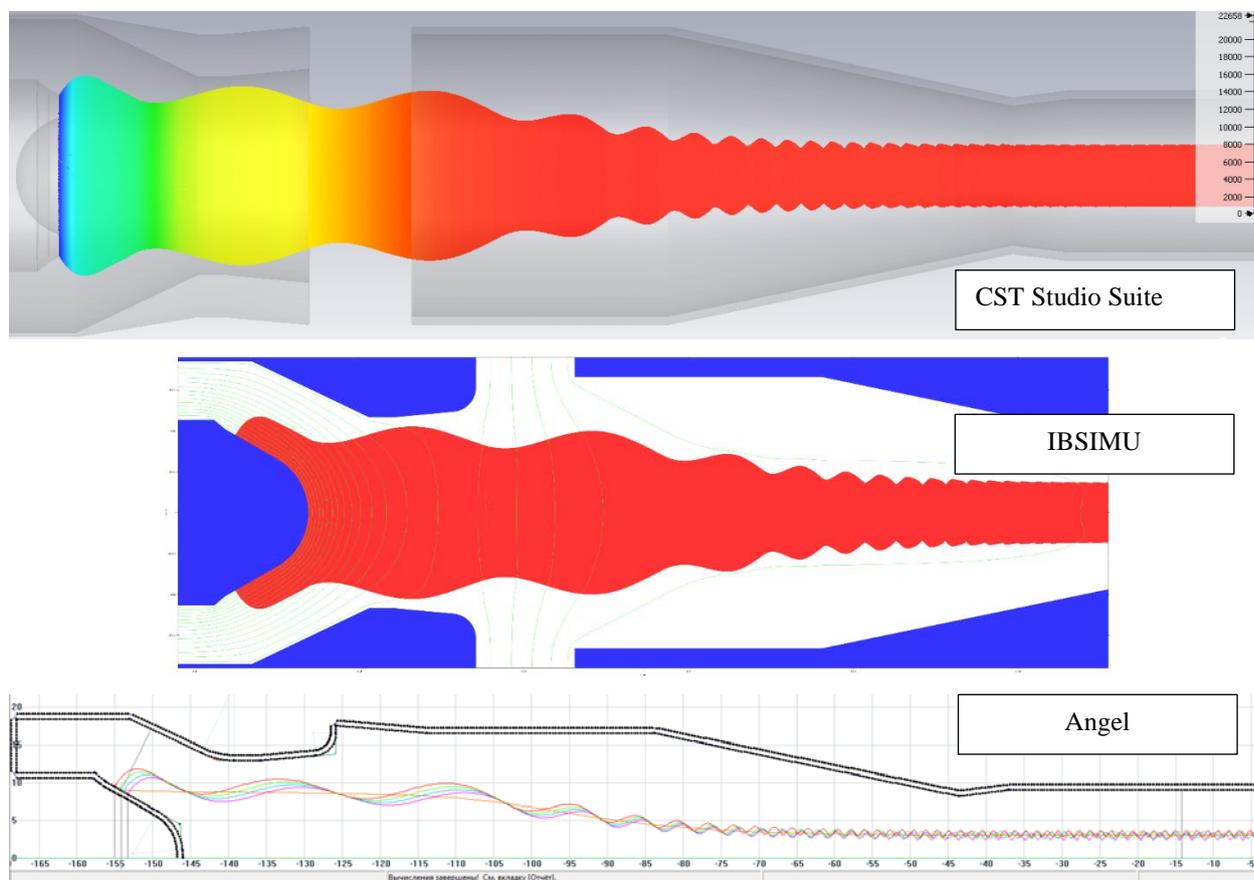
### **3.3. Расчет электронно-оптической системы гиротрона**

Для создания винтового электронного пучка, рассмотренного в предыдущем пункте как источника энергии возбуждаемой рабочей моды, была проведена детальная разработка и оптимизация электронно-оптической системы гиротрона: системы формирования (магнетронно-инжекторная пушка) и области осаждения ВЭП (коллектор). В качестве первоначальной геометрии МИП была использована геометрия электродов, рассмотренная в п. 2.2, 2.3. Как отмечалось ранее,

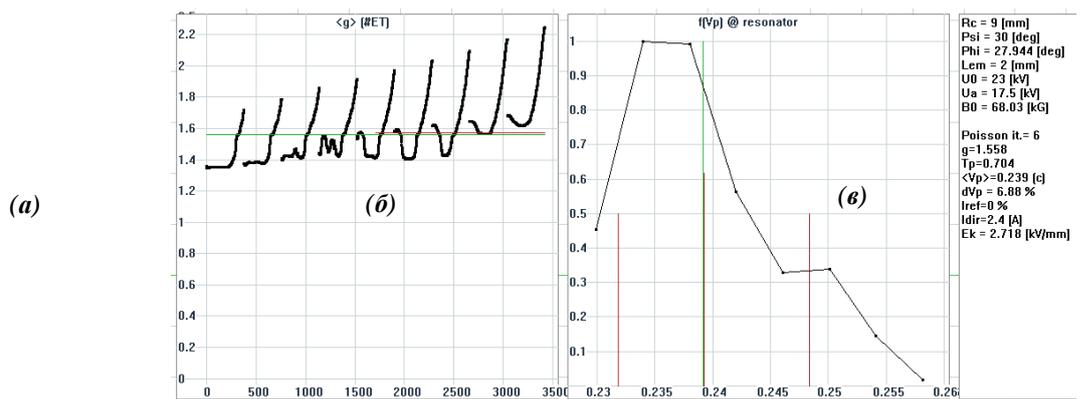
осложняющими разработку ЭОС факторами в первую очередь являлась структура магнитного поля.

### 3.3.1 Расчет магнетронно-инжекторной пушки

Предварительная оценка МИП была выполнена на базе адиабатической теории [37, 38]. Результаты сведены в таблицу 7. В расчетах принято умеренное значение плотности тока  $j_k=1.7$  А/см<sup>2</sup>, что позволяет рассчитывать на время жизни катода в десятки тысяч часов. Для возможности подстройки параметров ВЭП рассматривалась триодная конфигурация МИП. Оценки показывают, что при указанных выше плотностях тока отношение рабочего тока к ленгмюровскому току пушки  $t_j \approx 0.4$ , что приводит к существенному возмущению скоростного распределения в пучке силами пространственного заряда [29]. Как известно, в настоящее время подавляющее число гиротронов используют ламинарные или регулярно пересекающиеся электронные потоки. С учетом возможных погрешностей изготовления и сборки, а также возможных термических смещений в рабочем режиме угол наклона был выбран равным 31 градусу, что позволяет сформировать регулярно пересекающийся электронный пучок. Результаты расчета МИП представлены на рис. 59-60.

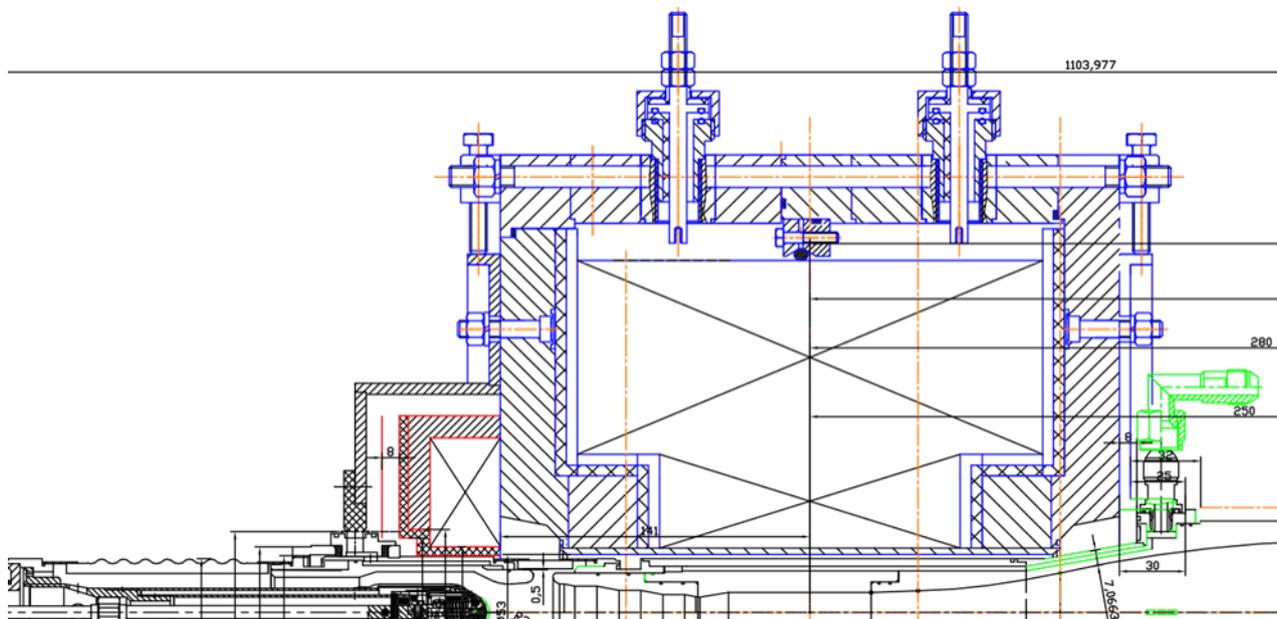


**Рис. 59.** Расчет и оптимизация параметров электронного пучка в МИП гиротрона в различных программах: CST Studio Suite, код на базе IBSIMU, Angel.



**Рис. 60.** Результаты расчета оптимизированной геометрии МИП в Angel: электрическое поле на эмиттере (а), пич-фактор ВЭП (среднее значение показано прямой зеленой линией и соответствует значению  $g=1.558$ ) (б), функция распределения по поперечным скоростям электронов в резонаторе (в).

Для достижения приведенных на рис.60 результатов была выполнена дополнительная коррекция распределения магнитного поля МЭС. В связи с сильной экранировкой магнитного поля по краям МЭС (область катода и коллектора), для создания требуемых величин магнитного поля на эмиттере требовалась достаточно мощная катодная катушка. Для снижения ее мощности она также была окружена ферромагнетиком, в результате чего ее энергопотребление не превышало 200 Вт, что позволило упростить и систему охлаждения. В результате достижения требуемых магнитных полей в области инжекции электронов (0.11 Тл), итоговое магнитное поле от катода к резонатору стало немонотонно возрастающим. Еще одна итерация продольного распределения в области катода была сделана с целью организовать перехват вторично-эмиссионных электронов, появление которых обусловлено бомбардировкой катода. Для обеспечения требуемого магнитного поля на эмиттере и соблюдения монотонности по направлению к резонатору, катодный узел был сдвинут в область большей индукции магнитного поля (ближе к резонатору) и уменьшена толщина экранов в прикатодной области. Итоговая конфигурация магнитной системы приведена на рис. 61.



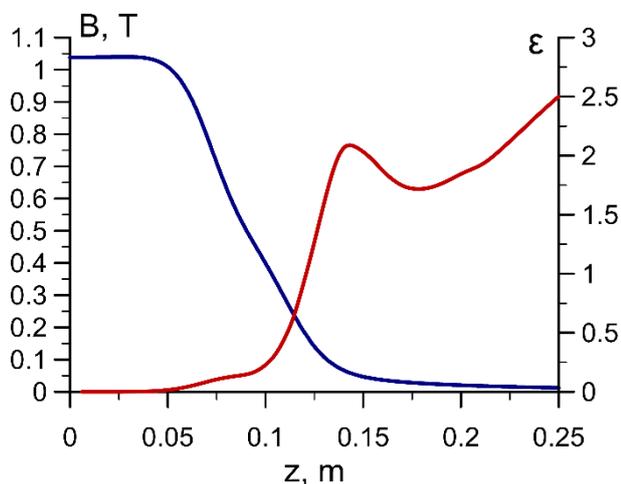
**Рис. 61.** Эскиз магнитной системы с учетом доработки ферромагнитного кожуха с учетом геометрии гиротрона и экранированной катодной катушки.

### 3.3.2 Исследование возможности осаждения электронного потока в коллекторе многорежимного гиротрона с неадиабатическим магнитным полем МЭС

Характерной особенностью МЭС является резкий спад магнитного поля за экранами, вследствие чего движение электронов в этой области становится неадиабатическим. Количественно оценить степень неадиабатичности магнитного поля можно, рассмотрев коэффициент  $\varepsilon = h / L_B$ , равный отношению шага электронной траектории  $h$  к масштабу неоднородности магнитного поля  $L_B$ . Когда этот коэффициент оказывается больше единицы, движение электрона уже нельзя описать в рамках адиабатической теории. Соответственно и расчет энергетической нагрузки коллектора по простой теории [15] становится невозможным. Величина  $\varepsilon$  может быть вычислена по формуле (6).

Типичная структура распределения магнитного поля в области коллектора в МЭС и график коэффициента неадиабатичности  $\varepsilon$  представлены на рис. 62.

Силовые линии магнитного поля резко расходятся в области, где расположен край ферромагнитного экрана (рис. 63). В результате образуется неадиабатический однопериодный ондулятор, придающий пролетающим электронам существенную вращательную скорость. Это приводит к тому, что все электроны приобретают практически одинаковую по величине и направлению добавку к вращательной скорости и начинают практически синфазно вращаться по окружностям большого радиуса (см. рис. 63).



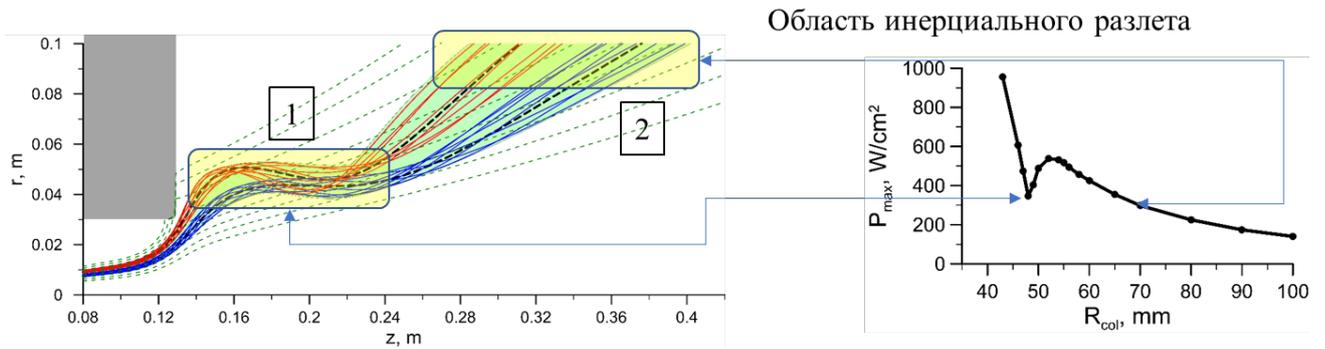
**Рис. 62.** Распределение магнитного поля на оси МЭС и график коэффициента неадиабатичности для гиротрона на основном циклотронном резонансе с частотой излучения 28 ГГц.

Далее, совершив примерно один период колебаний в магнитном поле рассеяния, частицы попадают в очень слабое (на два порядка меньше, чем в резонаторе гиротрона) магнитное поле, где начинают двигаться по инерции практически прямолинейно (инерциальный разлет частиц). Такая динамика электронного пучка усложняет процесс оптимизации распределения осаждаемой на коллектор мощности и требует специфического подхода, учитывающего характер движения электронов.

Описанная выше картина поведения электронов в неадиабатическом поле позволяет предложить две методики оптимизации распределения плотности мощности по поверхности

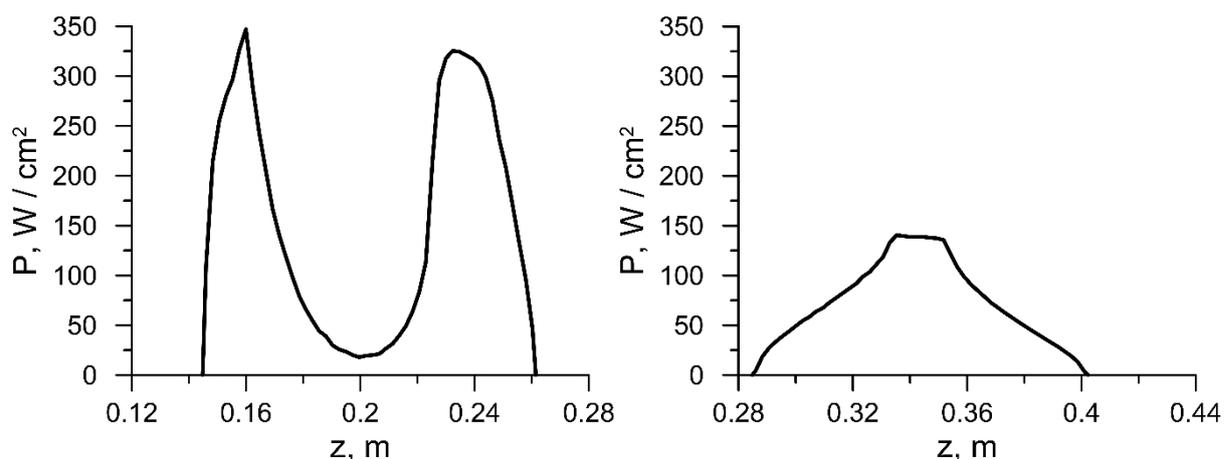
коллектора. Если необходимо использовать коллектор относительно малого диаметра (обычно при создании гиротронов с прямым выводом СВЧ энергии), то целесообразно осуществлять посадку электронного пучка в области синфазного движения частиц (на рис. 63 это участок  $z \in [0.16, 0.24]$ , который соответствует радиусам коллектора 45 – 55 мм), где все электроны двигаются практически параллельно друг другу примерно вдоль оси системы. Если же ограничение на радиус коллектора отсутствует, то коллектор целесообразно размещать в области инерциального разлета частиц ( $z > 0.3$  м).

Отметим, что коллектор гиротрона обычно рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить относительно небольшой перепад плотности мощности по длине коллектора и умеренную пиковую плотность мощности (в непрерывном режиме это обычно 0.3 – 0.6 кВт/см<sup>2</sup>). Зависимость пиковой плотности мощности от радиуса коллектора приведена на рис. 64. У этой зависимости существует локальный минимум (при  $R_{col} = 48$  мм), который как раз соответствует осаждению пучка в области синфазного движения. Видно, что при использовании инерциального разлета такое же пиковое значение плотности мощности достигается при большем на треть радиусе коллектора ( $R_{col} = 65$  мм на рис.63).



**Рис. 63.** Траектории движения электронов в неадиабатическом коллекторе (слева). Жирным пунктиром показаны траектории электронов, имеющих нулевую вращательную скорость в резонаторе. Верхний и нижний пучки соответствуют частицам, имеющим соответственно максимальный и минимальный радиусы ведущих центров. Зависимость плотности мощности, рассеиваемой на коллекторе гиротрона, от радиуса коллектора. Полная мощность электронного пучка 55.2 кВт (справа).

Коллекторы с инерциальным разлетом отличаются лучшей равномерностью распределения плотности мощности по поверхности (см рис. 64). Инерциальный разлет может обсуждаться и для систем с поперечным выводом электромагнитной энергии, когда ограничения на геометрические размеры коллектора существенно ослаблены, т.е. в гиротронах суб-мегаваттного и мегаваттного уровня мощности. Тем не менее, для электронных потоков относительно невысокой (десятки кВт) мощности наиболее целесообразным является использование простых и некритичных цилиндрических (конусных) коллекторов с оседанием пучка в зоне синфазного движения частиц.



**Рис. 64.** Типичные профили распределения плотности мощности на стенках коллектора гиротрона. Слева – осаднение в области синфазного движения,  $R_{col} = 48$  мм. Справа – осаднение при инерциальном разлете,  $R_{col} = 100$  мм.

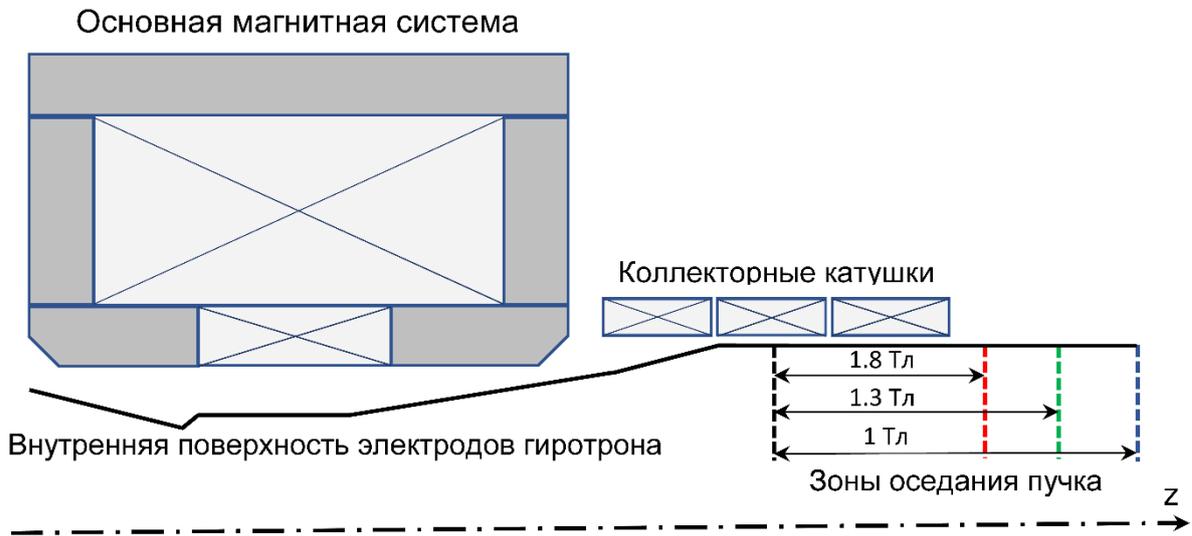
### *Оптимизация коллектора для гиротрона с широким диапазоном рабочих частот.*

Достоинством магнитоэкранированных систем является возможность достижения достаточно больших (согласно оценкам, до 2 Тл) значений рабочего магнитного поля при умеренной (не более 50 кВт) мощности теплых соленоидов в объемах, достаточных для размещения электродинамической системы гиротрона, что позволяет реализовать непрерывный режим генерации на частотах до 50 ГГц на основной гармонике гирочастоты, и до 100 ГГц, при возбуждении второй гармоники при выходной мощности до 30 кВт. В этой связи представляет интерес разработка универсальной магнитной системы и соответствующего коллектора, способных работать в широком диапазоне востребованных с точки зрения различных приложений частот на основной циклотронной гармонике от 24 ГГц до 45 ГГц и соответствующих магнитных полей в полосе 1-1.8 Тл. Ниже представлены методика и результаты оптимизации коллектора гиротрона, способного работать во всем указанном диапазоне.

В связи с рядом ограничений (диаметр проходного отверстия соленоида, прямой вывод СВЧ излучения на всех рабочих частотах без трансформации в другие типы волн) для прототипа технологического многочастотного гиротрона был выбран коллектор относительно малого радиуса - 33 мм, рассеивающий в непрерывном режиме полную мощность пучка 55 кВт.

Сложность задачи оптимизации заключалась в том, что для всех трех сильно отличающихся (почти вдвое для крайних значений) величин рабочих магнитных полей необходимо было обеспечить примерно одинаковую рабочую зону (область посадки пучка) коллектора при примерно одинаковой пиковой плотности мощности, не превышающей 0.5 кВт/см<sup>2</sup>. Такая разница в  $B_0$  приводит к сильному различию в коэффициенте неадиабатичности  $\epsilon$  в области около края экрана – более чем в 3 раза для разных  $B_0$ , поскольку  $\epsilon$  обратно пропорционально квадрату магнитного поля. В результате, при наименьшем рабочем магнитном поле движение частицы в этой области неадиабатическое, в то время как при наибольшем оно становится адиабатическим. Все это существенно усложняет процесс оптимизации и нахождение условий, при которых обеспечивается приемлемая тепловая нагрузка коллектора при всех рабочих частотах гиротрона.

Для каждого из трех выбранных значений магнитного поля применялся свой метод оптимизации, учитывающий специфику движения электрона в области ферромагнитного экрана, а для компенсации смещения рабочей зоны коллектора и тонкой настройки режима его работы над коллектором была установлена система трех маломощных катушек (см. рис. 65). Суммарная мощность, потребляемая коллекторными катушками, не превышает 300 Вт.



*Рис. 65. Схема магнитной системы, положение катушек и геометрия коллектора.*

Оптимизация была начата с режима с наименьшим магнитным полем  $B_0 = 1$  Тл, когда неадиабатические эффекты играют наибольшую роль ( $\epsilon > 1.5$  в области края ферромагнитного экрана). Как было сказано выше, в этом случае все электроны после пролёта края ферромагнитного экрана имеют практически одинаковую по величине и направлению вращательную скорость, определяемую главным образом закруткой в неоднородном поле под экраном. Поэтому для ускорения процесса оптимизации предварительные расчеты траекторий проводились без учета пространственного заряда не для всего пучка в целом, а только для нескольких наиболее характерных электронов в предположении, что в резонаторе они не имеют вращательной скорости и отличаются только положением ведущих центров.

Такой подход позволил быстро производить подбор токов и положения дополнительных катушек (фиксированного для всех полей  $B_0$ ) таким образом, чтобы максимально растянуть зону синфазного движения (сравни рис. 63 и рис. 66а) почти параллельно коллектору и обеспечить подход электронных траекторий в области этой зоны к стенке коллектора под небольшим углом, что позволяет максимально распределить электронный пучок по поверхности коллектора.

В процессе окончательной оптимизации, расчет проводился с учетом пространственного заряда пучка, разного положения ведущих центров в резонаторе и различных начальных фаз (от 0 до  $2\pi$ ) вращения электронов по ларморовской окружности в плоскости старта электронов. Кроме этого, учитывался и ряд дополнительных эффектов, перечисленные ниже. Во-первых, вращательная скорость электронов, приобретаемая в неадиабатическом поле, в первом приближении, пропорциональна радиусу входа частиц в это поле. Поэтому электроны с максимальным радиусом ведущего центра, при прочих равных условиях, закручиваются сильнее, чем электроны с минимальным радиусом. Во-вторых, электроны в резонаторе имеют большую вращательную скорость (для приемлемых значений КПД питч-фактор  $g > 1.3$ ). По мере выхода

частицы в область спадающего магнитного поля эта скорость, в соответствии с законом сохранения поперечного адиабатического инварианта, перед входом в область с  $\varepsilon > 1$  (здесь поле уменьшается примерно на порядок – см. рис. 62) уменьшается до относительно малой величины, значительно меньшей, чем осцилляционная скорость, придаваемая частицам однопериодным неадиабатическим ондулятором-«кикером». Потом, в области с  $\varepsilon > 1$  вращательная скорость электрона векторно складывается с вращательной скоростью, приобретаемой при пролёте частицей области спадающего неадиабатического магнитного поля. В результате, питч-фактор электрона может как уменьшиться, так и увеличиться, в зависимости от фазы циклотронного вращения частицы. После прохождения области кикера, сразу перед посадкой на коллектор, частица снова оказывается в слабонеоднородном поле и значит, ее ведущий центр снова начинает следовать вдоль той магнитной силовой линии, на которой он находился в резонаторе. Соответственно, частицы, имевшие в резонаторе меньший радиус ведущего центра, будут высаживаться ближе к концу коллекторной области.

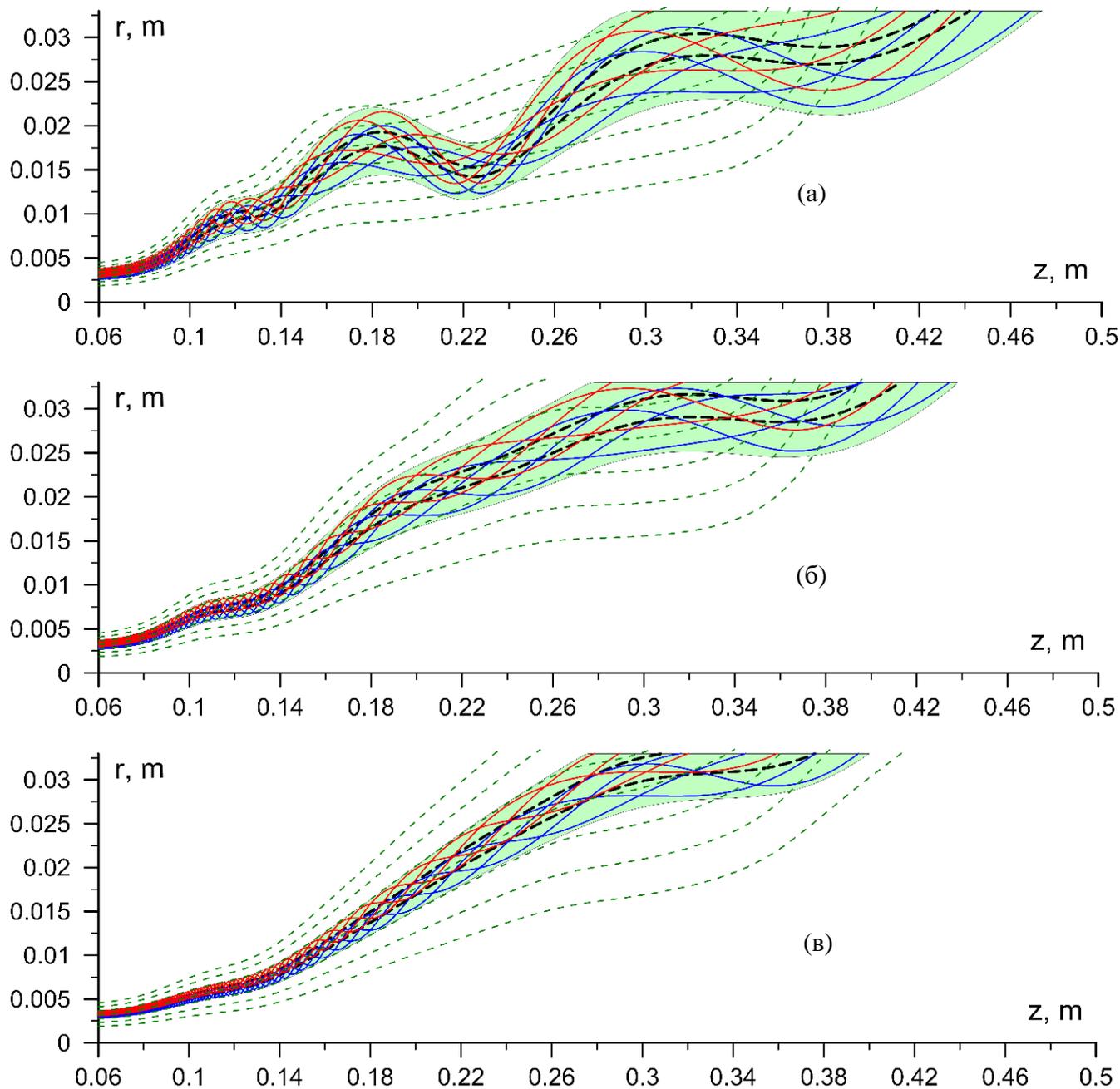
После предварительной оптимизации системы с целью увеличения длины зоны синфазного движения (см. выше), возможно так подобрать токи катушек и угол подхода магнитного поля к поверхности коллектора, что электроны с большей поперечной скоростью и большим радиусом ведущего центра в резонаторе будут оседать ближе к началу коллектора, а электроны с малой поперечной скоростью и меньшим радиусом ведущего центра – ближе к его концу и обеспечить дальнейшее увеличение длины зоны посадки электронного пучка на коллектор и умеренный перепад плотности мощности вдоль поверхности коллектора. Отметим, что в данном случае целесообразно осуществить посадку пучка на втором периоде ондуляторного движения (зона «косички»), поскольку во время первого периода радиус пучка еще мал, а магнитное поле еще относительно велико (согласно [30] длина зоны посадки пучка в слабонеоднородном поле порядка шага электронной траектории).

Другим предельным случаем является режим с рабочим полем  $B_0 = 1.8$  Тл. Как показывают расчеты, здесь даже под краем экрана  $\varepsilon \sim 0.3$  и поэтому магнитное поле остается адиабатическим на всем протяжении электронной траектории. Соответственно, методика оптимизации основана на методе расчета адиабатических коллекторных систем, изложенном в [13], [30] и заключалась в таком подборе токов катушек, который обеспечивал попадание средней ведущей силовой линии магнитного поля в центр коллектора и одновременно – умеренный (порядка 5 градусов) угол наклона магнитного поля к поверхности коллектора.

Наконец, режим с  $B_0 = 1.3$  Тл соответствует промежуточному случаю, когда наблюдается лишь умеренное нарушение адиабатичности магнитного поля под экраном ( $\varepsilon \sim 1$ ). В результате вращательная скорость, остающаяся у электрона перед входом в область под ферромагнитным экраном, несколько превышает скорость, приобретаемую в ондуляторе, и в целом движение

электрона остается близким к адиабатическому. Поэтому методика оптимизации сходна с примененной в случае  $B_0 = 1$  Тл.

В целом, подбор токов катушек для каждого из значений  $B_0$  позволил реализовать распределения плотности мощности, изображенные на рис. 67 (соответствующие формы электронного пучка приведены на рис. 66).

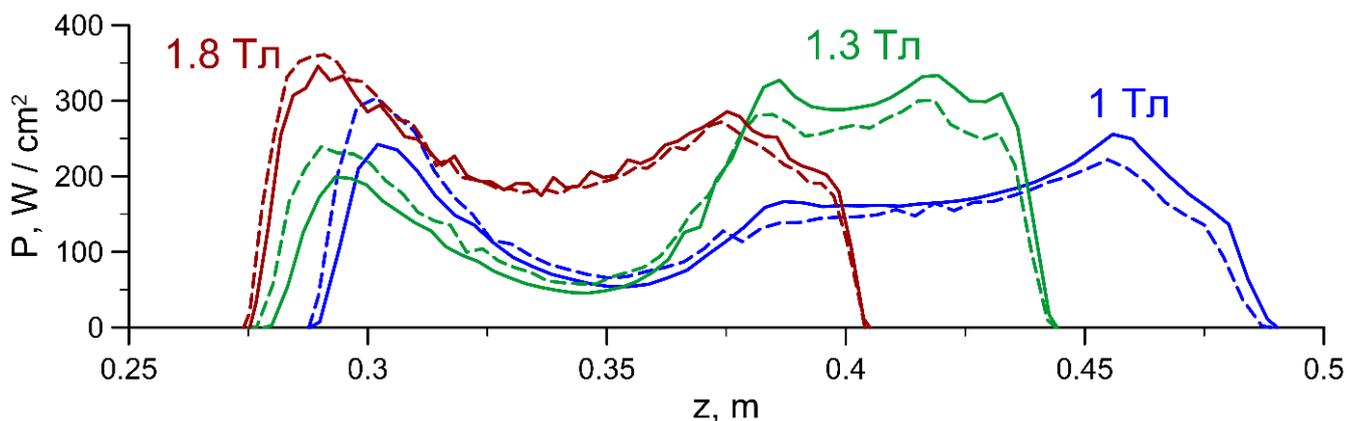


**Рис. 66.** Оптимизированные с точки зрения осаждаемой плотности мощности траектории ВЭП в коллекторе гиротрона для случаев магнитных полей 1.0 (а), 1.3 (б) и 1.8 (в) Тл. Жирным пунктиром показаны траектории электронов, имеющих нулевую поперечную скорость; тонким пунктиром – силовые линии магнитного поля.

Оптимизация коллектора при разных  $B_0$  требует перебора очень большого числа вариантов (поиск идет в многомерном пространстве параметров) и важной становится производительность

применяемого программного обеспечения. Используемый ранее комплекс программ CST Studio Suite при необходимой для обеспечения высокой точности расчетов шестигранной сетке с несколькими десятками миллионов ячеек и большим (несколько сотен тысяч) числе частиц требует для моделирования одного варианта с учетом пространственного заряда нескольких десятков часов даже при распараллеливании задачи на шесть процессорных ядер. Как показала практика расчетов, более перспективным оказывается написание собственного программного кода с применением библиотеки IBSIMU.

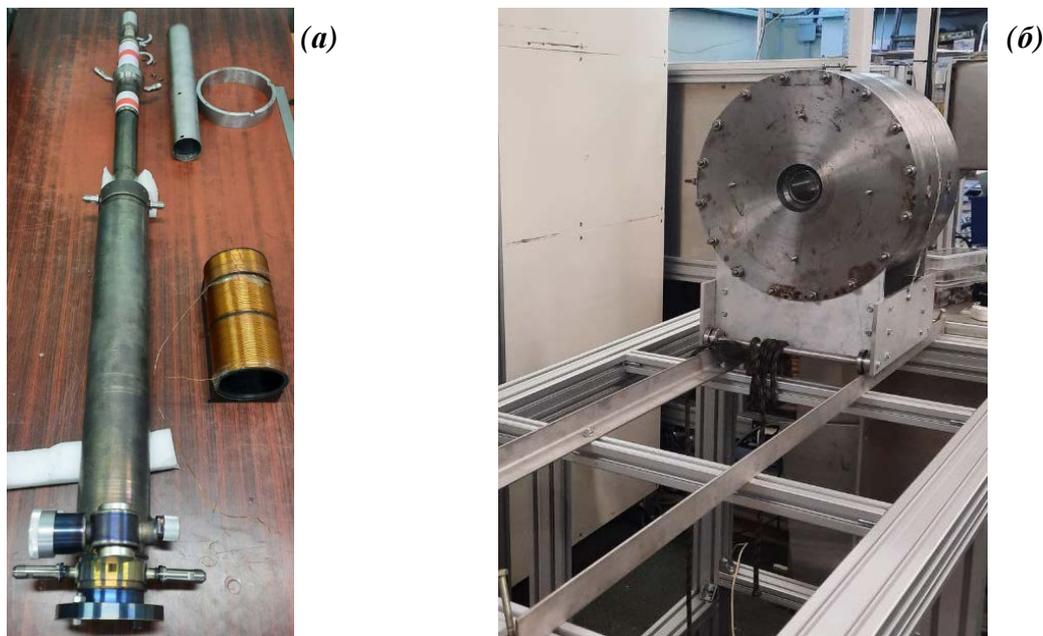
Главными преимуществами написанного кода являются высокая скорость расчета и последующей обработки данных (на два порядка быстрее, чем CST Studio при большом количестве частиц и мелкой сетке), меньшие требования к памяти при тех же параметрах, а также доступность всех данных расчета, позволяющая более подробно анализировать динамику электронного пучка. Сравнение результатов расчетов по двум пакетам программ не выявило значимых различий, пиковая мощность отличалась менее чем на 5%, положение зоны осаждения – не более чем на несколько миллиметров.



*Рис. 67. Распределение плотности мощности на коллекторе вдоль продольной координаты коллектора с учетом пространственного заряда (пунктир) и без (сплошная линия).*

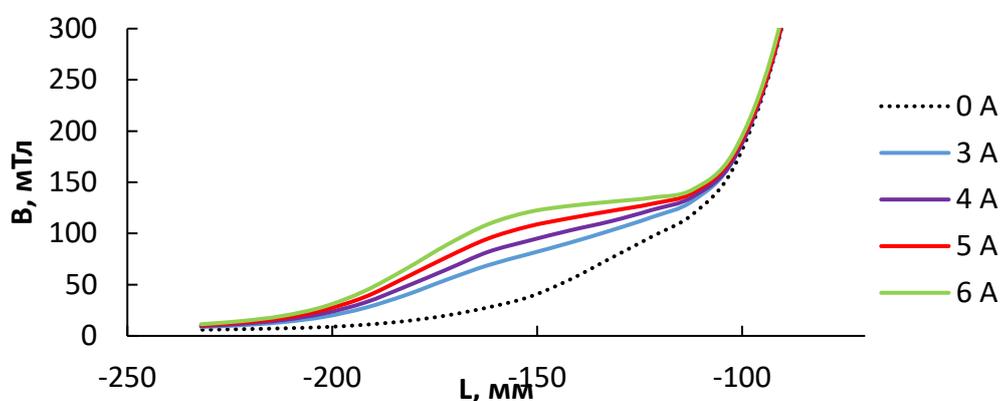
### **3.4 Результаты экспериментального исследования гиротронного комплекса с МЭС в режиме генерации с частотой 28 ГГц**

Разработанный проект технологического гиротрона был реализован на производственных мощностях ИПФ РАН и ЗАО НПП «ГИКОМ». Первым этапом подготовки комплекса стала установка доработанной МЭС с катодной и коллекторными катушками (см. рис. 68а). Для проверки распределения магнитного поля была проведена серия экспериментов, целью которых было сравнением теоретических магнитных полей с экспериментальными и подбор оптимальных рабочих токов соленоидов для режима генерации с частотой 28 ГГц.

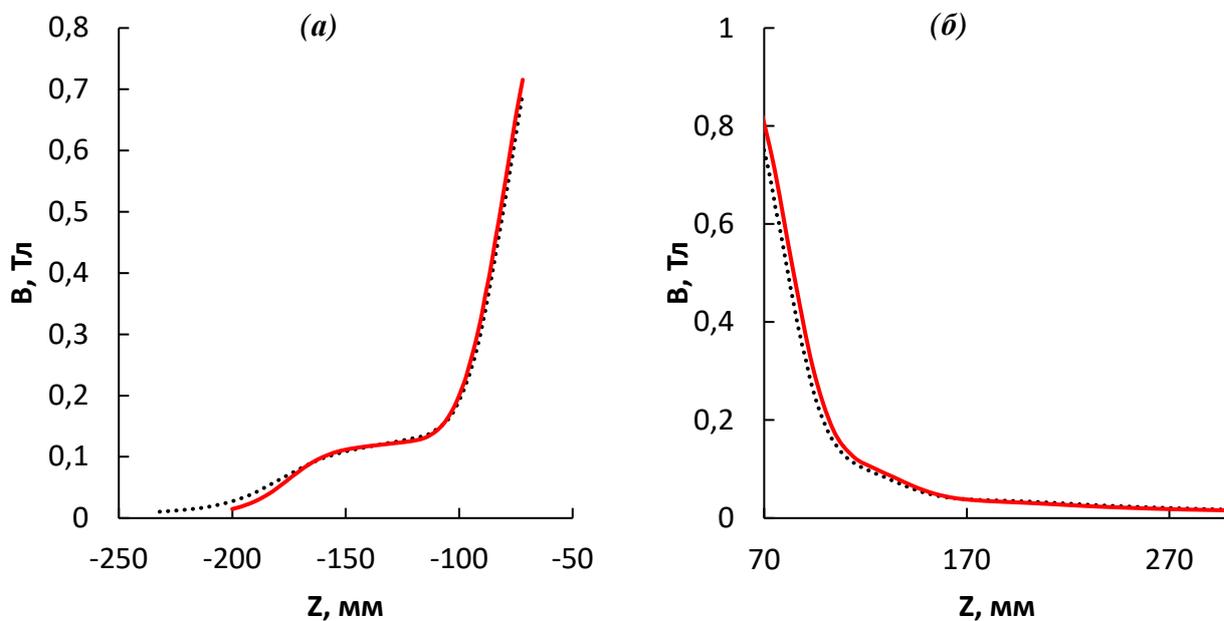


**Рис. 68.** Гиротрон с катодной и коллекторными катушками (а), основная МЭС (б).

Режим работы основного соленоида достигался при токе  $I_s=100$  А,  $U_s=121$  В. Для проверки возможности коррекции профиля магнитного проля в области формирования ВЭП были измеряны зависимости профиля магнитного поля при различных токах катодной катушки. (см. рис. 69). Наилучшее соответствие экспериментальных и теоретических (использованных при численном моделировании) данных достигается при токе катодной катушке  $I_{kk} = 5$  А (красная линия на рис.69 и рис. 70а). Особенно важным этапом подготовки к экспериментальному тестированию данного гиротрона являлся проверка соответствия расчетному профилю магнитного поля в коллекторной области. Для этого каркас из трех коллекторных катушек был закреплен в рабочем положении на оси МЭС в области расчетного расположения. Затем было измерено магнитное поле на оси системы в коллекторной области. Полученные численные значения токов коллекторных катушек обеспечили точное совпадение экспериментального профиля магнитного поля в коллекторной области расчетному (рис. 70б).



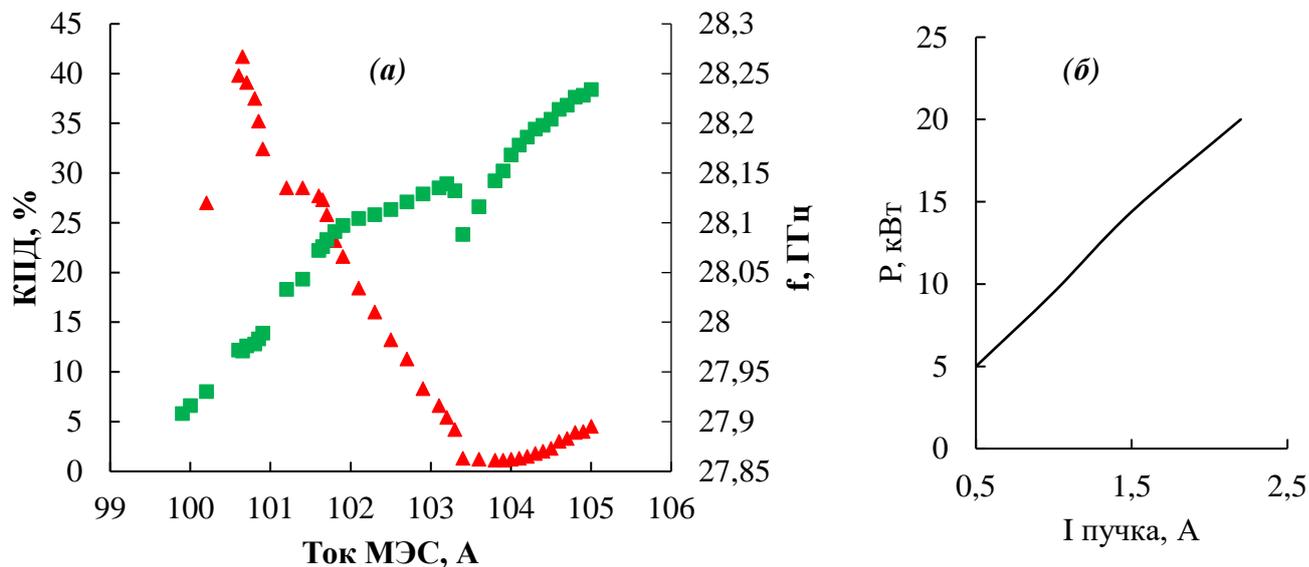
**Рис. 69.** Профиль магнитного поля в катодной области при различных токах катодной катушки



**Рис. 70.** Расчетный и экспериментальный профиль магнитного поля в катодной области (а) и в коллекторной области (б).

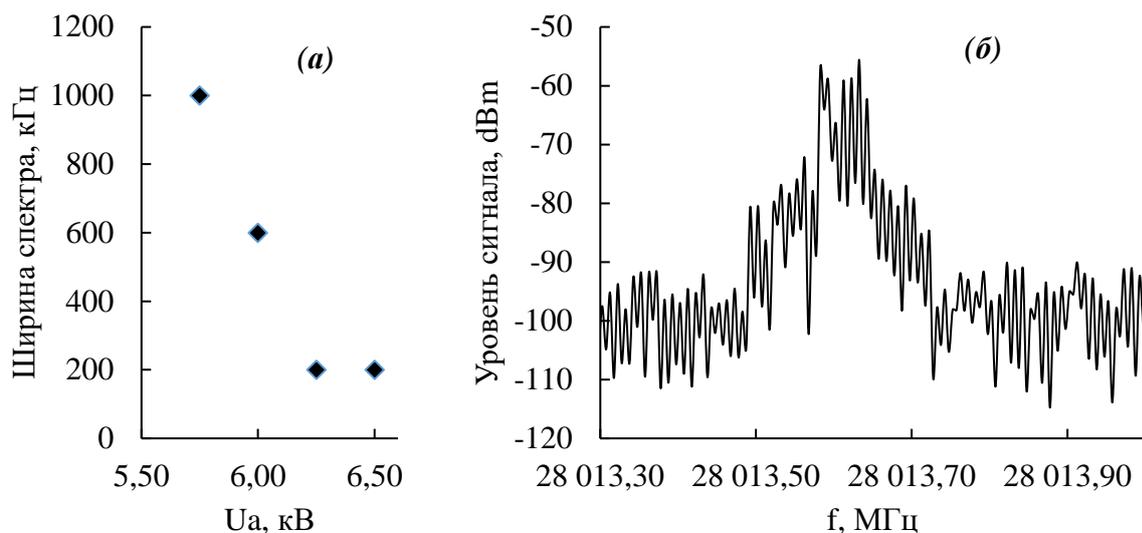
Полученные данные подтвердили корректность изготовленной магнитной системы и позволили перейти к основному этапу тестирования гиротрона. После установки лампы в магнит была проведена тестовая серия экспериментов на малых токах электронного пучка при номинальном напряжении 23 кВ. Первая генерация была получена при токе 0.5 А и ускоряющем напряжении 23 кВ. При уменьшении магнитного поля и соответствующем движении в область оптимального взаимодействия было получено КПД генерации 43% (см. рис. 71а). Дальнейшее увеличение рабочего тока не сказалось на КПД генерации и при токе 2.1 А была получена устойчивая генерация на уровне мощности 20 кВт с КПД около 42%. При этом напряжение модулирующего анода варьировалось в пределах от -5.7 до -6.1 кВ. При движении в область большего КПД и, соответственно, в меньшие магнитные поля питч-фактор возрастал и качество ВЭП ухудшалось, так как пучок становился «перекрученным». Для компенсации этого эффекта изменялась разность потенциалов между катодом (-23 кВ) и модулирующим анодом. В процессе изменения магнитного поля была получена зона генерации и зависимость частоты генерации от магнитного поля (см. рис. 71). Реализация режимов с максимальным КПД достигается варьированием анодного напряжения и поля катодной катушки, с помощью чего варьируется регулировался питч-фактор и разброс по поперечным скоростям.

Ширина спектра генерируемого излучения в оптимальном режиме составила около 0.2 МГц. Зависимость мощности генерации от тока ВЭП представлена на рис. 71б.



**Рис. 71.** (а) – КПД генерации (красные треугольники) и зависимость частоты генерации (зеленые квадраты) от тока основной магнитной системы. (б) – зависимость мощности генерации от тока электронного пучка.

Для продвижения в области больших КПД при уменьшении магнитного поля исследовался вид спектра сигнала на Keysight N9010a Spectrum Analyzer (10 Гц – 44 ГГц). При ухудшении качества ВЭП спектр начинает уширяться и перестает быть стабильным. Для повышения устойчивости электронного потока следует уменьшить разность потенциалов катод-анод, т.е. питч-фактор электронов. Спектральные характеристики излучения приведены на рис. 72(а), вид спектра в режиме с максимальным КПД на рис. 72б. Спектральные характеристики излучения в режиме с максимальным КПД приведены на рис. 72б.



**Рис. 72.** Ширина спектра сигнала от анодного напряжения (а), профиль спектра излучения гиротрона в оптимальном режиме работы (б).

Значения КПД генерации были получены при расчетном положении прибора относительно центра магнитной системы. В таком режиме интегральный КПД комплекса является рекордным, а работа на основном циклотронном резонансе обеспечивает стабильную генерацию в широком диапазоне рабочих режимов, исключая возможности возбуждения паразитных мод. Результаты численного моделирования предсказывают что можно рассчитывать на дальнейшее повышение КПД генерации до 50% за счет согласованной коррекции магнитного поля в области катода, коллектора и резонатора.

## **Заключение**

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Промоделирована и экспериментально реализована возможность значительного повышения КПД приборов гиротронного типа посредством профилирования магнитного поля в области резонатора гиротрона. В технологическом гиротроне с рабочей частотой 28 ГГц КПД увеличен в 1.3 раза по сравнению с однородным распределением магнитного поля. Продемонстрирована возможность стабилизации рабочей частоты гиротрона за счет системы маломощных катушек в резонаторной области.
2. Экспериментально продемонстрирована возможность снижения температуры подогревателя катода и, соответственно, существенного (в несколько раз) увеличения срока службы катодного узла за счет дополнительного нагрева эмиттера бомбардировкой отраженными от магнитной пробки электронами.
3. Исследована конфигурация ЭОС с широким эмиттером, позволяющая увеличить рабочий ток гиротрона при сохранении малого позиционного и скоростного разброса. Это позволяет увеличить мощность и КПД комплексов как за счет более эффективного электронно-волнового взаимодействия, так и за счет снижения объема рабочего магнитного поля.
4. Разработана и испытана магнитно-экранированная система, позволяющая примерно в 4 раза снизить энергопотребление соленоида при той же интенсивности и протяженности магнитного поля в области электронно-волнового взаимодействия.
5. На базе магнитно-экранированной системы разработан технологический гиротрон нового поколения, способный осуществлять эффективную (~35% без рекуперации энергии) генерацию излучения мощностью до 25 кВт на частотах 28, 35, 45, 95 ГГц. Усовершенствованы программные коды для расчета электронной оптики и электронно-волнового взаимодействия, что позволило сократить требуемые вычислительные ресурсы и время, требуемое для оптимизации ключевых узлов гиротрона.

6. В результате экспериментального исследования гиротронного комплекса с магнито-экранированной системой достигнута устойчивая генерация рабочей моды на основном циклотронном резонансе на уровне мощности 20 кВт при токе электронного пучка 2.2 А и ускоряющем напряжении 23 кВ при энергопотреблении соленоида 13 кВт. Результирующий КПД всего комплекса составил около 32 %, что в 1.5 раза превышает аналогичный параметр существующих коммерческих технологических комплексов.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M. et al. // IEEE Trans. 2004. V. PS-32. № 1. P. 67.
2. Bykov Yu.V., Egorov S.V., Ereemeev A.G. et al. // J. Am. Ceram. Soc. 2015. V. 96. № 11. P. 3518.
3. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V. et al. // Diamond and related mater. 2006. V. 15. № 4–8. P. 502.
4. Skalyga V., Izotov I., Golubev S. et al. // Appl. Radiation and Isotopes (in press). doi 10.1016/j.apradiso. 2015.08.015
5. Samokhin A.V., Alekseev N.V., Vodop'yanov A.V. et al. // High Energy Chem. 2015. V. 49. № 4. P. 267.
6. Keier, A.P., Radiophys. Quantum Electron., 1978, vol. 21, p. 631.  
<https://doi.org/10.1007/BF01052043>
7. Dumbrajs, O. and Nusinovich, G.S., Phys. Plasmas, 2018, vol. 25, p. 1.  
<https://doi.org/10.1063/1.5019974>
8. Bykov, Yu., Ereemeev, A., Glyavin, M., Kholoptsev, V., Luchinin, A., Plotnikov, I., Denisov, G., Bogdashev, A., Kalynova, G., Semenov, V., and Zharova, N., IEEE Trans. Plasma Sci., 2004, vol. 32, no. 1, p. 67. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.823904>
9. Nusinovich, G.S., Int. J. Electron., 1988, vol. 64, p. 127.  
<https://doi.org/10.1080/00207218808962789>
10. G.S.Nusinovich // IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, vol.27, Is.2, p.313
11. Куфтин А.Н., Белов С.П. // Прикладная физика. 2000. № 3. С. 76.
12. Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. // Тез. докл. X Всесоюз. конф. по электронике СВЧ. Т. 1. Вакуумная электроника СВЧ. Минск, 1983. С. 192.
13. Manuilov V.N., Morozkin M.V., Luksha O.I., Glyavin M.Y. Gyrotron collector systems: Types and capabilities//Infrared Physics & Technology, 2018, Vol. 91, Gyrotron collector systems, P. 46-54.
14. P. P. Woskov, H. H. Einstein and K. D. Oglesby, "Penetrating rock with intense millimeter-waves," 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2014, pp. 1-2, doi: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6955993.
15. <https://www.gyrotrontechnology.com/>
16. Windridge, Melanie, Smaller and quicker with spherical tokamaks and high-temperature superconductors, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, volume 377, number 2141, pages 20170438, 2019, doi 10.1098/rsta.2017.0438

17. Глявин М.Ю., Гольденберг А.Л., Мануилов В.Н., Морозкин М.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011 Т. 54, № 8–9. С. 690.
18. Гольденберг А.Л., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Мануилов В.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005 Т. 48, № 10–11. С. 835
19. <https://www.cst.com>
20. <https://www.comsol.com>
21. Fedotov, A.E., Rozental, R.M., Zotova, I.V. et al. Frequency Tunable sub-THz Gyrotron for Direct Measurements of Positronium Hyperfine Structure. *J Infrared Milli Terahz Waves* 39, 975–983 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0522-2>.
22. Glyavin, M.Yu., Golubyatnikov, G.Yu., Ivanov, A.S., Luchinin, A.G., Matrosov, V.V., Mishagin, K.G., and Morozkin, M.V., *Vestn. Lobachevsky State Univ. Nizhni Novgorod*, 2014, vol. 2, no.1, p. 75.
23. Rzesnicki, T., Piosczyk, B., Kern, S., Illy, S., Jin, J., Samartsev, A., Schlaich, A., and Thumm, M., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, vol. 38, no. 6, p. 1141. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2040842>
24. Matsuki, Y., Ueda, K., Idehara, T., and Ikeda, R., *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, 2012, vol. 33, p. 745. <https://doi.org/10.1007/s10762-012-9890-1>
25. Idehara, T., Ogawa, I., Ohashi, K., and Iwata, Y., *Electr. Eng. Jpn.*, 2004, vol. 149, p. 4. <https://doi.org/10.1002/eej.20084>
26. Bykov, Yu., Denisov, G., Ereemeev, A., Kalynova, G., Kholoptsev, V., Kopelovich, E., Kufiin, A., Lygin, V., Pavelyev, A., Plotnikov, I., Zapevalov, V., and Zavolsky, N., *Proc. Conference Digest of the 2004 Joint 29th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conference on Terahertz Electronics, Karlsruhe, 2004*, p. 191. <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2004.1422019>
27. Glyavin, M., Luchinin, A., and Morozkin, M., *Rev. Sci. Instrum.*, 2012, vol. 83, p. 074706. <https://doi.org/10.1063/1.4738644>
28. Гольденберг А.Л., Глявин М.Ю., Лещева К.А., Мануилов В.Н. Неадиабатическая электронно-оптическая система технологического гиротрона // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 5. С. 442.
29. V. N. Manuilov and Sh. E. Tsimring, *Radiophys. Quantum Electron.*, 24, No. 4, 338 (1981).
30. Гольденберг А.Л., Петелин М.И., Шестаков Д.И. К расчету адиабатической электронной пушки МЦР//*Электронная техника, Сер. 1 - Электроника СВЧ*, 1973, N 5, С. 73-80.
31. <https://www.elcut.ru>
32. Zapevalov, V.E., Moiseev, M.A. Influence of Aftercavity Interaction on Gyrotron Efficiency. *Radiophysics and Quantum Electronics* 47, 520–527 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000047243.18212.1d>

33. Sinitsyn, Oleksandr V., Nusinovich, Gregory S., Analysis of aftercavity interaction in gyrotrons, *Physics of Plasmas*, 2009 Vol. 16; Iss. 2, DOI:10.1063/1.3072978
34. Avramidis, K. A., Ioannidis, Z. C., Kern, S., Samartsev, A., Pagonakis, I. Gr., Tigelis, I. G., Jelonnek, J., A comparative study on the modeling of dynamic after-cavity interaction in gyrotrons, *Physics of Plasmas*, 2015 / 05 Vol. 22; Iss. 5, DOI:10.1063/1.4919924
35. В.Р. Карасик. Физика и техника сильных магнитных полей.
36. Г.С.Нусинович, Р.Э.Эрм. // *Электронная техника, Электроника СВЧ*, 1972, 8, с.55
37. А.Л.Гольденберг, М.И.Петелин // *Изв. ВУЗов Радиофизика*, 1973, т.16, №1, с.141
38. Ш.Е.Цимринг. Формирование винтовых электронных пучков. – В кн.: *Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров)*. Кн. 4. Саратов: СГУ, 1974, с. 3-94.
39. Ш.Е.Цимринг. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. – Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН, 2012, 576 с.
40. В.Н.Мануилов, Ш.Е.Цимринг // *Изв. ВУЗов Радиофизика*, 1981, т.24, №4, с.491.
41. P.V.Krivosheev, V.K.Lygin, V.N.Manuilov, Sh.E.Tsimring. // *Int. J. Infrared MillimeterWaves*.2001. V. 22, No. 8. P. 1119
42. В.К.Лыгин, Ш.Е.Цимринг. // *ЖТФ*, 1973, т.43, №8, с.1695.
43. M.Yu.Glyavin, A.N.Kuftin, N.P.Venedictov, V.E.Zapevalov. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1997, vol.18, no.11, p. 2129
44. В.Н.Мануилов, С.А.Полушкина Развитие колебаний потенциала и пространственного заряда в винтовых электронных пучках с разной топологией *Прикладная физика*, (2012), 3, 55-60
45. Kalvas T., Tarvainen O., Ropponen T., Steczkiewicz O., Ärje J., Clark H. IBSIMU : A three-dimensional simulation software for charged particle optics//*Review of Scientific Instruments*, 2010, Vol. 81, No. 2, P. 02B703.
46. Zavol'sky, N.A., Zapevalov, V.E., Moiseev, M.A. et al. Possibilities for Optimizing the Cavity of a High-Power Continuous-Wave Gyrotron. *Radiophysics and Quantum Electronics* 47, 603–614 (2004). <https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000049558.36460.24>
47. Moiseev M. A., Nemirovskaya L. L., Zapevalov V. E., Zavolsky N. A. Numerical simulation of mode interaction in 170 GHz/1 MW gyrotrons for ITER. // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1997. Vol. 18, №11, p. 2117.
48. T. Kariya, T. Imai, R. Minami et al., *Nucl. Fusion*, 57, 066001 (2017).
49. T. Idehara and S. P. Sabchevski, *J. Infrared Milli. Terahz Waves*, 33, 667-694 (2012).
50. V. Bratman, M. Glyavin, T. Idehara, Y. Kalynov, A. Luchinin, V. Manuilov, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Saito, Y. Tatematsu, V. Zapevalov, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 37, 36-46 (2009).

51. M. K. A. Thumm, G. G. Denisov, K. Sakamoto, and M. Q. Tran, *Nucl. Fusion*
52. O. Dumbrajs and G. S. Nusinovich, *Phys. Plasmas*, **19**, 103112 (2012).
53. R. Pu, G. S. Nusinovich, O. V. Sinitsyn, and T. M. Antonsen, Jr., *Phys. Plasmas*, **17**, 083105 (2010).
54. V. K. Lygin, V. N. Manuilov, B. V. Raisky, E. A. Solujanova, Sh. E. Tsimring, *Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **14**, 792-812 (1993)
55. Sh. E. Tsimring, *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics, Section 4*, John Wiley and Sons, (2007), Hoboken, New Jersey, USA.
56. Гольденберг А. Л., Глявин М. Ю., Лещева К. А. и др. *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2016. Т. 1. № 1. С. 215-217.
57. К.А.Лещева, В.Н. Мануилов. Численное 3d-моделирование систем формирования винтовых электронных пучков gyroприборов с азимутально неоднородным распределением тока эмиссии. *Успехи прикладной физики*, 2019, т.7, №3, с.298-308.
58. D. I. Sobolev and G. G. Denisov, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **38**, No. 10, 2825 (2010).

#### СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1А. **Proyavin, M.D.**; Sobolev, D.I.; Parshin, V.V.; Belousov, V.I.; Mishakin, S.V.; Glyavin, M.Y. Study of 3D-Printed Dielectric Barrier Windows for Microwave Applications. *Electronics* 2021, **10**, 2225. <https://doi.org/10.3390/electronics10182225>
- 2А. Выков, Y. V., Eremeev, A. G., Glyavin, M. Y., Denisov, G. G., Kalynova, G. I., Kopelovich, E. A., **Proyavin, M.D.**, . . . Kholoptsev, V. V. (2019). Millimeter-wave gyrotron research system. I. description of the facility. *Radiophysics and Quantum Electronics*, **61**(10), 752-762. doi:10.1007/s11141-019-09933-6
- 3А. И.В. Бандуркин, И.В. Зотова, В.Н. Мануилов, **Проявин М.Д.**, Е.С. Семенов, Е.М. Тай, А.Э. Федотов. Разработка мощных гиротронов для сферических токамаков. *ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА СВЧ*, 2021, Т.1, с. 272-277.
- 4А. **Proyavin, M. D.**, Manuilov, V. N., Gachev, I. G., Maslov, V. V., Morozkin, M. V., Kufin, A. N., . . . Glyavin, M. Y. (2020). A magneto-armored warm-solenoid based system for K-band gyrodevices. *Instruments and Experimental Techniques*, **63**(1), 97-100. doi:10.1134/S0020441220010078
- 5А. Glyavin, M.Y., Fedotov, A.E., Zotova, I.V., **Proyavin, M.D.** *et al.* Experimental Demonstration of the Possibility to Expand the Band of Smooth Tuning of Frequency Generation in Short-Cavity Gyrotrons. *Radiophys Quantum El* **61**, 797–800 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09937-2>
- 6А. **Proyavin, M. D.**, Morozkin, M. V., Luchinin, A. G., Glyavin, M. Y., Denisov, G. G. (2021). An experimental study of the influence of the longitudinal magnetic-field distribution profile on the

output characteristics of a gyrotron. *Instruments and Experimental Techniques*, 64(1), 97-101. doi:10.1134/S0020441220060196

7A. Denisov, G. G., Glyavin, M. Y., Fokin, A. P., Kuftin, A. N., Tsvetkov, A. I., Sedov, A. S., **Proyavin, M.D.**, . . . Zapevalov, V. E. (2018). First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective thomson scattering diagnostics. *Review of Scientific Instruments*, 89(8) doi:10.1063/1.5040242

8A. Glyavin, M. Y., Chirkov, A. V., Denisov, G. G., Fokin, A. P., Kholoptsev, V. V., Kuftin, A. N., **Proyavin, M.D.**, . . . Zapevalov, V. E. (2015). Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media. *Review of Scientific Instruments*, 86(5) doi:10.1063/1.4921322

9A. **Proyavin, M. D.**, Glyavin, M. Y., Manuilov, V. N. (2017). Magnetically shielded electron-optical system of a continuous gyrotron with an operating frequency of 24 GHz. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 62(10), 1165-1171. doi:10.1134/S1064226917100126

10A. Glyavin, M. Y., Kuntsevich, A. D., Luchinin, A. G., Manuilov, V. N., Morozkin, M. V., Fokin, A. P., **Proyavin, M. D.** (2013). A magnetron injection gun with a reduced filament temperature and elongated cathode lifetime. *Technical Physics Letters*, 39(12), 1068-1070. doi:10.1134/S1063785013120080

11A. **Proyavin, M.**, Dumbrajs, O., Nusinovich, G., & Glyavin, M. (2020). To the theory of gyrotrons with wide emitters. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 41(2), 141-151. doi:10.1007/s10762-019-00646-5

12A. **Proyavin, M. D.**, Glyavin, M. Y., Zavol'sky, N. A., Manuilov, V. N., Morozkin, M. V., Sobolev, D. I., & Krapivnitskaya, T. O. (2019). Development of a high-power continuous-wave gyrotron for high-efficiency technological K-band microwave complexes. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 62(7-8), 506-512. doi:10.1007/s11141-020-09996-w

13A. Morozkin, M.V., **Proyavin, M.D.**, Manuilov, V.N. et al. Optimization of Collector Systems of Technological Gyrotrons with Shielded Magnetic Systems. *Radiophys Quantum El* 63, 413–421 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10066-y>