

*На правах рукописи*



ПРОЯВИН Михаил Дмитриевич

**УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ГИРОТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ  
ДЛЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

1.3.4 – радиофизика

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Михаил Юрьевич Глявин, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук (г. Нижний Новгород).

Официальные оппоненты: Геннадий Гиршевич Соминский, доктор физико-математических наук, профессор высшей инженерно-физической школы, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ, г. Санкт-Петербург)

Нина Николаевна Скворцова, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН, г. Москва).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники Российской академии наук» (ИРЭ РАН, г. Москва).

Защита диссертации состоится « 20 » декабря 2021 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте [irfan.ru](http://rfpa.ru) ФБГНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук



Э.Б. Абубакиров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы*

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], плазмо-химическое выращивание алмазных пленок и дисков [3], успешно используются для очистки газовых выбросов, производства стекол и др. В перспективе подобные источники микроволнового излучения могут быть востребованы для борнейтронзахватной терапии [4], получения нанопорошков оксидов металлов методом испарения – конденсации [5], и ряда других перспективных технологий.

Столь широкий спектр приложений требует различных режимов работы с широким варьированием мощности генерируемого излучения. Столь же актуальна интегральная эффективность всего комплекса при любых режимах работы. Таким образом, для существующих технологических стендов, с гиротронами работающих на второй гармонике циклотронного резонанса, важной задачей является поиск наиболее эффективных рабочих режимов.

Следует отметить, что до настоящего времени технологические гиротроны, как правило, работали при относительно низких значениях магнитных полей, создаваемых обычными «теплыми» соленоидами, – около 0.5 Тл, что позволяет снизить требуемое энергопотребление магнита, но требует устойчивой одномодовой генерации на второй гармонике гирочастоты. По мере повышения мощности генерации, что обусловлено развитием указанных выше приложений, приходится решать проблему конкуренции рабочего типа колебаний с модами на основном циклотронном резонансе [6]. Представляется целесообразным использовать в качестве рабочего типа колебаний моды на первой гармонике, что позволит радикально увеличить генерируемую мощность, но и приведет к значительному повышению энергопотребления магнитной системы. Ориентация на промышленное использование комплексов и относительно низкие рабочие частоты делают нежелательным использование сверхпроводящих магнитов. Наиболее перспективным решением проблемы является использование магнитоэкранированных систем (МЭС) для гиротронов и адаптация данных СВЧ-генераторов к специфическому распределению профиля магнитного поля.

Системы формирования магнитного поля должны быть хорошо оптимизированы как с точки зрения энергопотребления (оптимизация геометрии экранов и обмоток, используемых магнитомягких материалов и т.д.), так и с точки зрения согласования профиля магнитного поля с возможностью реализации качественного винтового электронного пучка (ВЭП). Для последнего, главным объектом исследования является электронно-оптическая сис-

тема (ЭОС) гиротрона, причем не только в области формирования ВЭП, но и в области его посадки на коллектор.

Возможность реализации МЭС и соответствующей ЭОС гиротрона, позволяет рассчитывать на создание нового поколения технологических гиротронов, которые будут иметь уникальные параметры. Возможность достижения больших магнитных полей при приемлемой мощности потребления расширяет частотный диапазон технологических гиротронов вплоть до W-диапазона. Наличие слабого поля рассеяния в катодной области позволяет в широких пределах менять магнитное поле в катодной области варьируя параметры электронного потока, в частности, изменять радиус электронного пучка в резонаторе, что позволяет в одном СВЧ-приборе получить генерацию большого количества рабочих мод в широком диапазоне частот.

Таким образом, разработка гиротронных комплексов на базе МЭС является актуальной и важной задачей для современной СВЧ-электроники и ее приложений.

### ***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 гироприборов.
5. Реализация технологических гиротронных 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 гироприбора с ВЧ полями сверхразмерных резонаторов гироприбора. Поведение ВЭП в квазиadiaбатическом и неadiaбатическом маг-

нитном поле в области катода и коллектора. Распределение магнитного поля соленоидов, окруженных магнитомягким железом с нелинейной  $B-H$ -характеристикой.

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

Одной из актуальных задач в области гиротроники является возможность плавной перестройки частоты генерации. Одним из известных способов 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 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 [7] 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 гиротроне на второй гармонике гирочастоты 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%.

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 гиротрона с рабочей частотой 30 ГГц и мощностью до 15 кВт. Результаты исследования легли в основу расчета гиротрона с магнито-экранированной системой.

Первые попытки как теоретического, так и экспериментального исследования гиротронов с экранированными магнитными системами были предприняты в работах [8, 9]. В частности, был реализован КПД около 20% при уровне выходной мощности около 10 кВт [8]. 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 реали-

зации 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, использующиеся 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 квазиadiaбатического 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 неadiaбатично, внедрением системы трех маломощных (около 50 Вт) катушек удалось разработать методику осаждения электронного потока для работы гиротрона в магнитных полях 1-1.8 Тл. 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 электродинамической системы 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 %.

### ***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), 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 нагретой 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). Всего по теме диссертации опубликовано 13 статей в рецензируемых научных журналах и более 65 трудов в материалах научных конференций.

### ***Личный вклад автора***

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [1А – 13А] 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.А. Завольского и автора пакета программ Angel E.C. 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 магнитоэкранированных 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 58 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 как появляется зависимость от продольного разброса скоростей:  $\omega = s\Omega + hv_{||}$ . Для уменьшения влияния данного эффекта в работе [7] 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:

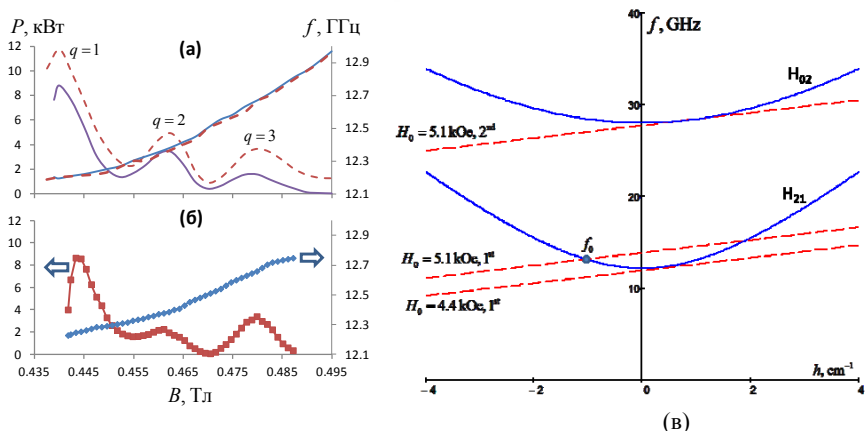
$$\delta\omega = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{g^2 L \delta v_{\perp}} \right)^2 = \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{v_{||0}}{\mu \delta v_{\perp}} \right)^2,$$

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.

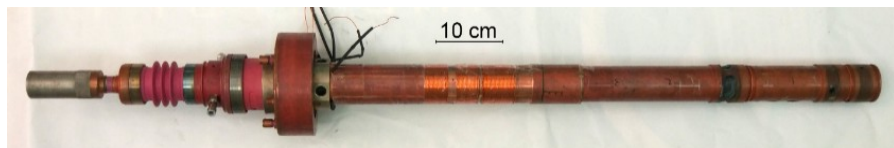
В результате экспериментов была подтверждена возможность генерации выходной мощности на уровне более 1 кВт в полосе перестройки час-

тоты более 4% [2A] 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.

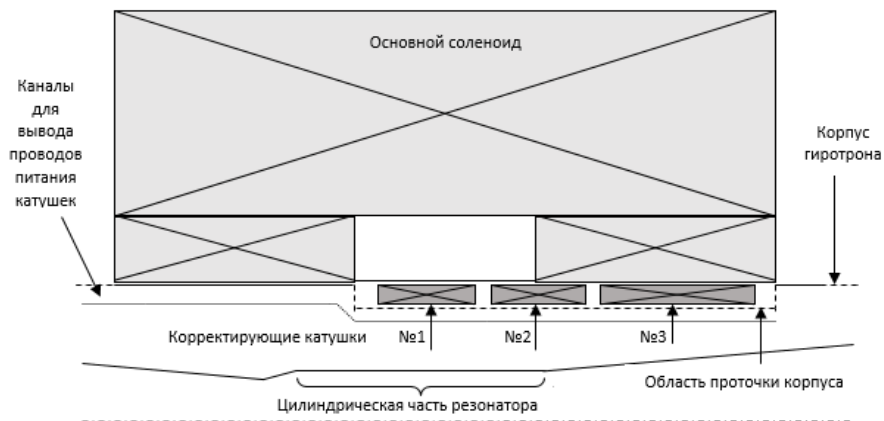


**Рис. 1.** Зависимость мощности  $P$  и частоты излучения  $f$  от магнитного поля  $B$  в гиротроне: (а) PIC-моделирование (пунктирные линии соответствуют нулевому начальному разбросу скоростей, сплошные линии – разбросу 20%;  $q$  – продольный индекс моды); (б) экспериментальные данные, (в) – дисперсионная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

В п. 1.2. описаны результаты работы с технологическим гиротроном на второй гармонике гирочастоты при выходной мощности 10 кВт на частоте 30 ГГц [3A]. 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 мало-мощными катушками (рис. 2.) было получено увеличение КПД в 1.3 раза (с 27 до 36%) по сравнению с режимом работы при однородном магнитном поле.



(а)



(б)

**Рис. 2.** Гиротрон с дополнительными резонаторными катушками (а) и общая схема магнитной системы (б)

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 [10] и успешно применяется в гироскопах, использующих криомагниты [11, 12] или системы на постоянных магнитах [13, 14]. 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 [10]. С учетом ограничений, накладываемых ослаблением переменного магнитного поля корпусом прибора (скин-эффект), характерная частота варьирования поля составила около 10 кГц [15], 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 [4А] и высокочастотных гиротронов малой мощности [5А], в которых быстрое изменение основного магнитного поля затруднительно в силу большой индуктивности соленоида криомагнита. Стабилизация частоты модуляцией напряжения на аноде также невозможна в силу диодной схемы лампы мощных СВЧ-комплексов.

Во **второй главе** рассмотрены вопросы, связанные с 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 квази-адиабатической и неадиабатической 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 [6А].

**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 отраженными от магнитной пробки электронами [7А]. 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 разработке и исследованию 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, например, в широко применяемом коммерческом коде CST Studio Suite при аналогичных исходных 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 [16], интегрированный в пакет программ Angel. Разработанные коды успешно использованы при расчете технологических гиротронов.

**В п. 2.4** исследована возможность оптимизации функции распределения электронов по поперечным скоростям с точки зрения эффективности взаимодействия с электромагнитной волной резонатора гиротрона [8А]. 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.

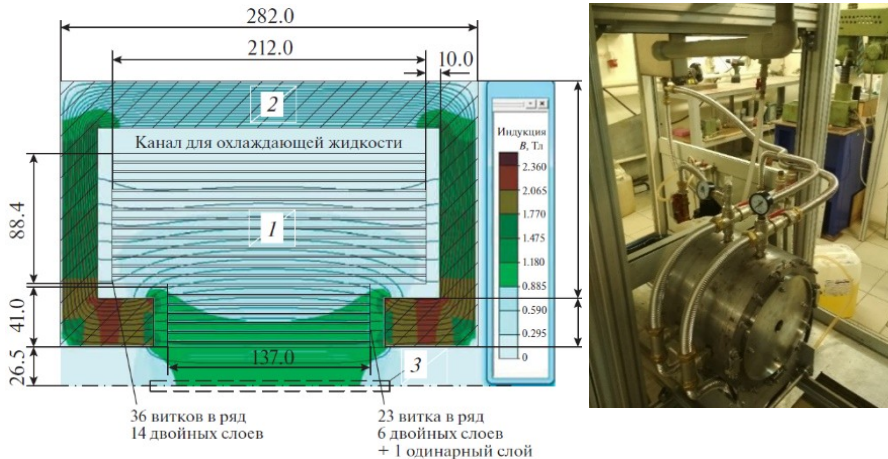
**В п. 2.5** приводятся результаты синтеза конфигурации электромагнитов и ферромагнитных вставок, расчета температурных эффектов в катодной области неадиабатической электронно-оптической системы гиротрона. Требуемый профиль магнитного поля в области формирования электронного пучка, использованный в работе [17], 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 [10А].

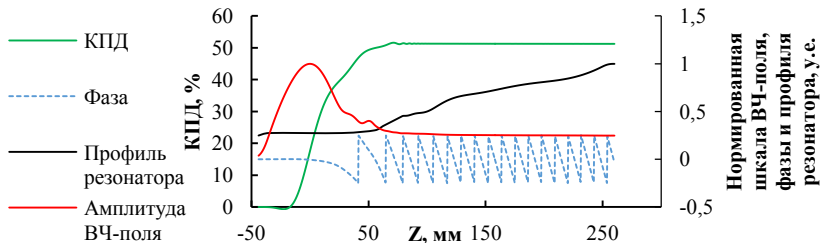
**В п. 3.1** проведено теоретическое и экспериментальное исследование МЭС (рис. 3) [11А]. Измерения индукции магнитного поля выполнены датчиком Холла (модель Lake Shore Gaussmeter Model 450) с погрешностью не более  $\pm 0.10\%$ . В ходе эксперимента получена зависимость интенсивности поля  $B$  в центре 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 °С. 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 МЭС 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. [12А]. Оптимизация параметров электронно-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона на 28 ГГц показала возможность достижения КПД генерации 52% (рис. 4), что с учетом потребления МЭС является рекордным для эффективности комплекса в целом (около 35%). Расчет проводился на программах Angel (одномодовое взаимодействие с учетом нефиксированной структуры ВЧ-поля) и CST Studio Suite (с учетом конкуренции сателлитов), 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.



**Рис. 3.** Общий вид магнитной системы и карта интенсивности магнитного поля в оптимизированной МЭС (слева): 1 – медная обмотка (шина сечением  $5.8 \times 2.8$  мм с лаковой изоляцией, сечение медного провода  $5.1 \times 2.65$  мм), 2 – ферромагнитный корпус системы, 3 – характерный масштаб области электронного пучка (штриховая линия). Размеры даны в миллиметрах. Справа – фотография МЭС в экспериментальном стенде



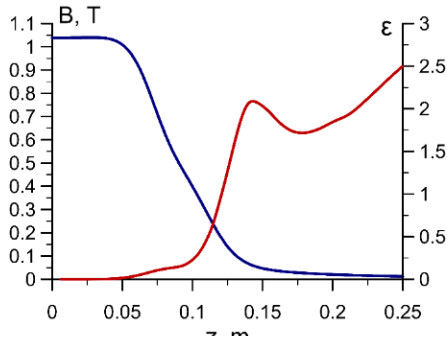
**Рис. 4.** Результаты моделирования в среде Angel режима генерации на частоте 28 ГГц ( $U_a = 23$  кВ,  $I_b = 2.4$  А,  $g = 1.56$ )

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 образом зависят от степени неадиабатичности магнитного поля, которая может быть оценена соответствующим безразмерным коэффициентом:

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

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 малоомощной экранированной катодной катушки. В расчетах было принято умеренное значение плотности тока  $j_k = 1.7 \text{ A/cm}^2$ , 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 [18]. 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: питч-фактор пучка в резонаторе  $g = 1.56$ , разброс поперечных скоростей 7%.

Расчет и оптимизация коллекторной области осложняется характерной особенностью МЭС – резким спадом магнитного поля за экранами, вследствие чего движение электронов в этой области становится неадиабатическим. Соответственно и расчет энергетической нагрузки коллектора по простой теории [19] становится невозможным. Величина  $\varepsilon$  для данного случая и магнитное поле приведена на рис. 5.

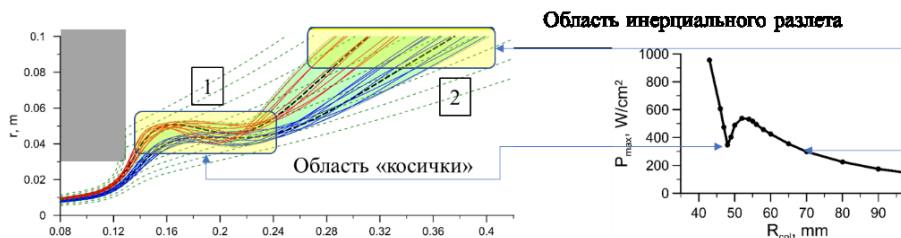


**Рис. 5.** Распределение магнитного поля на оси МЭС и график коэффициента неадиабатичности для гиротрона на основном циклотронном резонансе с частотой излучения 28 ГГц



Силовые линии магнитного поля резко расходятся в области, где расположен край ферромагнитного экрана (рис. 6). 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)

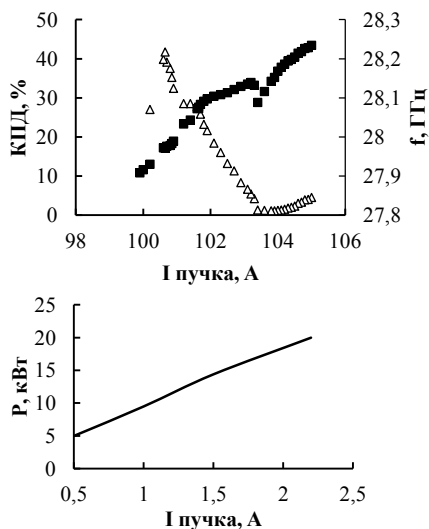
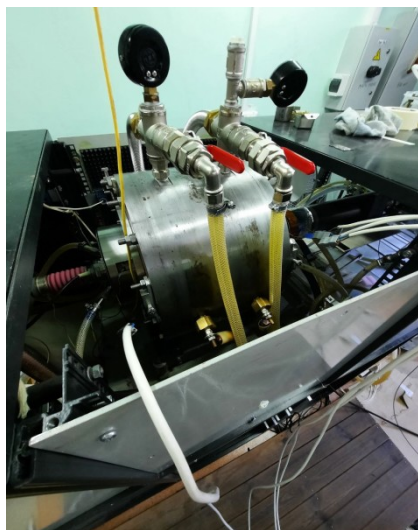


**Рис. 6.** Топология ВЭП в неадиабатическом коллекторе гиротрона с МЭС (слева) и плотность осаждаемой мощности от радиуса коллектора (справа)

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  $400 \text{ Вт/см}^2$ ) для непрерывного режима генерации при мощности пучка 50–60 кВт при различных величинах магнитного поля в резонаторе от 1 до 1.8 Тл (рис 7). 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 интегральном КПД комплекса (с учетом потребления магнитной системы) 32%, что в 1.5 раза превышает аналогичный параметр существующих технологических комплексов.



**Рис. 7.** Фото гиротронного комплекса с МЭС (слева). Результаты экспериментального исследования комплекса (справа): верхний график демонстрирует зависимость КПД генерации (треугольники) и частоты излучения (квадраты) от магнитного поля, нижний – мощность генерации от тока ВЭП

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 взаи-

модействия, 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.

## 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. Nusinovich G.S. // IEEE Trans. 2012. V. PS-27. № 2. P. 313.

7. 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>.
8. Куфтин А.Н., Белов С.П. // Прикладная физика. 2000. № 3. С. 76.
9. Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. // Тез. докл. X Всесоюз. конф. по электронике СВЧ. Т. 1. Вакуумная электроника СВЧ. Минск, 1983. С. 192.
10. 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.
11. 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>
12. 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>
13. Idehara T., Ogawa I., Ohashi K., and Iwata Y., *Electr. Eng. Jpn.*, 2004, vol. 149, p. 4. <https://doi.org/10.1002/ej.20084>
14. Bykov Yu., Denisov G., Eremeev A., Kalynova G., Kholoptsev V., Kopelovich E., Kuffin 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>
15. Glyavin M., Luchinin A., and Morozkin M., *Rev. Sci. Instrum.*, 2012, vol. 83, p. 074706. <https://doi.org/10.1063/1.4738644>
16. Semenov E., Zapevalov V., Zuev A. *Methods for Simulation the Nonlinear Dynamics of Gyrotrons. // Communications in Computer and Information Science*, 2021. Vol. 1413, pp. 49–62. *Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies, MMST 2020* (eds :Balandin D., Barkalov K., Gergel V., Meyerov I.). Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-030-78759-2\_4
17. 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.
18. V. N. Manuilov and Sh. E. Tsimring, *Radiophys. Quantum Electron.*, 24, No. 4, 338 (1981).
19. Гольденберг А.Л., Петелин М.И., Шестаков Д.И. К расчету адиабатической электронной пушки МЦР // *Электронная техника. Сер. 1 - Электроника СВЧ*, 1973, №5, с. 73-80.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1А. Bykov Y. V., Ereemeev A. G., Glyavin M. Yu., Denisov G. G., Kalynova G. I., Kopelovich E. A., Luchinin A. G., Plotnikov I. V., Proyavin M. D., Troitskiy M. M., Kholoptsev V. V. (2019). Millimeter-wave gyrotron research system. I. description of the facility. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 61(10), 752-762.

2А. Glyavin M.Yu., 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>

3А. Proyavin M. D., Morozkin M. V., Luchinin A. G., Glyavin M. Yu., Denisov G. G.. An experimental study of the influence of the longitudinal magnetic-field distribution profile on the output characteristics of a gyrotron. *Instruments and Experimental Techniques*, 2021, 64(1), 97-101. doi:10.1134/S0020441220060196

4А. Denisov G. G., Glyavin M. Y., Fokin A. P., Kuftin A. N., Tsvetkov A. I., Sedov A. S., Soluyanov E. A., Bakulin M.I., Sokolov E. V., Tai E. M., Morozkin M. V., 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

5А. Glyavin, M. Y., Chirkov, A. V., Denisov, G. G., Fokin, A. P., Kholoptsev, V. V., Kuftin, A. N., Luchinin A. G., Golubyatnikov G. Y., Malygin V. I., Morozkin M. V., Manuilov V. N., Proyavin M. D., Sedov A. S., Sokolov E. V., Tai E. M., Tsvetkov A. I., 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

6А. 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

7А. 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

8А. 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

9А. 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.

10A. Proyavin M. D., Glyavin M. Y., Zaval'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

11A. Proyavin M. D., Manuilov V. N., Gachev I. G., Maslov V. V., Morozkin M. V., Kuffin 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

12A. 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>

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>

## 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 магнито-статического 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.....	40
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 Расчеты 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.....	94
Заключение .....	97
Список цитированной литературы.....	99
Список трудов автора по теме диссертации.....	102

Проявин Михаил Дмитриевич

**УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ГИРОТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ  
ДЛЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать 18.10.2021.

Формат  $60 \times 90^{1/16}$ .

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ №52(2021).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,  
603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, 46