

# Проект электронно-оптической системы неадиабатической магнетронно-инжекторной пушки для гиротрона с частотой излучения 24 ГГц.

А.Л. Гольденберг<sup>1</sup>, К.А. Лещева<sup>1,2</sup>, В.Н. Мануилов<sup>1,2</sup>, М.Д. Проявин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

**Аннотация:** приведены результаты теоретических исследований, направленных на создание неадиабатической электронно-оптической системы формирования винтовых электронных пучков, пригодной для технологических гиротронов. Проведена оптимизация электродов электронно-оптической системы, позволившая реализовать электронный пучок с малым скоростным разбросом и в то же время – большим, близким к 2, питч-фактором. Предложена и оптимизирована конфигурация магнитной системы, где для создания оптимальной конфигурации магнитного поля в области первоначального формирования электронного пучка и в то же время существенного снижения энергопотребления и тепловой нагрузки используемых для этого встречных катодных катушек Гельмгольца применяется Т-образная ферромагнитная вставка между катушками. Найдено температурное распределение в катодном узле с учетом водяного охлаждения и даны рекомендации по использованию в конструкции различных материалов, обеспечивающих приемлемый уровень термических деформаций в непрерывном режиме работы прибора.

**Ключевые слова:** Гиротрон, винтовой электронный пучок, неадиабатическая электронная пушка.

## 1. Введение

Комплексы на базе гиротронов занимают лидирующие позиции в области источников мощного микроволнового излучения в диапазоне длин волн от миллиметров до субмиллиметров [1]. Одним из наиболее распространённых видов гиротронов являются так называемые непрерывные технологические гиротроны, используемые в установках по СВЧ синтезу композитных материалов [2]. Для таких СВЧ-источников характерен частотный диапазон в десятки ГГц при уровне мощности от единиц до десятков киловатт. 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.

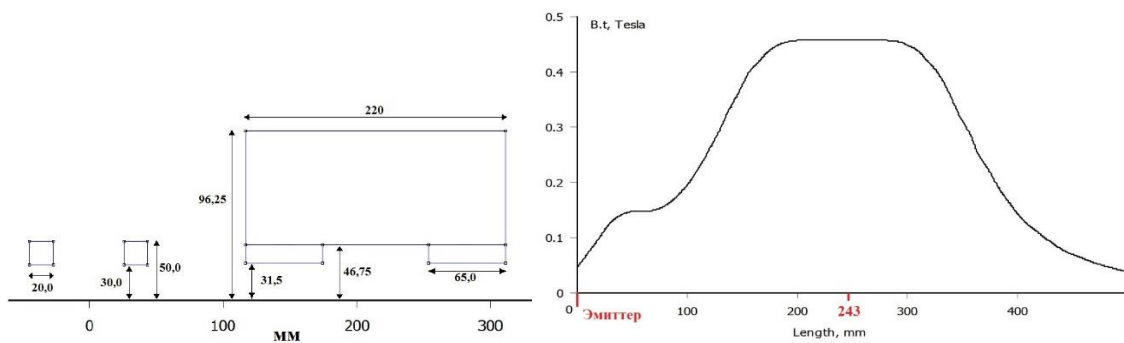
Роль указанных выше негативных факторов, влияющих на величину  $\delta v_{\perp}$ , можно полностью устранить или, по крайней мере, резко уменьшить при использовании неадиабатических систем формирования ВЭП, предложенных в работах [3, 4], что открывает возможности дальнейшего увеличения мощности и КПД технологических

гиротронов. Нижеуказанная концепция развита для проекта мощного технологического гиротрона с рабочей частотой 24 ГГц и выходной мощностью более 10 кВт.

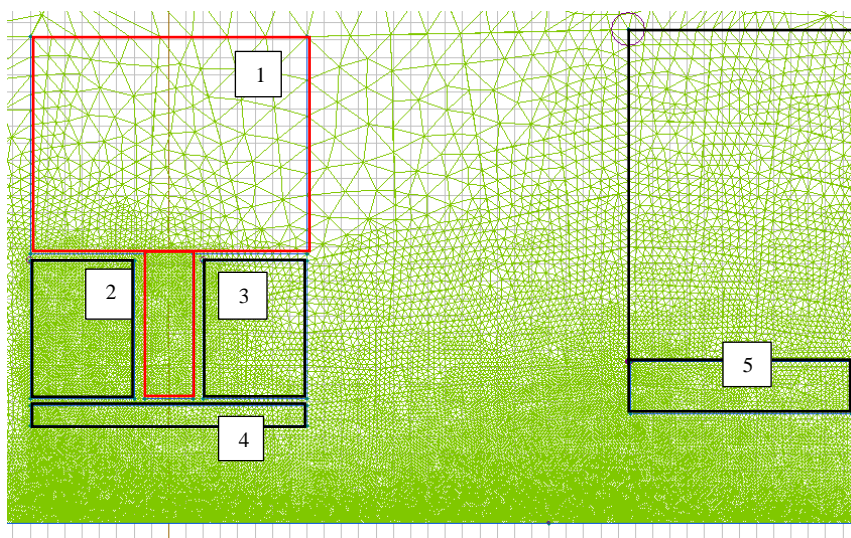
## 2. Разработка магнитной системы

В качестве основной магнитной системы планируется использовать существующий соленоид с однородным участком магнитного поля интенсивностью 0.46 Т (рис.1). Специфика используемой схемы формирования ВЭП требует обеспечения достаточно большого наклона магнитного поля к оси системы в области установки торцевого катода (см. [5] и ниже). С этой целью, первоначально, как и в более ранних работах [5, 6] симметрично относительно плоскости эмиттера устанавливалась пара встречных катушек (рис.1), 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.

Как известно, существенно снизить энергопотребление 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  $\mu \gg 1$ . Исходя из этих соображений в магнитную систему была добавлена Т-образная ферромагнитная вставка, расположенная симметрично относительно плоскости эмиттера  $z=0$ . Оптимизация геометрии вставки проводилась на базе численного моделирования по программе ELCUT [7] таким образом, чтобы сохранить полученные в расчетах оптимальные значения  $B_r$  и  $B_z$  в области катода. При этом, поскольку ферромагнетик экранирует осевое поле  $B_z$ , для его восстановления до исходного значения в катодную магнитную систему была включена дополнительная катушка малой толщины, расположенная симметрично относительно плоскости  $z=0$  (рис.2).



**Рисунок 1.** Исходная геометрия магнитной системы и профиль продольного распределения поля



**Рисунок 2.** Конфигурация магнитной системы. 1 – Т-образная ферромагнитная вставка, 2 и 3 –катодные катушки (управление  $B_r$ ), 4 – центральная катодная катушка (управление  $B_z$ ), 5 – часть основного соленоида.

В оптимизированной системе (рис.2) удалось реализовать в области эмиттера компоненты магнитного поля  $B_r$  и  $B_z$ , отличающиеся от полученных в исходной системе менее чем на 5%. Наличие ферромагнитной вставки позволило радикально (в 20 раз, до 18 Вт) снизить энергопотребление катушек, что полностью снимает проблему перегрева катушек в непрерывном режиме и делает предложенную схему практически реализуемой.

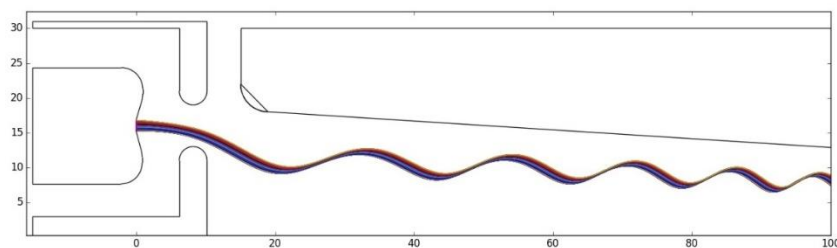
### 3. Траекторный анализ МИП

Траекторный анализ проводился с помощью программы CST STUDIO SUITE и программ обработки, реализованных на языке Python [8]. Расчет траекторий (рис. 3) 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 1.

**Таблица 1.** Параметры ВЭП

$I, A$	$g$	$\delta v_{\perp}, \%$
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 3.** Геометрия диодной электронной пушки. Показан ход электронных траекторий для случая с ферромагнетиком. Эмиттер находится в плоскости начала координат. Все размеры даны в мм.

#### **4. Расчет температурного распределения в катодной области неадиабатической магнетронно-инжекторной пушки**

Неадиабатические ЭОС пока не получили широкого распространения, в основном, по причине сложности конструкции электродов и температурных деформаций в процессе работы. Горизонтальное положение ЭОС и наличие нескольких элементов конструкции из разных материалов усложняет возможность сохранения аксиальной симметрии, особенно в процессе сильного нагрева при работе. Различное температурное расширение используемых материалов может также сильно сказаться на прочности фиксации конструктивных элементов прибора. Наконец, усложняющим фактором является наличие протяженных элементов конструкции, которые должны оставаться соосными как при длительном нагреве в процессе работы, так и при охлаждении в процессе выключения прибора. Отметим также, что детали, расположенные в зоне эмиттера, не только наиболее сильно подвержены термической деформации, но и вследствие высокой температуры участвуют в процессе газовой выделении, что ухудшает вакуумные условия. Поэтому необходим детальный расчет температурного поля, позволяющий оценить возможные деформации конструкции.

Для выявления наиболее горячих областей конструкции с помощью программы ELCUT 5.6 было проведено численное моделирование распределения температуры. Соответствующая карта температур (рис. 4) позволила определить самые горячие области и дать рекомендации по выбору материалов с минимальным коэффициентом расширения в указанных областях. В частности, катод и часть центрального анода, было решено изготовить из молибдена. Данный материал более устойчив в рассматриваемых температурных условиях, по сравнению, например, с медью. Но поскольку медь обладает высокой теплопроводностью, принято решение использовать медные элементы для теплоотвода от молибденового стержня (центрального анода) к контуру водяного охлаждения. Корректность используемых моделей подтверждена результатами пирометрирования.

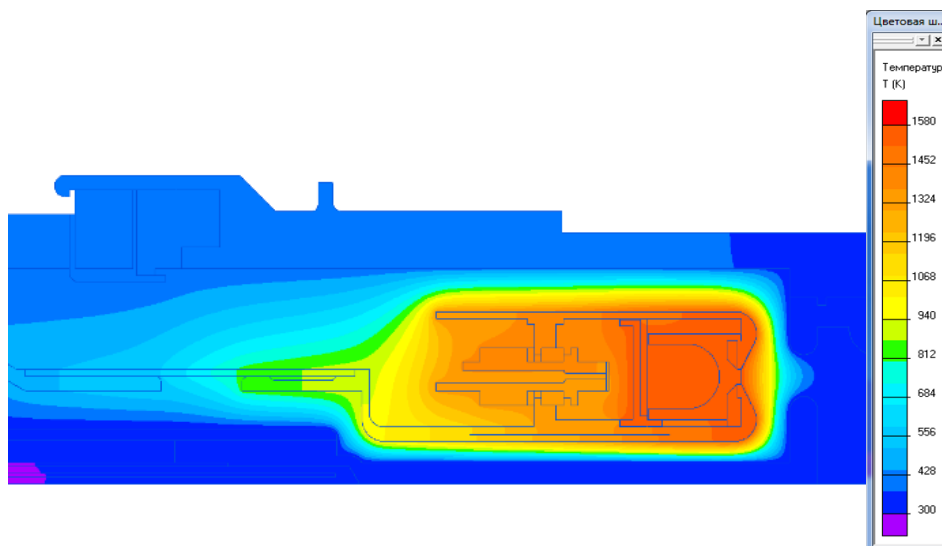


Рисунок 4. Распределение температуры в катодной области.

### 3. Заключение

Показано, что в технологических гиротронах применение неадиабатических электронно-оптических систем формирования ВЭП позволяет значительно уменьшить скоростной разброс в электронном пучке и за счет этого обеспечить формирование ВЭП с питч-фактором, близким к 2, что способствует значительному увеличению КПД и выходной мощности данного класса гиротронов. Предложена и оптимизирована модификация катодной части магнитной системы гиротрона, заключающаяся в установке между встречными катодными катушками Т-образной ферромагнитной вставки. Это радикально, более чем на порядок, снижает мощность питания катодных катушек, что позволяет обеспечить надежную долговременную работу гиротрона в непрерывном режиме. Анализ температурного поля на электродах в области формирования электронного потока и выделение наиболее термически напряжённых областей позволили выработать рекомендации по выбору конструкционных материалов.

Исследование выполнено за счет **гранта РФФИ (проект № 21-58-53051)**.

#### Список литературы

1. M.Thumm, State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers (Update 2013), KIT Scientific Reports, vol. 7662 (KIT Scientific Publishing), pp. 1-138, 2014.
2. Yu. V. Vykov, S. V. Egorov, A. G. Ereemeev, et al., J. Am. Ceram. Soc., 96, No. 11, 3518 (2015).
3. Глявин М.Ю., Гольденберг А.Л., Мануилов В.Н., Морозкин М.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011 Т. 54, № 8–9. С. 690.
4. Гольденберг А.Л., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Мануилов В.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005 Т. 48, № 10–11. С. 835.
5. 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.
6. Гольденберг А. Л., Глявин М. Ю., Лещева К. А. и др. Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 1. № 1. С. 215-217.
7. <http://www.elcut.ru>.
8. К.А.Лещева, В.Н. Мануилов. Численное 3d-моделирование систем формирования винтовых электронных пучков гироприборов с азимутально неоднородным распределением тока эмиссии. Успехи прикладной физики, 2019, т.7, №3, с.298-308.