

УДК 621.385.69.01

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНЫХ ГИРОТРОНОВ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

Н. А. Завольский, В. Е. Запезалов, А. Н. Куфтин, А. С. Постникова*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования мощных гиротронов с рекуперацией остаточной энергии «отработанного» электронного пучка. Приведены результаты расчётов гиротронов мегаваттного уровня мощности с рабочими частотами 110 и 170 ГГц. Обсуждается упрощённая методика расчётов гиротронов с рекуперацией при частичном отражении электронного пучка. Изложены методика и результаты экспериментального исследования гиротронов с рекуперацией и проведено их сопоставление с расчётными данными.

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы достигнуты значительные успехи в разработке мощных высокоэффективных гиротронов и решении их использованием различных прикладных задач [1–7]. В гиротронах миллиметрового диапазона длин волн часто используются коллекторы с рекуперацией остаточной энергии электронного пучка после его выхода из резонатора («отработанного» пучка). Использование рекуперации в гиротронах (применяется также термин «депресс-коллекторы»), предложенной ещё в работе [8], позволяет существенно повысить коэффициент полезного действия (КПД) гиротронных комплексов, снизить тепловую нагрузку на коллектор, упростить и удешевить системы питания и охлаждения [1–10]. Однако отбор остаточной энергии пучка тормозящим полем в области коллектора возможен до определённого предела, т. к. часть электронного потока начинает отражаться, что, начиная с некоторого уровня, приводит к снижению КПД и неустойчивой работе гиротрона. Таким образом, ограничиваются возможности наращивания эффективности гироприборов. В этой связи в данной работе приведены результаты исследования влияния отражения части электронного потока для нескольких вариантов гиротронов, в которых используются коллекторы с рекуперацией. С этой целью разработана простейшая расчётная методика учёта влияния отражённых электронов, не требующая значительных вычислительных ресурсов, что, в принципе, позволяет использовать её для оптимизации гироприборов. Численное моделирование и экспериментальные исследования проводились для гиротронов мегаваттного уровня мощности, главным образом с рабочей частотой 170 ГГц, а также с частотами 110 и 140 ГГц.

1. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИРОТРОНА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ОСТАТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Коэффициент полезного действия гиротрона с одноступенчатой рекуперацией определяется выражением [10–14]

$$\eta_1 = \eta_0 \frac{U_0}{U_0 - U_b}, \quad (1)$$

где η_0 — КПД взаимодействия электронов с высокочастотным (ВЧ) полем, U_0 — ускоряющее напряжение, U_b — тормозящее напряжение между коллектором и резонатором. Из формулы (1)

* zapev@appl.sci-nnov.ru

видно, что КПД с рекуперацией возрастает с увеличением напряжения U_b . Значение U_b ограничено появлением отражённых электронов, которые уменьшают КПД взаимодействия η_0 . Отражённые электроны появляются, когда энергия продольного движения $eW_z < eU_b$, где $e > 0$ — элементарный заряд, W_z — потенциал движения электрона вдоль оси z (сонаправленной исходному пучку). Влияние отражённых электронов учитывалось приближённо, в предположении, что ток отражённых электронов ΔI достаточно мал по сравнению с током исходного пучка I . В первом приближении выражение для η_0 можно записать в виде

$$\eta_0 = \eta_{00} + \Delta\eta_0. \quad (2)$$

Здесь η_{00} — КПД взаимодействия без учёта отражённых электронов. Для расчёта величины η_{00} использовались самосогласованные уравнения релятивистского гиротрона с нефиксированной продольной структурой ВЧ поля, т.е. укороченные уравнения, описывающие воздействие ВЧ на электронный пучок, и уравнения возбуждения рабочей моды сгруппированным электронным пучком [15].

На следующем этапе определялся энергетический спектр отработанного электронного пучка и ток отражённых электронов ΔI при заданном значении U_b . Отражённые электроны запираются в ловушке между катодом и тормозящей линзой. После нескольких пролётов через резонатор они забирают часть энергии ВЧ поля и ускоряются. Если средний прирост энергии электронов составляет $e\Delta W$, то выражение (2) можно записать в виде

$$\eta_0 = \eta_{00} - \frac{\Delta I}{I} \frac{\Delta W}{U_0}. \quad (3)$$

Расчёты показывают, что запертые электроны ускоряются до энергий, как правило не превышающих eU_0 . В среднем прирост энергии равен $e\Delta W \approx eU_0/2$. Это приблизительно соответствует максимуму функции распределения электронов по энергиям в отработанном пучке [10, 13]. В расчётах предполагается, что $\Delta W = kU_0$, где $0 < k < 1$. Были рассмотрены различные значения параметра k с целью исследования зависимости от него КПД и достижения наилучшего соответствия с экспериментальными данными. Выражения (1)–(3) определяют КПД приближённо. Для более точного решения поставленной задачи необходимо интегрировать самосогласованные уравнения гиротрона [15–17] с тремя потоками электронов — исходным, отражённым от коллектора и отражённым от катода [10]. Эта задача, как планируется, будет решена в дальнейшем.

2. РАСЧЁТЫ КПД ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ

На рис. 1 схематически приведены профиль $R(z)$ резонатора и выходного волноводного перехода гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц, уровнем мощности выходного излучения 1 МВт и рабочей модой $TE_{25,10}$, продольные распределения амплитуды f и фазы φ ВЧ поля, текущего КПД взаимодействия η_{00} и магнитного поля соленоида B_0 , нормированного на своё максимальное значение $B_{0\max}$. Профиль резонатора оптимизирован с целью достижения максимального КПД при допустимой удельной омической нагрузке резонатора $P_{ohm} \leq 2$ кВт/см². Длина участка интегрирования (z_s, z_f) определяет точность расчётной модели. Координата $z = 0$ соответствует концу регулярного участка резонатора и приблизительно максимуму магнитного поля криомагнита.

В идеализированной модели интегрирование прерывается сразу после резонатора, когда электроны выходят из синхронизма с полем резонатора, ВЧ поле превращается в бегущую волну и КПД перестаёт зависеть от z ($z_f = 30$ мм). В уточнённой модели учитывается послерезонаторное взаимодействие (After Cavity Interaction, ACI) отработанного электронного пучка с ВЧ

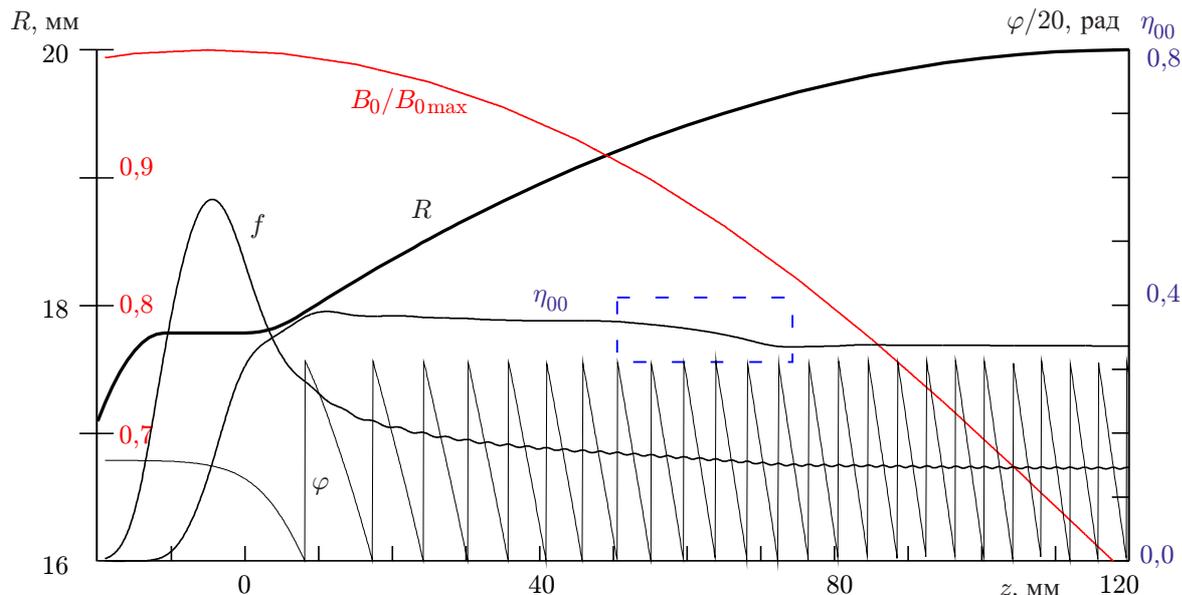


Рис. 1. Схематический профиль электродинамической системы гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц $R(z)$, продольные распределения магнитного поля соленоида $B_0(z)$, амплитуды $f(z)$ и фазы $\varphi(z)$ ВЧ поля и КПД взаимодействия $\eta_{00}(z)$

полем бегущей волны в выходном переходе (циклотронная реабсорбция) [18]. Послерезонаторное взаимодействие осуществляется на изолированном участке довольно далеко от резонатора ($z = 60 \div 75$ мм), когда магнитное поле спадает на 15÷20 % (см. рис. 1, участок спада КПД обведён рамкой). В этом случае уравнения интегрируются до координаты $z_f = 120$ мм, где магнитное поле уменьшается на 40 % и заведомо прекращается всякое заметное взаимодействие электронного пучка с ВЧ полем.

Таблица 1. Результаты расчётов для $U_0 = 80$ кВ, $I = 35$ А, $g = 1,3$, $\delta v_{\perp} = 0,3$

z_f , мм	η_{00} , %	P , МВт	P_{ohm} , кВт/см ²
30	37,9	1,06	2,03
120	33,6	0,94	2,03

В табл. 1 приведены результаты расчётов КПД, мощности излучения P и удельной омической нагрузки резонатора при реальных значениях питч-фактора g и разброса начальных скоростей электронов δv_{\perp} [19, 20]. Омическая нагрузка не должна превышать 2 кВт/см². Это ограничивает максимальный КПД гиротрона без рекуперации на уровне 34 %.

Здесь поперечный КПД $\eta_{\perp} \approx 55$ % в 1,5 раза меньше максимального значения $\eta_{\perp} \approx 80 \div 90$ % для расчётных моделей гиротронов с оптимизированным профилем резонатора [15, 21]. Послерезонаторное взаимодействие приводит к незначительному (на 10 %) снижению КПД и мощности выходного излучения. Однако оно существенно влияет на энергетический спектр электронного пучка и эффективность рекуперации.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ОТРАБОТАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

После выхода электронов из пространства взаимодействия ($z > z_f$) энергия электронов eW остаётся неизменной, вращательный импульс уменьшается в соответствии с адиабатическим инвариантом

$$p_{\perp} = p_{\perp}(z_f) [B_0(z)/B_0(z_f)]^{1/2}, \tag{4}$$

энергия продольного движения eW_z возрастает, приближаясь к полной энергии eW . Эффективность рекуперации зависит от расположения тормозящей электростатической линзы, образованной деталями гиротрона, потенциал которых равен потенциалу резонатора и коллектора. В расчётах использовалась идеализированная модель электростатической линзы: она считалась аксиально-симметричной и достаточно тонкой, что позволяло не учитывать изменение в ней магнитного поля. Входное сечение линзы расположено при $z = z^*$. Энергия продольного движения eW_z на входе в линзу определяется выражением

$$W_z[\text{кВ}] = 511 [(1 + p_\perp^2 + p_z^2)^{1/2} - (1 + p_\perp^2)^{1/2}], \quad (5)$$

где p_\perp и p_z — поперечный и продольный импульсы, нормированные на начальный импульс.

Из-за ограниченного числа частиц в расчётной модели электронного пучка функция распределения электронов по энергиям $F(W_z)$ — дифференциальный энергетический спектр — оказывается сильно изрезанной. На рис. 2 для примера приведена функция $F(W_z)$, вычисленная с шагом $dW_z = 0,2$ кВ ($z^* = 200$ мм). Здесь $N_v = 31$ — число групп с заданными скоростями, моделирующих разброс начальных скоростей электронов, $N_e = 67$ — число «частиц» в разбиении электронного пучка по фазам влёта $0 < \vartheta_0 < 2\pi$ в пространство взаимодействия. Функцию $F(W_z)$ необходимо усреднять, убирая высокочастотные мелкомасштабные осцилляции и сохраняя основные особенности.

В нашей работе усреднение проводилось следующим образом. Определялась интегральная функция энергетического спектра

$$F_1(W_z) = \int_0^W F(W_z) dW_z, \quad (6)$$

которая монотонно возрастает от 0 до 1. Усреднить $F_1(W_z)$ довольно легко, т. к. амплитуды осцилляций резко уменьшаются ($dF_1 \ll 1$). Усреднение проводилось аналогично тому, как это

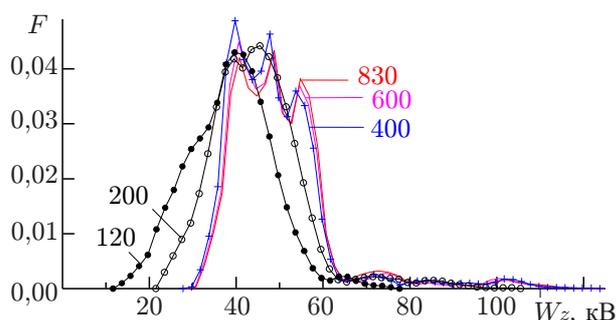


Рис. 3. Эволюция усреднённой функции распределения электронов по энергиям продольного движения в отработанном пучке при различных координатах точки наблюдения z^* (значения в миллиметрах приведены на графике) без учёта АСИ при $z_f = 30$ мм

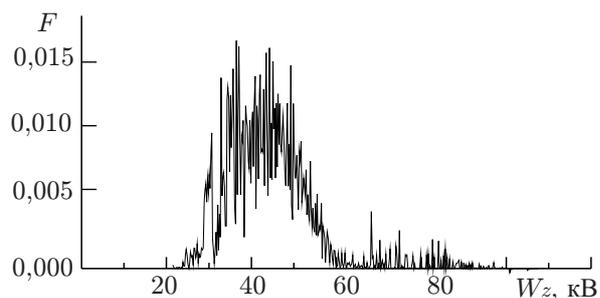


Рис. 2. Неусреднённая функция распределения электронов по энергиям продольного движения в отработанном пучке при $z_f = 30$ мм и $z^* = 200$ мм

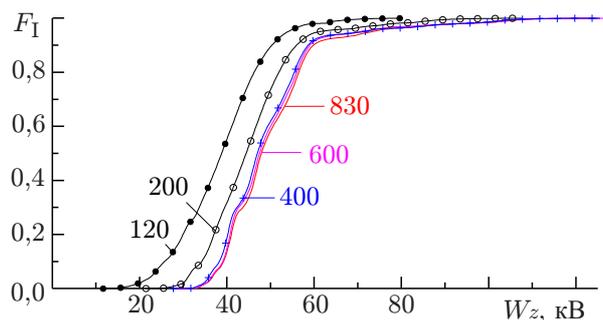


Рис. 4. Эволюция интегральной функции распределения электронов по энергиям продольного движения в отработанном пучке при различных координатах точки наблюдения z^* (значения в миллиметрах приведены на графике) без учёта АСИ при $z_f = 30$ мм

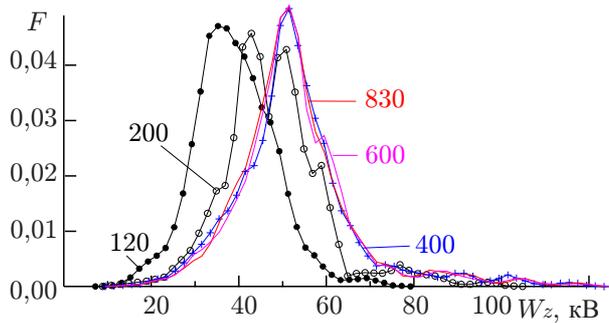


Рис. 5. Эволюция усреднённой функции распределения электронов по энергиям продольного движения в отработанном пучке при различных координатах точки наблюдения z^* (значения в миллиметрах приведены на графике) с учётом АСИ при $z_f = 120$ мм

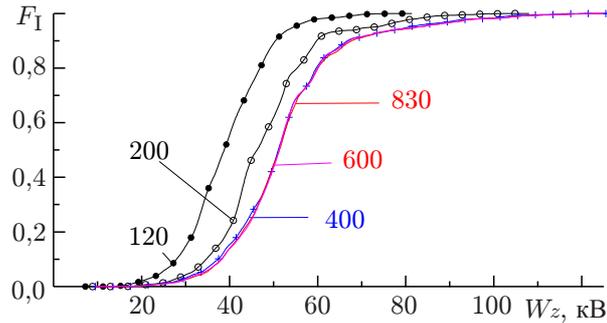


Рис. 6. Эволюция интегральной функции распределения электронов по энергиям продольного движения в отработанном пучке при различных координатах точки наблюдения z^* (значения в миллиметрах приведены на графике) с учётом АСИ при $z_f = 120$ мм

Таблица 2. Результаты расчётов для разного положения линзы

z^* , мм	$B_0/B_{0\max}$	$W _{z\min}$, кВ ($z_f = 30$ мм)	η_1 , % ($z_f = 30$ мм)	$W _{z\min}$, кВ ($z_f = 120$ мм)	η_1 , % ($z_f = 120$ мм)
120	0,590	11,6	44,4	7,02	37,00
200	0,250	21,5	51,8	8,80	37,80
400	0,040	27,7	58,0	9,45	38,10
600	0,012	28,5	58,9	9,50	38,15
830	0,005	28,8	59,2	9,53	38,20

делалось при обработке экспериментальных данных, например вольт-амперных характеристик электронных пушек гиротронов [20]. На графиках неусреднённая и усреднённая функции $F_1(W_z)$ практически совпадают. Функция $F(W_z)$ определялась путём дифференцирования усреднённой функции $F_1(W_z)$. На рис. 3 и 4 приведены усреднённые дифференциальные и интегральные функции распределения электронов по энергиям продольного движения при различных координатах тормозящей линзы z^* для идеализированной модели гиротрона, не учитывающей АСИ. Видно, что спектры резко обрываются со стороны малых энергий.

В реальной модели, учитывающей послерезонаторное взаимодействие АСИ, функции распределения электронов по энергиям продольного движения имеют длинные «хвосты» в сторону малых энергий (см. рис. 5 и 6). Это резко уменьшает эффективность рекуперации без отражения электронов от коллектора ($U_b = W_{z\min}$).

Минимальное значение W_z уменьшается с уменьшением z^* , что также снижает эффективность рекуперации. Темп спада КПД гиротрона с рекуперацией без отражения электронов с уменьшением координаты линзы z^* виден из табл. 2. Последнее значение $z^* = 830$ мм — координата точки оседания пучка на коллектор — соответствует случаю, когда изолирован только коллектор. Из рис. 3–6 и табл. 2 видно, что тормозящая линза должна находиться на таком расстоянии, когда магнитное поле криомагнита падает в 25 раз, т. е. в данном случае не менее 400 мм от резонатора. Таким образом, в реальных условиях становится практически необходимым допустить отражение некоторой части электронного пучка от коллектора и линзы.

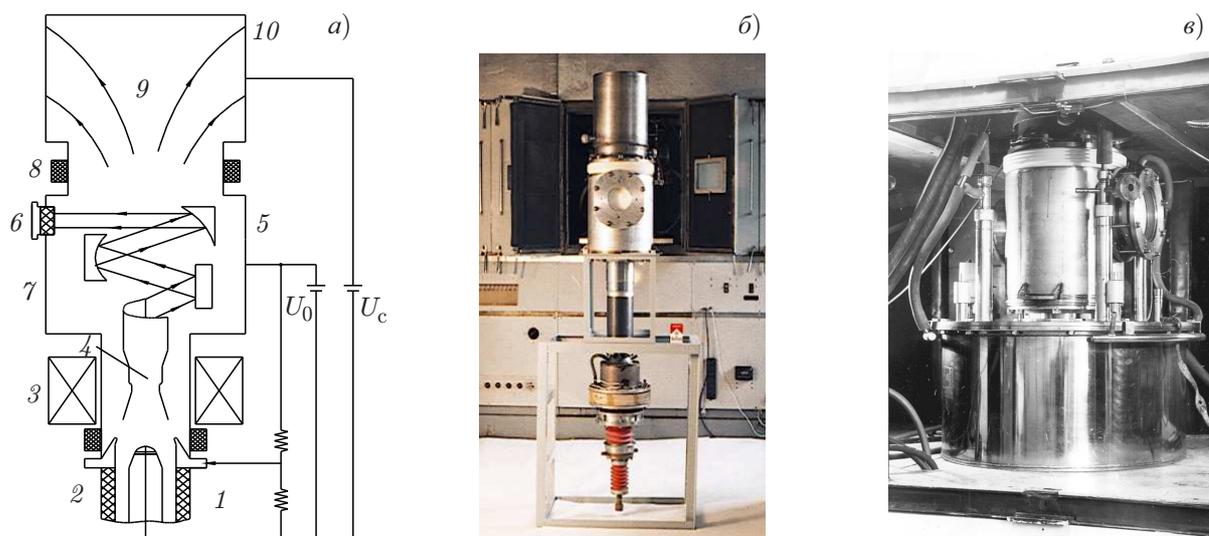


Рис. 7. Схема (а) и фотографии (б, в) лабораторного гиротрона с рекуперацией: 1 — катод, 2 — анод, 3 — соленоид, 4 — резонатор, 5 — квазиоптический преобразователь, 6 — окно, 7 — выходное излучение, 8 — изолятор, 9 — электронный пучок, 10 — коллектор

4. ЛАБОРАТОРНЫЙ МАКЕТ ГИРОТРОНА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования гиротрона проводились на лабораторном испытательном стенде ИПФ РАН. Для экспериментов использовался разборный лабораторный короткоимпульсный макет гиротрона с изолированным коллектором и встроенным квазиоптическим преобразователем. Схема экспериментального гиротрона с рекуперацией, его фото отдельно и в испытательном стенде показаны на рис. 7. Гиротрон работает в магнитном поле сверхпроводящего криомагнита. Винтовой электронный пучок формируется адиабатической магнетронно-инжекторной пушкой [5]. Ускоряющее напряжение подается на катод гиротрона. Электронная пушка имеет триодную конфигурацию с изолированным анодом. Изменение напряжения анод-катод позволяет варьировать пич-фактор [5]. Резонатором служит отрезок слабонерегулярного сверхразмерного цилиндрического волновода [4, 5]. Взаимодействие винтового электронного пучка с ВЧ полем резонатора осуществляется в условиях циклотронного резонанса на квазикритической частоте, что позволяет снизить негативное влияние разброса скоростей в этом пучке. Выходное излучение на сложной рабочей моде с помощью встроенного квазиоптического преобразователя трансформируется в волновой пучок и выводится через выходное окно.

Коллектор электронного пучка электрически изолирован от корпуса гиротрона с помощью высоковольтного изолятора, и на него может быть подано тормозящее напряжение. Экспериментальное исследование гиротрона проводилось по отработанной схеме с использованием методики и аппаратуры, описанной в статьях [11, 12].

Рабочая частота гиротронов 170 и 110 ГГц, ускоряющее напряжение 80 кВ (длительность импульса $\tau = 50$ мкс при частоте следования $f_0 = 5$ Гц). Для частот 110 и 170 ГГц использовались различные электронно-оптические и электродинамические системы, помещаемые в корпус лабораторного макета. Гиротроны работали в поле криомагнитов с проходным отверстием с диаметром 140 мм и максимальным полем до 5 и 7 Тл в гиротронах с рабочей частотой 110 и 170 ГГц соответственно. В описываемых экспериментах корпус гиротрона заземлен, а на коллектор подавался тормозящий потенциал.

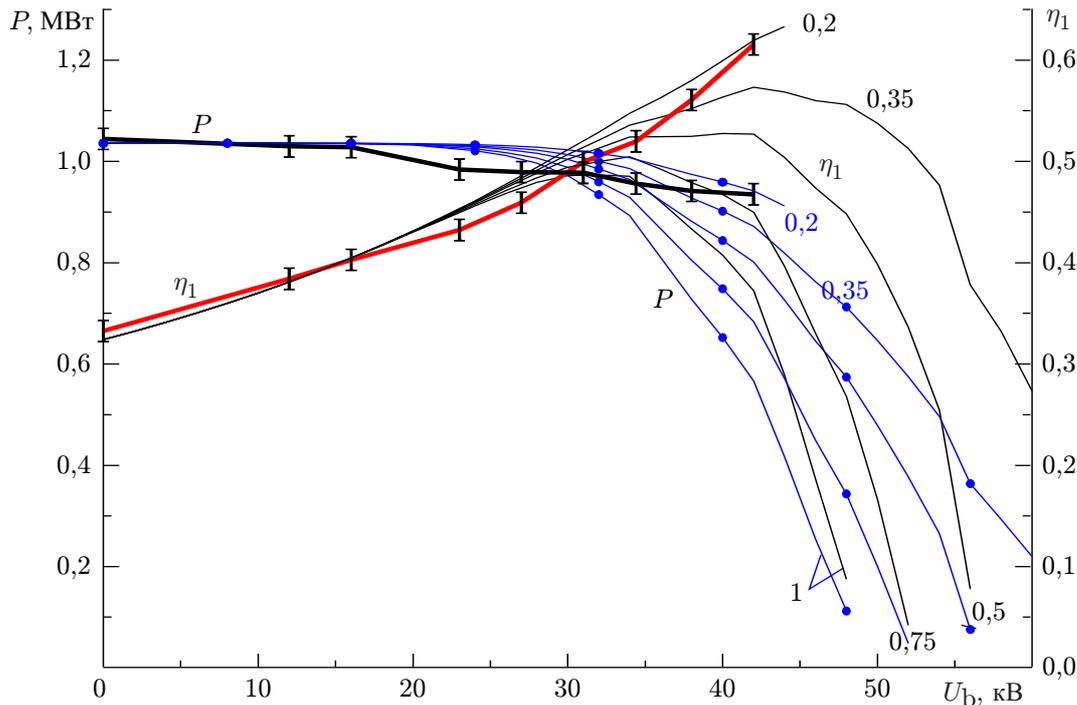


Рис. 8. Экспериментальные (со штрихами) и расчётные зависимости КПД и мощности выходного излучения (кривые с точками) гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц от тормозящего напряжения на коллекторе (мода TE_{25,10}; U₀ = 80 кВ; I = 40 А; g = 1,2; δv_⊥ = 0,3; z_f = 120 мм; z* = 830 мм); значения k приведены рядом с кривыми

5. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТРАЖЁННЫХ ОТ КОЛЛЕКТОРА ЭЛЕКТРОНОВ НА КПД ГИРОТРОНА

Ток отражённых от тормозящей линзы электронов определяется интегральной функцией распределения электронов по энергиям продольного движения (см. рис. 4 и 6)

$$\Delta I = I \int_0^{U_b} F_1(W_z) dW_z. \tag{7}$$

При оценках КПД гиротрона с рекуперацией (1)–(3) будем предполагать, что запертые электроны покидают ловушку, приобретая дополнительную энергию $e\Delta W = keU_0$, $0 < k < 1$.

На рис. 8 приведены расчётные зависимости КПД η_1 в случае с рекуперацией и мощности выходного излучения $P = \eta_0 I U_0$ для гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц от тормозящего напряжения U_b при различных значениях k. Рассматривалась реальная модель (z_f = 120 мм) с максимальной координатой тормозящей линзы z* = 830 мм. Результаты экспериментального исследования короткоимпульсного прототипа гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц и уровнем мощности выходного излучения 1 МВт [22–24] показаны сплошными кривыми с вертикальными штрихами. Размер этих штрихов указывает вероятную ошибку экспериментальных данных (доверительный интервал) 5 %. Наилучшее соответствие расчётных и экспериментальных данных в целом достигается при коэффициенте k = 0,20÷0,35. Это показывает, что отражённые электроны, пролетая через резонатор, приобретают дополнительную энергию $e\Delta W = (0,20\div 0,35) eU_0$.

На рис. 9 приведены аналогичные теоретические и экспериментальные зависимости для короткоимпульсного гиротрона с рабочей частотой 110 ГГц, уровнем мощности 1 МВт и рабочей

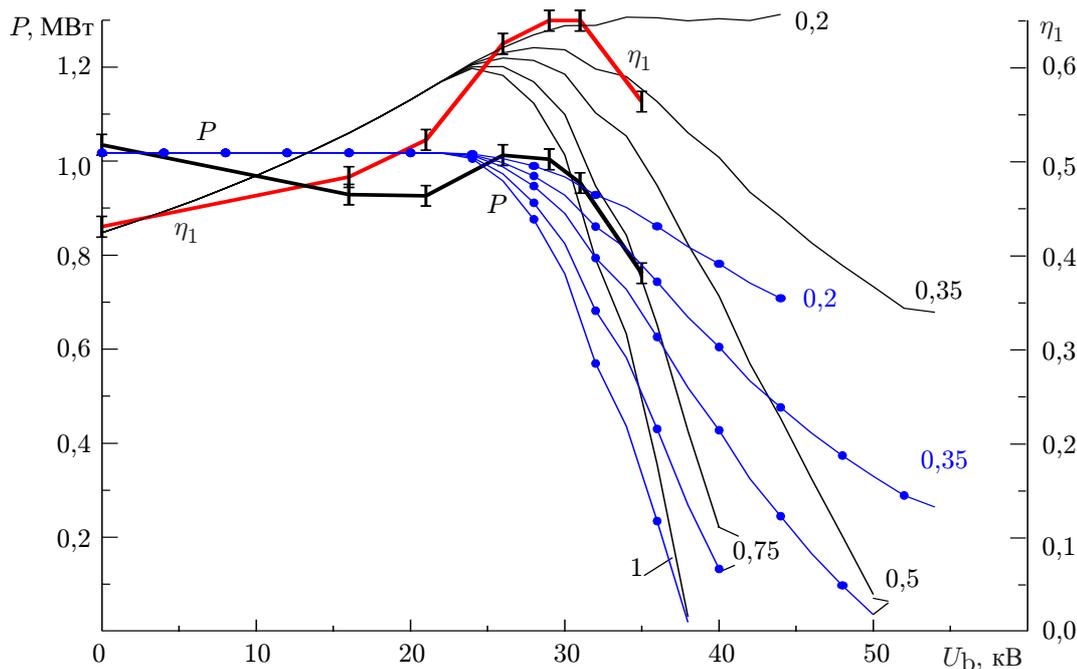


Рис. 9. Экспериментальные (со штрихами) и расчётные зависимости КПД и мощности выходной излучения (кривые с точками) гиротрона с рабочей частотой 110 ГГц от U_b (мода $TE_{19,5}$; $U_0 = 80$ кВ; $I = 30$ А; $g = 1,4$; $\delta v_{\perp} = 0,3$; $z_f = 120$ мм; $z^* = 830$ мм); значения k приведены рядом с кривыми

модой $TE_{19,5}$ [11, 12]. Они отличаются от рис. 8 большими (в 1,3 раза) значениями КПД в случае без рекуперации. Это объясняется меньшими омическими потерями в резонаторе и возможностью достижения большего питч-фактора на частоте 110 ГГц. Малые омические потери позволяют оптимизировать резонатор на максимум КПД при допустимой омической нагрузке 2 кВт/см². Поперечный КПД достигает значения $\eta_{\perp} = 75$ %, близкого к максимальным η_{\perp} идеализированных моделей гиротронов с оптимизированным профилем резонатора [15, 21]. Наилучшее соответствие расчётных и экспериментальных данных также достигается при коэффициенте $k = 0,20 \div 0,35$.

Максимум КПД в случае с рекуперацией на рис. 9 достигается при меньших значениях U_b (30 кВ), чем на рис. 8 (42 кВ), причём он явно выражен, в отличие от рис. 8, где ход кривой $\eta(U_b)$ напоминает обрыв. В эксперименте прекращение снятия зависимости $\eta(U_b)$ было связано с нарушением устойчивости электронного пучка, т. к. возникали шумы на полке импульса, не позволяющие определить мощность выходного излучения. Уменьшение напряжения $U_{b,opt}$ связано с «оптимальностью» резонатора в гиротроне с рабочей частотой 110 ГГц. При высоких значениях η_0 максимум энергетического спектра сдвигается в сторону малых W_z . Нескольким неожиданным представляется спад, а затем довольно резкий подъём мощности выходного излучения экспериментального гиротрона с рабочей частотой 110 ГГц с ростом напряжения U_b в интервале $0 < U_b < 25$ кВ. Спад мощности можно объяснить появлением длинного «хвоста» медленных электронов с малыми W_z в энергетическом спектре, аналогичного рис. 5. Однако подъём $P(U_b)$ не укладывается в рамки рассматриваемой модели: с ростом напряжения U_b мощность выходного излучения может только падать. В эксперименте это могло быть связано с эффектом отражения и многократного пролёта запертых электронов через резонатор с оптимизированным профилем. Из-за накопления пространственного заряда возрастает «провисание» потенциала пучка (при $U_b < W_{min}$ оно равно $\Delta U \approx 4,5$ кВ), что приводит к уменьшению продольной скорости v_z , увеличению питч-фактора g и, следовательно, КПД взаимодействия η_0 . В настоящее время трудно

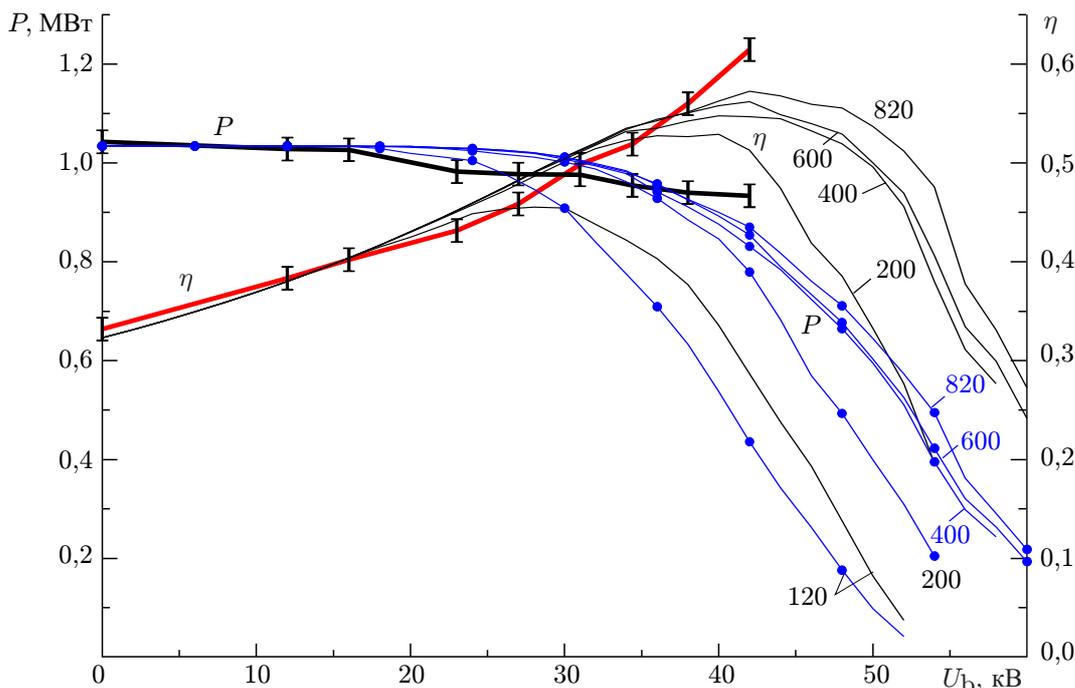


Рис. 10. Экспериментальные (со штрихами) и расчётные зависимости КПД и мощности выходной излучения от U_b при различных координатах тормозящей линзы z^* (значения z^* в миллиметрах приведены на графике) и при $k = 0,35$; остальные параметры те же, что для рис. 8

объяснить увеличение η_0 с ростом U_b , т.к. с ростом числа запертых электронов резко увеличивается разброс скоростей. Представляется, что эти эффекты лежат за рамками упрощённой модели.

Сравнение рис. 8 и 9 показывает, что поведение кривых на рис. 8 качественно соответствует участку на рис. 9 при $U_b < 22$ кВ. Представляется, что в экспериментальном гиротроне с рабочей частотой 170 ГГц могло бы быть достигнуто КПД выше 65 % (при $U_b = 47 \div 49$ кВ), как и в гиротроне с рабочей частотой 110 ГГц, если бы не имело место развитие неустойчивостей в электронном пучке, препятствующее увеличению напряжения U_b .

6. ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕРЕЗОНАТОРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОРМОЗЯЩЕЙ ЛИНЗЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУПЕРАЦИИ

Наилучшее соответствие упрощённой модели с экспериментальными данными, как отмечалось ранее, достигается при $k = 0,20 \div 0,35$. Дальнейшее исследование будем проводить, считая $k = 0,35$. Это ближе к результатам экспериментальных исследований, как видно из сравнения кривых $\eta_1(U_b)$ на рис. 8 и 9 в окрестности максимума КПД.

На рис. 10 приведены зависимости КПД гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц от тормозящего напряжения на коллекторе при $z_f = 120$ мм и различных расположениях тормозящей линзы относительно резонатора. Экспериментальные значения КПД на рис. 10 качественно хорошо соответствуют расчётным при максимальной координате тормозящей линзы $z^* \approx 830$ мм (т.е. расположенной в месте оседания электронов на коллектор). Это объясняется тем, что в экспериментальных прототипах гиротронов зеркала квазиоптического преобразователя находились под потенциалом резонатора, а изолированным был только коллектор.

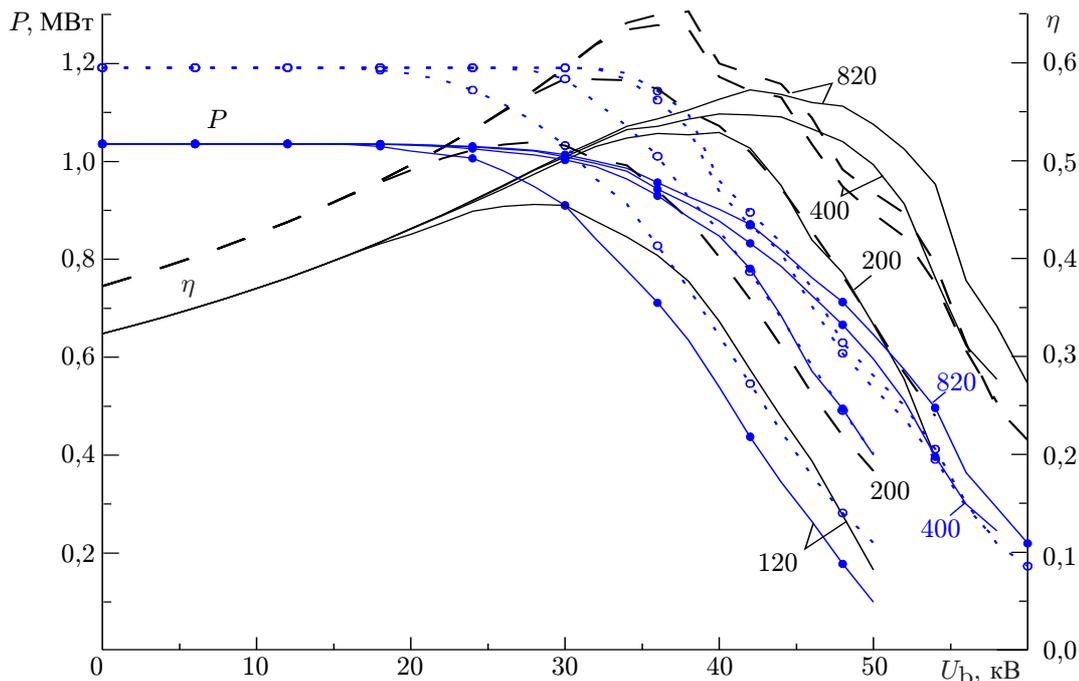


Рис. 11. Расчётные зависимости КПД и мощности выходной излучения от U_b при разных значениях z^* (величины z^* в миллиметрах приведены на графике) с учётом (сплошные кривые) и без учёта (штриховые и пунктирные кривые) АСИ (мода $TE_{25,10}$; рабочая частота 170 ГГц; $U_0 = 80$ кВ; $I = 40$ А; $g = 1,2$; $\delta v_{\perp} = 0,3$; $z_f = 30 \div 120$ мм; $k = 0,35$)

Влияние послерезонаторного взаимодействия на КПД гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц с рекуперацией при наличии отражения электронов остаётся существенным, но из-за малого числа электронов на «хвосте» функции $F(W_z)$ оно не превышает влияния на КПД взаимодействия η_{00} (см. рис. 10). На рис. 11 приведены зависимости КПД и мощности выходного излучения от напряжения U_b с учётом (сплошные кривые) и без учёта (штриховые и пунктирные кривые) послерезонаторного взаимодействия. Послерезонаторное взаимодействие приводит к относительным потерям КПД и мощности выходного излучения 13÷15 % при любых $U_b \leq U_{b,opt}$, и любых z^* . При $z^* = z_{opt}^*$ максимальный КПД снижается с 65 % до 57 %. При оптимальном U_b относительный спад КПД в случае с рекуперацией из-за послерезонаторного взаимодействия примерно такой же, как и в случае без рекуперации. Основную роль в снижении КПД играет расположение тормозящей линзы z^* .

Влияние послерезонаторного взаимодействия на КПД гиротрона с рабочей частотой 110 ГГц пренебрежимо мало. Это объясняется тем, что электродинамическая система экспериментального гиротрона с такой частотой имела большое отношение конечного радиуса выходного перехода к радиусу резонатора $R_{out}/R_{res} \approx 1,4$. При таком отношении влияние выходного перехода можно не учитывать [18]. Аналогичные исследования в меньшем объёме проводились и для гиротрона с рабочей частотой 140 ГГц на рабочей моде $TE_{22,8}$; их результаты в общих чертах близки к результатам для гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц.

7. ВЫВОДЫ

Результаты расчётов по упрощённой модели, приближённо учитывающей взаимодействие отражённых электронов с ВЧ полем, демонстрируют хорошее соответствие с результатами экспериментальных исследований. Окончательно ответить на вопрос о границах корректности упро-

щённой модели и величине максимального КПД с рекуперацией и отражением электронов при различных расположениях тормозящей линзы можно будет после разработки расчётной модели, более точно учитывающей реальное продольное распределение ВЧ поля и эффекты многократного пролёта отражённых электронов через резонатор и выходной волноводный переход.

Послерезонаторное взаимодействие отработанного электронного пучка с полем попутной волны в выходном волноводном переходе при малом отношении радиусов перехода и резонатора $R_{\text{out}}/R_{\text{res}} \approx 1,1$ существенно снижает КПД в случае с рекуперацией без отражения электронов. Тем не менее при допущении отражения части электронного пучка от коллектора влияние АСИ на КПД в случае с рекуперацией практически сравнивается с влиянием его на КПД без рекуперации. Для достижения максимума КПД необходимо отношение $R_{\text{out}}/R_{\text{res}} \approx 1,3 \div 1,4$.

Наибольшее влияние на эффективность гиротрона имеет расположение тормозящей электростатической линзы. Расстояние от резонатора до тормозящей линзы должно быть таким, чтобы магнитное поле криомагнита спадало в 25 раз и более (т.е. в данном случае это расстояние должно составлять не менее 400 мм от резонатора). Максимум КПД в случае с рекуперацией достигается, когда тормозящее напряжение подаётся только на коллектор.

Проведённые исследования показали, что гиротрон сохраняет возможность устойчивой работы до некоторого предельного уровня отражённого тока, определяемого формой «хвостов» функции распределения по энергиям в отработанном пучке. Это позволяет надеяться на повышение КПД в гиротронах большей мощности в непрерывном режиме путём управления формой этих «хвостов» или осаждения части отражённых электронов на дополнительный коллектор с другим потенциалом [10, 13, 25].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования показали, что гиротрон сохраняет возможность устойчивой работы до некоторого уровня предельного отражённого тока, определяемого формой «хвостов» функции распределения по энергиям в отработанном пучке. Можно констатировать хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных. Отметим, что экспериментально достигнутое значение выходного КПД гиротрона с рекуперацией более чем в 1,5 раза превышает исходный КПД гиротрона без рекуперации. Имеются возможности дальнейшего повышения КПД гиротронов с рекуперацией при наличии отражённых электронов. Разработанная упрощённая методика расчёта не требует больших вычислительных ресурсов и может быть использована для оперативной предварительной оптимизации гиротронов и других электронных приборов пролётного типа с рекуперацией.

Авторы глубоко признательны М. А. Моисееву и М. В. Юлпатовой за помощь в работе. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-30071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольденберг А. Л., Денисов Г. Г., Литвак А. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39, № 6. С. 635.
2. Nusinovich G. S., Thumm M., Petelin M. I. // J. Infrared Millimeter THz Waves. 2014. V. 35. P. 325.
3. Запезалов В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 559.
4. Nusinovich G. S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004. 335 p.

5. Tsimring Sh. E. Electron beams and microwave vacuum electronics. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2007. 512 p.
6. Zapevalov V. E. // Fusion Science and Technology. 2007. V. 52, No. 2. P. 340.
7. Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2014. 188 p.
8. Гапонов А. В., Гольденберг А. Л., Петелин М. И., Юлпатов В. К. Прибор для генерации электромагнитных колебаний в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн: А.С. 223931 (СССР). Заявл. 24.03.67, опубл. 25.03.76. 7 с.
9. Fix A. Sh., Flyagin V. A., Goldenberg A. L., et al. // Int. J. Electronics. 1984. V. 57, No. 6. P. 821.
10. Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A., et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73, No. 26. P. 3532.
11. Венедиктов Н. П., Глявин М. Ю., Запевалов В. Е., Куфтин А. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41, № 5. С. 670.
12. Glyavin M. Yu., Kuftin A. N., Venediktov N. P., Zapevalov V. E. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. Nov. 1997. V. 18, No. 11. P. 2129.
13. Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A., et al. // J. Plasma and Fusion Research. 1995. V. 71, No. 11. P. 1029.
14. Airila M. I., Dumbrajs O. // Physics of Plasmas. 2001. V. 8, No. 4. P. 1358.
15. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Моисеев М. А., Немировская Л. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 8. С. 675.
16. Bratman V. L., Ginzburg N. S., Nusinovich G. S., et al. // Int. J. Electronics. 1981. V. 51, No. 4. P. 541.
17. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Моисеев М. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 4. С. 345.
18. Запевалов В. Е., Моисеев М. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 7. С. 584.
19. Lygin V. K. // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1995. V. 16, No. 2. P. 363.
20. Венедиктов Н. П., Глявин М. Ю., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40, № 4. С. 505.
21. Кураев А. А., Ковалев И. С., Колосов С. В. Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ. Минск: Наука и техника, 1975. 296 с.
22. Zapevalov V. E., Denisov G. G., Flyagin V. A., et al. // Plasma Devices and Operations. 1998. V. 6. P. 111.
23. Zapevalov V. E., Denisov G. G., Flyagin V. A., et al. // Fusion Engineering and Design. 2000. V. 53, No. 1–4. P. 377.
24. Myasnikov V. E., Denisov G. G., Zapevalov V. E., et al. // 22 Int. Conf. on IR&MM Waves. Wintergreen, USA, 2–25 July 1997. P. 108.
25. Jiang Y., Teryaev V., Hirshfield J. L. // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. V. 62. P. 4265.

Поступила в редакцию 5 ноября 2019 г.; принята в печать 29 ноября 2019 г.

**NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION
OF HIGH-POWER RECUPERATION GYROTRONS**

N. A. Zaval'skiy, V. E. Zapevalov, A. N. Kuftin, and A. S. Postnikova

We present the results of numerical simulation and experimental investigation of high-power gyrotrons with recuperation of the residual energy of the “spent” electron beam, in particular, the results of calculating megawatt gyrotrons operated at frequencies of 110 and 170 GHz. A simplified method used to calculate recuperation gyrotrons in the case of partial reflection of the electron beam is discussed. The method and results of studying recuperation gyrotrons experimentally are described and compared with the calculation data.