

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

© 2023 г. С. Е. Андреев<sup>a,b</sup>, И. Л. Богданкевич<sup>a,\*</sup>, Н. Г. Гусейн-заде<sup>a</sup>, Д. К. Ульянов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup> Российский национальный исследовательский университет им. Н.И. Пирогова (РНИМУ), Москва, Россия

\*e-mail: ira.bogdankevich@mail.ru

Поступила в редакцию 01.07.2022 г.

После доработки 28.09.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Рассмотрены особенности экспериментальной работы плазменного релятивистского СВЧ-генератора (ПРГ) Sinus 550-80 при разных значениях концентрации плазмы. Рассмотрены два значения концентрации плазмы, при которых центральные частоты выходного СВЧ-излучения ПРГ были равны 5.1 ГГц и 11.5 ГГц. Численное моделирование демонстрирует снижение концентрации электронов плазмы в результате действия заряда релятивистского электронного пучка (РЭП) при черенковском взаимодействии и возникновение “ионного фона” в течение импульса ПРГ. При низких концентрациях плазмы это может приводить к изменению условий СВЧ-генерации – сопровождаться не только изменением широкополосного излучения на узкополосное, но и снижением мощности излучения. В то же время при больших значениях концентрации плазмы при генерации СВЧ-излучении на высоких частотах средняя амплитуда электрического поля волны практически не меняется в течение импульса РЭП, а излучение остается широкополосным. Анализ результатов экспериментов и численного моделирования подкреплен оценками линейной теории, доказывающей, что при более высоких значениях концентрации плазмы ПРГ работает более устойчиво.

**Ключевые слова:** релятивистский электронный пучок (РЭП), СВЧ-излучение, спектр излучения, плазменно-пучковое взаимодействие по черенковскому механизму

**DOI:** 10.31857/S0367292122600789, **EDN:** NPIBDC

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяется разработке и созданию мощных СВЧ-генераторов с широким диапазоном частот излучения, и одним из путей создания таких устройств является плазменная релятивистская СВЧ-электроника. В плазменных релятивистских СВЧ-генераторах электронное управление свойствами плазмы позволяет по заранее заданному закону менять частоту излучения и ширину спектра от импульса к импульсу в широких пределах. В 2008 году в ИОФ РАН на базе ускорителя Sinus 550-80 был создан первый импульсно-периодический плазменный релятивистский СВЧ-генератор (ПРГ Sinus 550-80) [1]. Основные параметры установки приведены в таблице 1. Особенностью ПРГ является возможность генерации, как одиночного импульса релятивистского электронного пучка (РЭП), так и работа в частотно-периодическом режиме (до 50 импульсов РЭП в секунду). Существуют два варианта экспериментальной установки: низкочастотная с полосой изменения средней

частоты 1.5–5 ГГц и высокочастотная – с полосой 5–20 ГГц [2–4]. На высокочастотном варианте ПРГ возможна СВЧ-генерация как узкополосного излучения (с шириной спектра ~30 МГц), так и сверхширокополосного СВЧ-излучения с многочисленными гармониками в спектре.

Подробности устройства и функционирования плазменного релятивистского СВЧ-генератора и конкретно ПРГ Sinus 550-80 подробно описаны в ряде оригинальных статей (см., например, [1–5]). Работа ПРГ основана на черенковском взаимодействии релятивистских электронов и медленной волны пространственно-ограниченной плазмы. Частота СВЧ-излучения ПРГ может перестраиваться в широких пределах, например, в интервале 5–20 ГГц при изменении концентрации плазмы от  $0.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Увеличение коэффициента связи РЭП с плазменной волной при его приближении к плазме, расширяет диапазон частот одновременно усиливаемых волн. Обратная связь в ПРГ обеспечивается за счет частичного отражения

Таблица 1. Параметры ПРГ

№	Радиус металлического волновода ( $R$ )	Средний радиус трубчатой плазмы ( $r_p$ )	Средний радиус трубчатого РЭП ( $r_b$ )	Длительность импульса РЭП	Ток РЭП	Энергия электронов РЭП	Индукция магнитного поля
1	1.8 см	1 см	0.6 см	80 нс	2 кА	500 кэВ	1 Тл

СВЧ-волны на границах области плазменно-пучкового взаимодействия. Изменение концентрации плазмы от импульса к импульсу позволяет менять частоты генерируемого СВЧ-излучения на две-три октавы в любой последовательности даже при достаточно большой частоте посылок импульсов.

На установке ПРГ SINUS 550-80 была проведена серия экспериментов по исследованию выходного излучения плазменного релятивистского СВЧ-генератора при параметрах, приведенных в табл. 1. Соотношение средних радиусов плазмы ( $r_p$ ) и РЭП ( $r_b$ ) определяет полосу усиления СВЧ-волн в рассматриваемой плазменно-пучковой системе в процессе черенковского взаимодействия. Длина плазменно-пучкового взаимодействия в этих экспериментах составляла величину 22 или 29 см.

При увеличении длины системы уменьшается шаг между соседними дискретными частотами резонатора ПРГ. Линейная модель ПРГ рассмотрена в [6]. Условия самовозбуждения плазменно-пучкового резонатора определяются инкрементом плазменно-пучковой системы и коэффициентом отражения по амплитуде на границе системы. Для расчета коэффициента отражения существует несколько методов (см., например, [7]). Инкремент в линейной модели ПРГ вычисляется по линейной модели усилителя [6]. Однако по линейной модели ПРГ частота выходного СВЧ-излучения ПРГ не меняется при изменении длины системы, и определяется только зависимостью инкремента от частоты для данной концентрации плазмы. В [8] показано, что при изменении длины плазменно-пучковой системы при одной и той же плотности плазмы сохраняется характер смены режимов – переход от широкополосного спектра СВЧ-излучения к узкополосному.

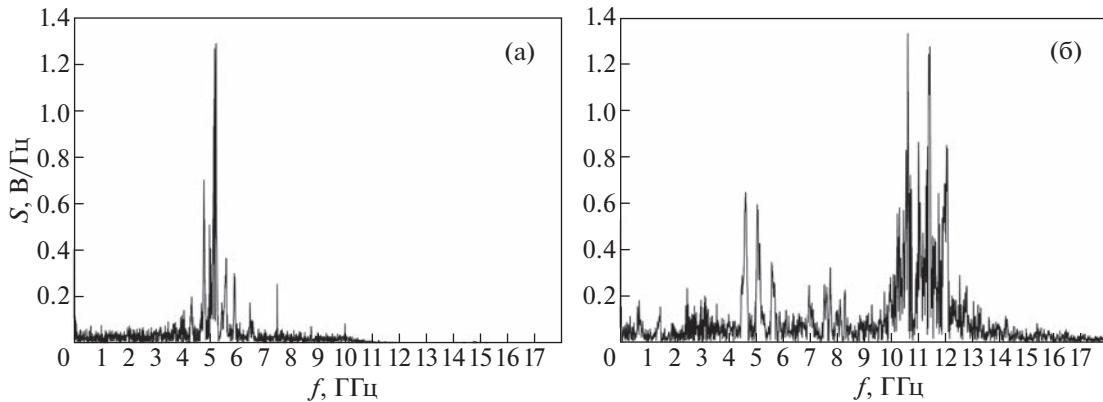
В работах [2–4] были рассмотрены экспериментальные данные ПРГ SINUS 550-80 в разных частотных диапазонах. При разных условиях эксперимента наблюдались, как эффекты укорочения импульса СВЧ-излучения, так и длительность СВЧ-импульса сравнимая с длительностью импульса РЭП, которая могла оставлять несколько сотен наносекунд. Моделирование в [4] демонстрировало увеличение концентрации плазмы в течение импульса РЭП, что характерно для не полной начальной ионизации фонового газа в

ПРГ и наличием дополнительной ионизации в течение одиночного импульса РЭП. С другой стороны при полной начальной ионизации газа в течение импульса РЭП существует механизм уменьшения концентрации плазмы, описанный в результате численного моделирования [9]. При инъекции отрицательно заряженного РЭП внутрь квазинейтральной плазменной трубки происходит выталкивание электронов из плазмы. Радиус трубчатой плазмы и ее толщина близки к значениям аналогичных параметров РЭП, поэтому при отсутствии ионизации через несколько десятков наносекунд после начала тока РЭП концентрация плазмы уменьшается приблизительно на величину концентрации электронов в РЭП. Работа [10] посвящена особенностям работы ПРГ SINUS 550-80 с полосой СВЧ-излучения до 6 ГГц, в которой анализ экспериментальных данных был дополнен результатами численного моделирования. Как и в [9] при численном моделировании процессов в ПРГ [10] проявлялась деградация радиального профиля плазменной трубки с образованием “ионного фона”. В экспериментах наблюдалась смена режима генерации как уменьшение СВЧ-мощности, так и переход от широкополосного спектра к узкополосному, и это хорошо согласовывалось с результатами численного моделирования. Однако при более высоких значениях концентраций плазмы и СВЧ-генерации в более высоком частотном диапазоне ПРГ ведет себя иначе [4].

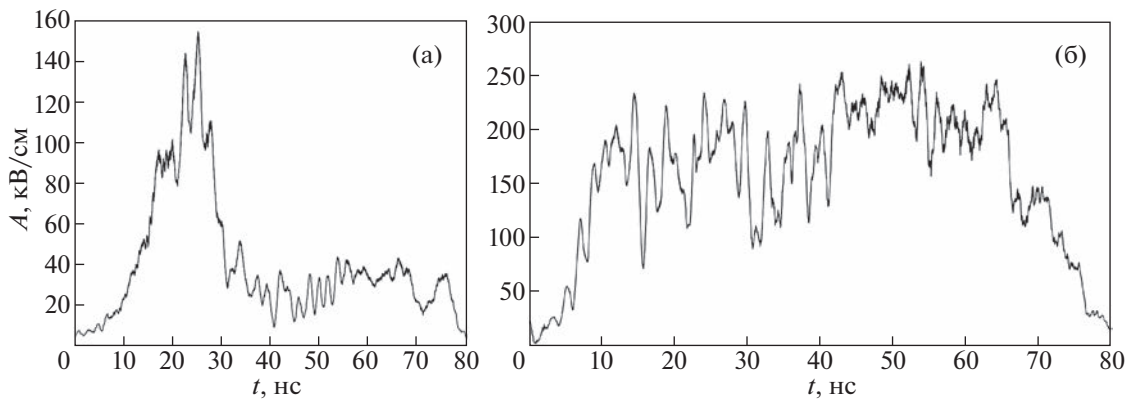
Цель данной работы состояла в исследовании режима работы плазменного релятивистского генератора (ПРГ) при изменении частоты генерируемого СВЧ-излучения от 5 до 12 ГГц.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Излучаемое рупорной антенной ПРГ СВЧ-излучение регистрировалось при помощи сверхширокополосной несимметричной вибраторной антенны, размеры которой были специально подобраны для исследуемого диапазона частот, и передавались на цифровой осциллограф (TDS-7404 или DPO-71604c) [12]. Как уже неоднократно подчеркивалось в работах по ПРГ, не существует надежного метода измерения концентрации плазмы в процессе плазменно-пучкового взаимодействия. Однако по экспериментальным



**Рис. 1.** Экспериментальные фурье-спектры выходного СВЧ-излучения ПРГ при разных значениях концентрации плазмы: а) – при концентрации плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , б) – при концентрации плазмы  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .



**Рис. 2.** Огибающие амплитуды электрического поля выходного СВЧ-излучения при разных значениях концентрации плазмы. Эксперимент: а) – при  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; б) – при  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

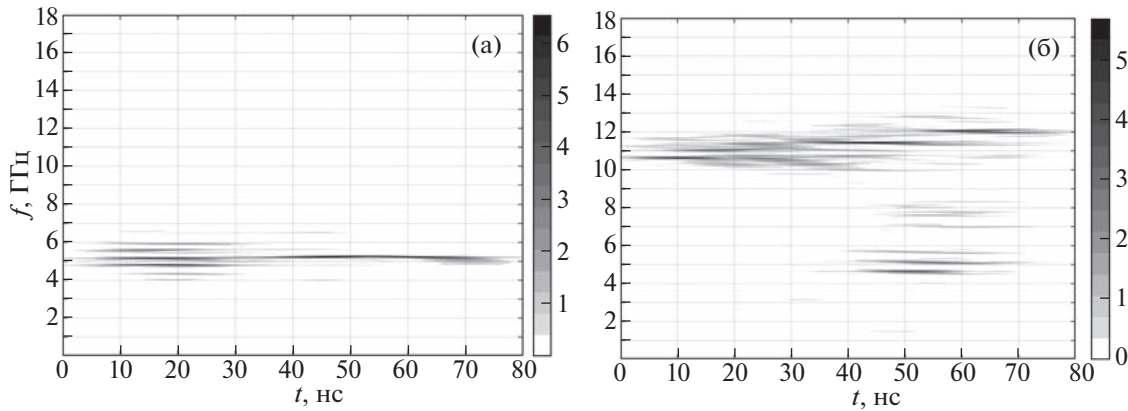
значениям максимальной спектральной плотности выходного СВЧ-излучения ПРГ можно сделать оценки концентрации плазмы по линейной теории [6]. Частотам 5.1 ГГц и 11.5 ГГц, соответствуют значения концентрации трубчатой плазмы  $1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

На рис. 1 представлены фурье-спектры временных рядов СВЧ-излучения ПРГ при разных значениях концентрации плазмы для параметров, приведенных в таблице 1 (а –  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , б –  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ).

На рис. 2 даны графики зависимостей огибающей амплитуды электрического поля от времени. Эти графики получены из экспериментальных выборок с использованием алгоритма скользящего среднего от модуля СВЧ-сигнала. Обработка данных выходного СВЧ-излучения ПРГ методом кратковременного фурье-преобразования со специальным окном по методу последовательной фильтрации [12] позволяет получить эволюцию спектра излучения в течение импульса РЭП. На

рис. 3 для тех же значений концентрации плазмы (а –  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , б –  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) представлены спектры с частотно-временным разрешением.

Как можно видеть на рисунках 2а и 3а при более низком значении концентрации плазмы во второй половине импульса наблюдается смена режима генерации СВЧ-излучения ПРГ (изменение широкополосного излучения на узкополосное). Из временной динамики спектра в течение импульса РЭП при низкой концентрации плазмы (рис. 3а) наиболее интенсивная частота около 5.2 ГГц сохраняется в течение всего импульса РЭП. Такая смена режима сопровождается и снижением мощности СВЧ-излучения, а в некоторых отдельных экспериментах срывом генерации (“укорочение СВЧ-импульса”), – эффектом, характерным для вакуумной СВЧ-электроники. Впервые временная эволюция экспериментальных спектров ПРГ была рассмотрена в [13]. В течение импульса РЭП наблюдались изменения частоты генерации и структур спектра выходного



**Рис. 3.** Эволюции СВЧ-спектров импульсов во времени при разных значениях концентрации плазмы. Эксперимент: а) – при концентрации плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; б) – при концентрации плазмы  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

излучения. Эти эффекты в [13], в основном, объясняются вариативностью энергии РЭП в течение импульса. Смена режима генерации СВЧ-излучения ПРГ в работах [8, 10] объяснялась снижением погонной концентрации плазмы при плазменно-пучковом взаимодействии в течение импульса РЭП.

При повышении концентрации плазмы (рис. 2б) амплитуда СВЧ-поля практически не меняется в течение импульса РЭП. На рис. 2б видно, что система ПРГ к 20-й наносекунде выходит на устойчивую СВЧ-генерацию, причем средняя амплитуда поля не уменьшается во второй половине импульса РЭП. В спектре на рис. 3 видна эволюция спектра СВЧ-излучения в течение импульса РЭП. При более высокой концентрации плазмы (рис. 3б) во второй половине импульса РЭП наряду с высокой частотой, излучающейся в первой половине импульса РЭП (около 11 ГГц), появляются полосы более низких частот вблизи частоты 5 ГГц.

Таким образом, при изменении концентрации плазмы в 2 раза длительность СВЧ-импульса практически совпадает с длительностью импульса РЭП (см. рис. 2б). Наблюдается качественная разница не только в энергетической характеристике СВЧ-излучения при разных значениях плотности плазмы, но и в режиме излучения в течение длительности импульса РЭП. Спектр СВЧ-излучения в течение импульса РЭП остается широкополосным в разных частотных диапазонах: поведение плазменно-пучковой системы в полосе излучения около 11–12 ГГц качественно отличается от поведения в диапазоне частот до 6 ГГц (см. рис. 1–3), и тем более в полосе 3–5 ГГц [8, 10].

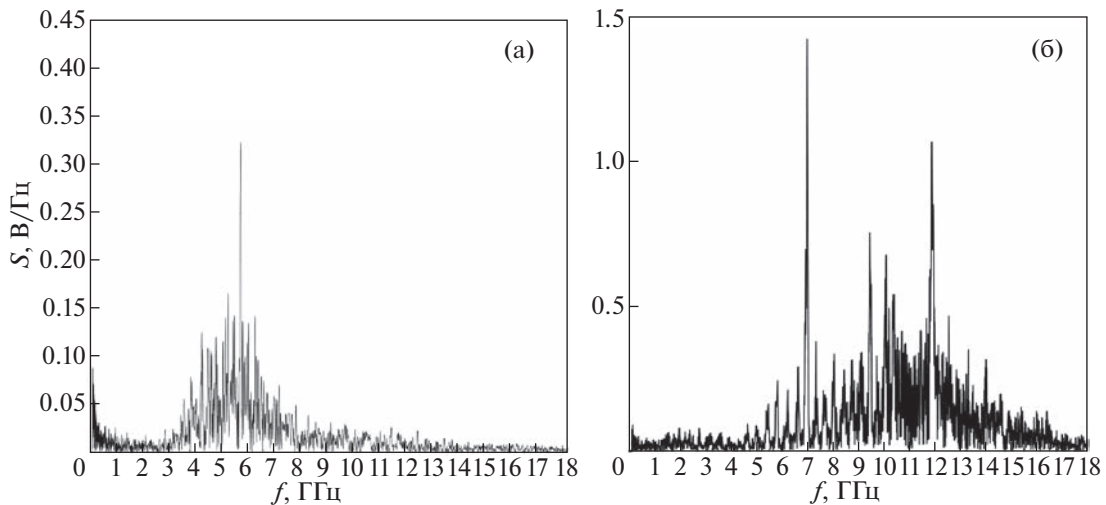
### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для анализа процессов, происходящих в ПРГ, было проведено численное моделирование с использованием электродинамического кода КАРАТ [14]. В численном эксперименте использовались параметры системы, представленные в табл. 1, а также те значения оценок концентрации плазмы, которые были получены по линейной теории при анализе экспериментальных данных (рис. 1) (т.е. значения концентрации плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ).

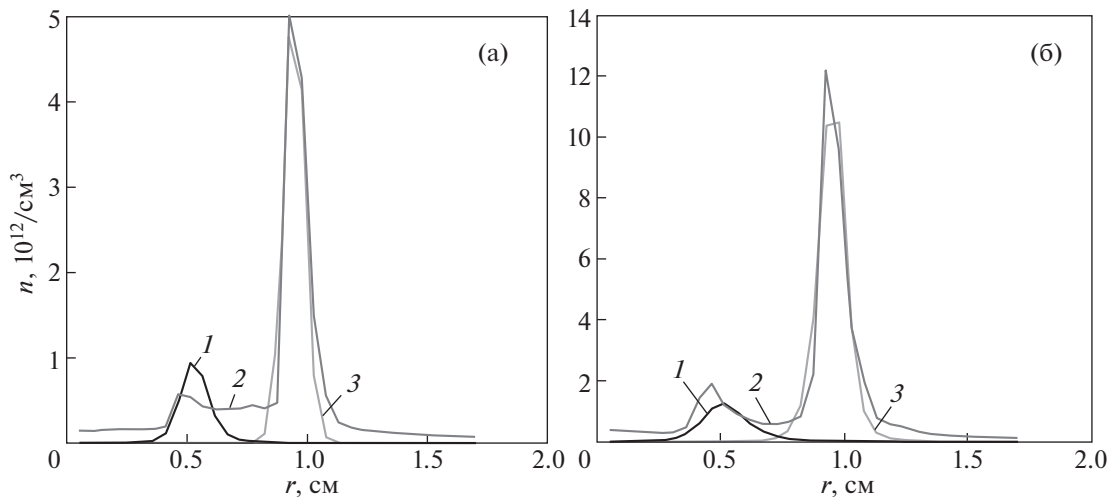
Из анализа фурье-спектров выходного излучения ПРГ, построенных по результатам численного моделирования (рис. 4), видно качественное соответствие результатов моделирования экспериментальным данным рис. 1.

В работах [8–10, 15] методами численного моделирования было показано, что в течение импульса РЭП под действием электромагнитного поля вдоль оси  $OZ$  электроны плазмы уходят из системы и частично оседают на коллекторе, в связи с этим в плазменном столбе появляется избыточное число тяжелых положительных ионов. Из-за нарушения квазинейтральности плазменного волновода, ионы, двигаясь в радиальном направлении, медленно заполняют все пространство металлического волновода – и возникает “ионный фон”. Как видно из рис. 5 возникновение “ионного фона” происходит для двух значений концентрации плазмы (а –  $1 \times 10^{13}$  и б –  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ).

Следует отметить, что распределение плотности частиц РЭП и плазмы по радиусу при первоначальной концентрации плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (рис. 5а) качественно соответствует распределению для концентрации плазмы  $0.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , представленной в [7]. На рис. 5а и рис. 5б дано распределение “ионного фона”, который созда-



**Рис. 4.** Фурье-спектры выходного СВЧ-излучения ПРГ при разных значениях концентрации плазмы: а) — при концентрации плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и б) — при концентрации плазмы  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  по данным численного моделирования.

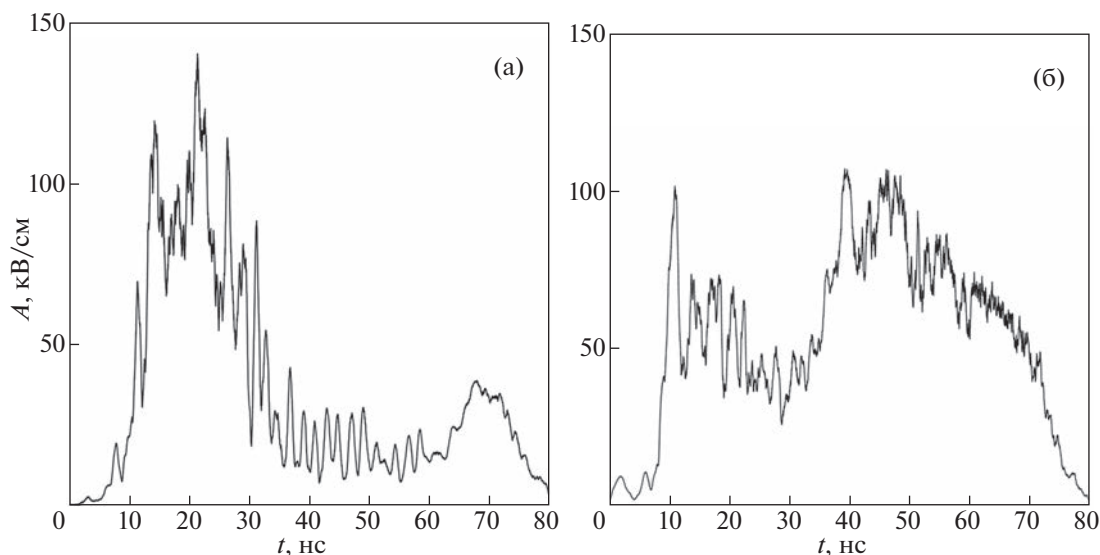


**Рис. 5.** Распределение плотности частиц РЭП и плазмы по радиусу при разных первоначальных концентрациях плазмы: а) при концентрации плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , б) при концентрации плазмы  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . 1 — электроны РЭП, 2 — ионы плазмы, 3 — электроны плазмы. Графики даны для момента времени 60 нс относительно фронта импульса РЭП.

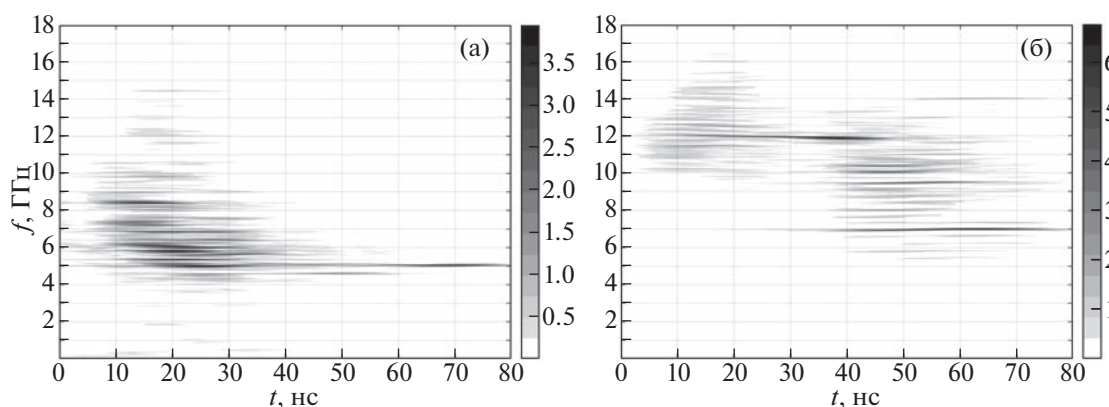
ется нескомпенсированными ионами плазмы, и его значение соизмеримо с количеством электронов РЭП. Положительный ионный фон изменяет условия транспортировки РЭП, что приводит к увеличению средней скорости электронов РЭП. В условиях черенковского взаимодействия плазмы и РЭП возникает пучковая неустойчивость [6]. Функция распределения энергии электронов (ФРЭ) РЭП может иметь отклонения от среднего невозмущенного уровня в зависимости от эффективности взаимодействия системы плазмы—РЭП. Изменение потенциала пространства при наличии ионного фона влияет на энергию каждого электрона в ансамбле РЭП. Сочетание черенков-

ского резонанса и ускоряющего потенциала ионного фона (в общем случае неоднородного) носит случайный характер при наличии большего числа частиц, участвующих в процессе. Поэтому ФРЭ может иметь, как черты общего сдвига в сторону более высоких энергий, так и сохранение низкоэнергетических электронов, как следствие неустойчивости пучка при черенковском резонансе. Функция распределения по энергии электронов РЭП меняет свою форму, — появляются хвосты распределения в области энергий выше энергии инжектируемых электронов РЭП [16].

На рис. 6 представлены графики изменения амплитуды поля СВЧ-излучения в течение им-



**Рис. 6.** Огибающая амплитуды электрического поля выходного СВЧ-излучения при разных значениях концентрации плазмы: а) — при концентрации плазмы  $1 \times 10^{13}$  и б) — при концентрации плазмы  $2 \times 10^{13}$  по данным численного моделирования.



**Рис. 7.** Спектры с частотным разрешением при разных значениях концентрации плазмы: а) — при концентрации плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и б) — при концентрации плазмы  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  по данным численного моделирования.

пульса РЭП по данным моделирования для двух значений концентрации плазмы, а рис. 7 дает представление об эволюции спектров СВЧ-излучения во времени. Из результатов моделирования (рис. 6а) видно, что при малой плотности плазмы наблюдается снижение амплитуды СВЧ-поля после 35-й наносекунды. На эволюции спектра, соответствующей низкой концентрации плазмы (рис. 7а) наблюдается смена режима генерации, — переход от широкополосного спектра к узкополосному. Это соответствует экспериментальным данным, приведенным на рис. 3а.

В [8–10] деградация трубчатой плазмы и возникновение “ионного фона” рассматривалась как возможная причина изменения режима гене-

рации в течение импульса РЭП. Однако при увеличении концентрации плазмы, как в эксперименте (рис. 2б), так и при моделировании (рис. 6б) не происходит изменение режима СВЧ-генерации ПРГ и соответственно значительного уменьшения амплитуды поля СВЧ-излучения вплоть до заднего фронта РЭП. На рис. 7 представлена эволюция спектров выходного СВЧ-излучения в течение импульса РЭП для рассматриваемых концентраций плазмы. В диапазоне частот 11–12 ГГц спектры выходного СВЧ-излучения, как в эксперименте (рис. 1б, 3б), так и в моделировании (рис. 4б, 7б) сверхширокополосные и эволюционируют в течение импульса РЭП. Как видно из этих рисунков здесь также нет

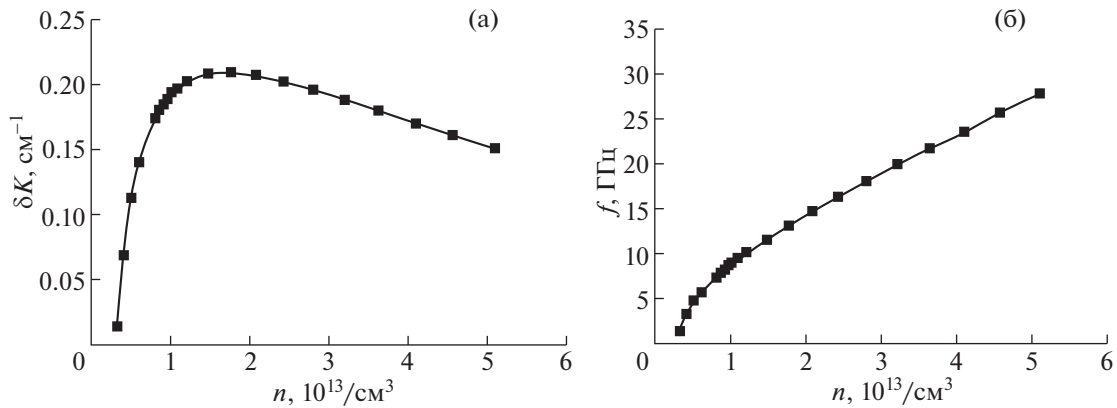


Рис. 8. Расчетные зависимости от концентрации плазмы (а) – основной частоты СВЧ-излучения; (б) – инкремента.

смены режима генерации таких как (рис. 3а и 7а), которые наблюдаются при низких концентрациях плазмы. Наличие “ионного фона” (см. рис. 5б) при концентрации  $2 \times 10^{13}$  не приводит к укорочению СВЧ-импульса по сравнению с длительностью импульса РЭП.

Это первая попытка получения численной модели в соответствии с экспериментальными данными в диапазоне частот выходного излучения до 12 ГГц. Следует отметить качественные основные закономерности: при увеличении первоначальной концентрации плазмы удлинение импульса СВЧ-излучения и широкополосные спектры из набора узкополосных составляющих наблюдаются как в эксперименте, так и в численном расчете.

#### 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ

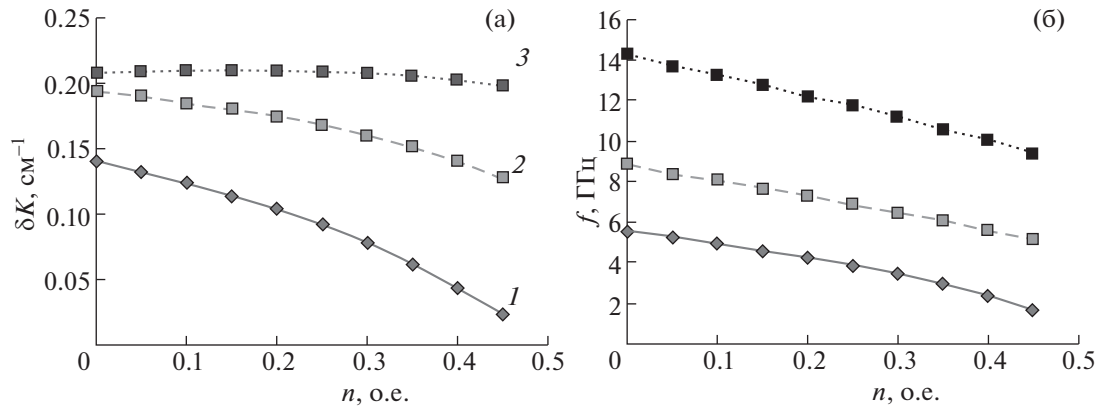
Для понимания особенностей работы ПРГ при разных концентрациях плазмы, приведенных на рис. 1–7 (центральные частоты 5.1 и 11.5 ГГц), обратимся к линейной модели описания процесса плазменно-пучкового взаимодействия [6]. Совместное решение дисперсионных уравнений для плазменной и пучковой подсистем позволяет построить для заданного значения концентрации плазмы зависимость инкремента от частоты. В качестве оценки можно взять значение концентрации, когда совпадают частота максимума инкремента и частота максимальной спектральной плотности в фурье-спектре выходного СВЧ-излучения как в экспериментах, так и в результате численного моделирования. Решения в рамках линейной модели были получены для параметров эксперимента (см. табл. 1).

На рис. 8 представлены зависимости максимального значения погонного коэффициента усиления (а) и частоты, на которой этот коэффи-

циент имел место (б), в зависимости от плотности плазмы.

Из расчетных зависимостей (рисунки 8), сделанных по линейной модели, видно, что концентрациям  $1.5\text{--}2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (интервал СВЧ-частот 12–15 ГГц) соответствуют значения максимального инкремента, в то время как концентрациям плазмы меньше  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  (интервал СВЧ-частот до 6 ГГц) соответствуют сравнительно низкие значения инкремента.

На рис. 9 представлены изменения параметров плазменно-пучкового взаимодействия (инкремент и основная частота), рассчитанные по линейной теории [6] в зависимости от снижения концентрации плазмы (в относительных единицах). Эти зависимости построены для трех начальных значений концентрации плазмы ( $0.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ). Для значений концентрации плазмы около  $0.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , характерных для экспериментов и для моделирования, рассмотренных в [8, 10], также наблюдается смена режима генерации СВЧ-излучения ПРГ как и на рис. 2а и 3а. Инкремент плазменно-пучкового взаимодействия при низкой начальной концентрации плазмы более чувствителен к уменьшению концентрации в течение импульса РЭП (рис. 9а), вплоть до нарушения условия СВЧ-генерации. Если для кривой 1 на рис. 9а продолжить уменьшение концентрации до 50% (до 0.5 о.е.), то дисперсионное уравнение не имеет решений, то есть автогенерация в системе невозможна [6]. Значение 45% потерь от первоначальной концентрации плазмы можно считать критической для данной начальной концентрации. Для кривых 2 и 3 (рис. 9) тот же процент потерь концентрации плазмы дает или не критическое снижение инкремента 2 или почти стабильную величину инкремента (см. рис. 9а). При повышении первоначального значения концентрации плазмы эти потери менее значимы с точки



**Рис. 9.** Изменения инкремента (а) и основной частоты СВЧ-излучения (б) от снижения концентрации плазмы для разных начальных плотностей плазмы. 1 – начальная концентрация плазмы  $0.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , 2 – начальная концентрация плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , 3 – начальная концентрация плазмы  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

зрения критического снижения величины инкремента. Для концентрации  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  инкремент практически не зависит от изменения концентрации в указанном диапазоне. Так как в ходе работы ПРГ в течение импульса РЭП происходит уменьшение концентрации плазмы плазменного волновода [8–10], то в случае с низкой концентрацией плазмы (до  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) это снижение может составлять до 40% от первоначального значения. При этом надо заметить, что в этом случае система ПРГ работает вблизи порога черенковской неустойчивости (см. рис. 8а), и поэтому могут происходить эффекты смены/срыва режима генерации ПРГ. При высоких значениях концентрации плазмы уменьшение первоначальной концентрации не приводит к каким-либо существенным изменениям условий генерации, так как максимальный инкремент плазменно-пучковой системы находится в зоне наибольших значений и мало меняется (рис. 8б).

В эксперименте (см. рис. 1, 2 и 3) мы наблюдаем большую длительность СВЧ-импульса и устойчивую СВЧ-генерацию в диапазоне частот около 12 ГГц и ниже. Как видно из линейной теории (рис. 8 и 9) при отклонениях концентрации плазмы вблизи значения  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  максимальное значение инкремента меняется слабо. Однако следует заметить, что при первоначальной высокой концентрации, даже при значительных потерях в течение импульса РЭП, условие СВЧ-генерации выполняется и для других диапазонов частот, что проявляется в фурье-спектре (рис. 2б) и динамическом спектре (рис. 3б) наличием полосы 10–15 ГГц (соответствует концентрации плазмы  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  по линейным оценкам) и полосы 4–8 ГГц (соответствует концентрации плазмы около  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ).

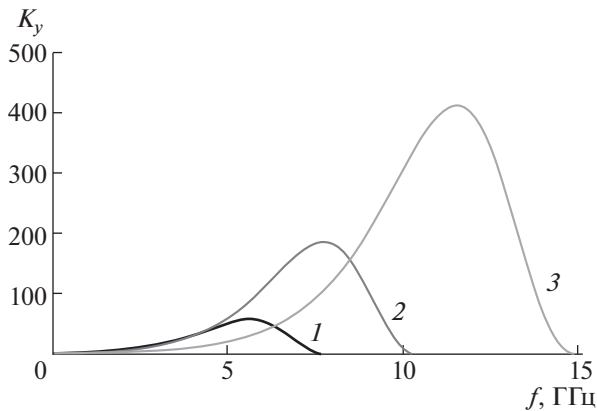
Для реальной конечной системы полный коэффициент усиления электромагнитной СВЧ-волны зависит от длины плазменно-пучкового взаимодействия.  $K_y = e^{\delta K L}$ , где  $\delta K$  – инкремент,  $L$  – длина плазменно-пучкового взаимодействия.

На рис. 10 приведены зависимости полного коэффициента усиления от частоты для 3 различных значений концентрации плазмы. Видно, что для низких частот коэффициент усиления мал при всех рассмотренных значениях концентрации плазмы, в то время как максимальные значения коэффициентов усиления четко разделены по частотному диапазону и сильно зависят от концентрации плазмы. Условие генерации –  $K_1 K_2 > 1$ , где  $K_1 K_2$  – коэффициенты отражения от поперечных границ системы ПРГ (соответственно левой и правой). Коэффициент отражения от левой границы обычно принимается равным единице. Определение коэффициента отражения от коллектора рассмотрено [7].

При повышении концентрации плазмы увеличивается ширина полосы усиления, в которой возможна генерация, что подтверждается результатами экспериментов (см. рис. 1б).

На конкуренцию усиливаемых частот СВЧ-генератора может влиять изменение коэффициентов отражения на торцах резонатора [15]. Как было показано в аналитических моделях коэффициент отражения от коллектора имеет разную дисперсионную зависимость при изменении концентрации плазмы. Учет дисперсии коэффициента отражения при начальной низкой концентрации плазмы сужает частотную полосу СВЧ-генерации, а при высоких начальных концентрациях плазмы условие СВЧ-генерации выполняется в достаточно широкой полосе частот [11, 14]. Этим явлением можно объяснить наличие широкого спектра СВЧ-излучения на рисун-





**Рис. 10.** Полный коэффициент усиления плазменно-пучковой системы РПГ для длины взаимодействия 29 см в зависимости от частоты генерируемого СВЧ-излучения. 1 — начальная концентрация плазмы  $0.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , 2 — начальная концентрация плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , 3 — начальная концентрация плазмы  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

ках 16, 46 и 36, 76 для высокой концентрации плазмы  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены особенности работы плазменного релятивистского СВЧ-генератора (ПРГ Sinus 550-80) при нескольких значениях начальной концентрации плазмы от  $0.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . В этих условиях значения центральной частоты выходного СВЧ-излучения ПРГ равны 5.1 ГГц и 11.5 ГГц. По линейной теории [9] этим частотам 5.1 ГГц и 11.5 ГГц, соответствуют значения концентрации плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Численное моделирование работы ПРГ, сделанное при данных значениях концентрации плазмы, демонстрирует качественное согласие с экспериментом характеристик выходного СВЧ-излучения: огибающая амплитуды электрического поля выходного СВЧ-излучения и спектры с частотно-временным разрешением, полученные в результате численного моделирования, практически совпадают с экспериментальными данными.

Из результатов проведенных экспериментов видно, что при значении концентрации плазмы  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при работе ПРГ в течение импульса РЭП происходит трансформация широкополосного излучения в начале импульса в узкополосное в конце импульса при некотором снижении мощности СВЧ-излучения. В [6, 7] в качестве возможной причины такого изменения режима СВЧ-генерации рассматривались снижение концентрации электронов плазмы и возникновение “ионного фона” в течение импульса РЭП.

Проведенное в данной работе численное моделирование показало, что снижение концентрации электронов плазмы и возникновение “ионного фона” в течение импульса ПРГ происходит при разных значениях начальной концентрации плазмы, как при  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , так и при  $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Однако результаты экспериментов и численного моделирования работы ПРГ показали, что при больших значениях начальной концентрации плазмы (при СВЧ-излучении ПРГ на высоких частотах) средняя амплитуда электрического поля выходного СВЧ-излучения практически не меняется в течение импульса РЭП, а генерируемое излучение остается широкополосным.

Были сделаны оценки зависимостей коэффициента усиления от плотности плазмы по линейной теории. Эти оценки показывают, что значениям концентрации плазмы  $1.5\text{--}2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (интервал СВЧ-частот ПРГ 12–15 ГГц) соответствуют наибольшие значения максимального инкремента плазменно-пучкового взаимодействия, в то время как значения концентрации плазмы меньше  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  [6–8] (интервал СВЧ-частот ПРГ до 6 ГГц) соответствуют сравнительно низкие значения инкремента. Из анализа следует, что:

1. При низких начальных значениях концентрации плазмы система плазменно-пучкового взаимодействия ПРГ работает вблизи порога черенковской неустойчивости. Уменьшение концентрации плазмы и уширение функции распределения энергии РЭП в результате влияния ионного фона приводит к резкому снижению инкремента вплоть до нарушения условия СВЧ-генерации.

2. При высоких начальных значениях концентрации плазмы для работы ПРГ уменьшение концентрации плазмы в процессе работы ПРГ менее значимо, т.е. при начальных значениях концентрации плазмы  $\geq 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  величина инкремента плазменно-пучкового взаимодействия мало зависит от изменения концентрации плазмы в течение импульса РЭП (рис. 9б) и не приводит к нарушениям условий СВЧ-генерации. Также по линейной теории при более высоких значениях концентрации плазмы в системе ПРГ увеличивается ширина полосы частот, в которой возможна генерация СВЧ-излучения при большом значении коэффициента усиления, что подтверждается результатами экспериментов. Однако линейная модель не учитывает нарушение моноэнергетичности электронов РЭП. Из результатов численного моделирования следует, что при более высоких значениях начальной концентрации плазмы уширение функции распределения энергии электронов в релятивистском пучке при наличии ионного фона слабо влияет на вероятность выхода из условия черенковского синхронизма.

Анализ экспериментальных данных о выходном излучении плазменного релятивистского СВЧ-генератора на базе ускорителя Sinus 550-80 показывает, что в широком диапазоне значений концентрации плазмы результаты численного моделирования, а также аналитические оценки, сделанные по линейной модели черенковского взаимодействия плазмы и РЭП, вполне объясняют такие явления как изменения СВЧ-спектра в течение импульса РЭП, снижение уровня СВЧ-излучения при низких плотностях плазмы и широкополосное СВЧ-излучение при высоких плотностях плазмы в течение всего импульса РЭП.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданкевич И.Л., Гришин Д.М., Гунин А.В., Иванов И.Е., Коровин С.Д., Лоза О.Т., Месяц Г.А., Павлов Д.А., Ростов В.В., Стрелков П.С., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 10. С. 926.
2. Лоза О.Т., Ульянов Д.К., Стрелков П.С. и др. // КСФ ФИАН. 2011. № 4. С. 47
3. Лоза О.Т., Ульянов Д.К., Баранов Р.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 3. С. 98
4. Ульянов Д.К., Лоза О.Т., Баранов Р.В., Ернылева С.Е., Богданкевич И.Л. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 10. С. 113
5. Ульянов Д.К., Андреев С.Е. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 26.
6. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника: Уч. пособ. Изд. 2-е, доп., М.: ЛЕНАНД, 2018.
7. Карташев И.Н., Красильников М.А., Кузелев М.В., Рухадзе А.А. // Прикладная физика. 2002. № 4. С. 66.
8. Bogdankevich I.L., Andreev S.E., Gusein-zade N.G., Ulyanov D.K. // J. of Russian Laser Research. 2019. V. 40. № 5.
9. Богданкевич И.Л., Лоза О.Т., Павлов Д.А. // КСФ-ФИАН. 2010. № 42. С. 16.
10. Andreev S.E., Bogdankevich I.L., Gusein-zade N.G., Ulyanov D.K. // Plasma Physics Reports. 2019. V. 45. V. 7. P. 674.
11. Andreev S.E., Alekseev I.S., Krymov R.R., Ulyanov D.K. // Physics of wave phenomena. 2017. V. 25. № 1. P. 60.
12. Андреев С.Е. // Системы и средства информатики. 2016. Т. 26. № 1. С. 30–44. <https://doi.org/10.14357/086965271601031>
13. Богданкевич И.Л., Иванов И.Е., Лоза О.Т., Рухадзе А.А., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Ульянов Д.К. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 748.
14. Tarakanov V.P. "User's Manual for Code KARAT – Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc. 1992. V.P. Tarakanov. "User's Manual for Code KARAT – Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc. 1992.
15. Карташов И.Н., Кузелев М.В., Стрелков П.С., Тараканов В.П. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 2. С. 250.
16. Андреев С.Е., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г. // Сб. тр. VI-й междунар. научно-практической конф. "Актуальные проблемы – РАДИОИНФОКОМ". М., 2022. С. 151.