

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 533.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СО СТОХАСТИЧЕСКИ ПРЫГАЮЩЕЙ ФАЗОЙ (МВИСПФ) В СВЕРХПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин, И.А. Загребельный, Н.М. Землянский, В.И. Карась, Я.Б. Файнберг, С.И. Солодовченко, А.Ф. Штань
*ННЦ "Харьковский физико-технический институт", г.Харьков, Украина,
karas@kipt.kharkov.ua*

Приведены результаты экспериментальных исследований прохождения в плазме различной плотности регулярных и стохастических электромагнитных волн. Мы рассмотрели распространение в ограниченной замагниченной плазме сверхкритической плотности как МВИСПФ, так и регулярных электромагнитных волн. Исследование зависимостей коэффициента прохождения отрезка плазменного волновода от типа излучения показало, что возбуждение и прохождение монохроматического поля существенно ослаблено, прохождение же излучения со стохастически прыгающей фазой сильно зависит от плотности плазмы. Результаты экспериментальных исследований находятся в удовлетворительном согласии с выводами теоретических исследований.

1. ВВЕДЕНИЕ

В [1] впервые было обращено внимание на особенности распространения в плазме электромагнитного излучения с конечным временем корреляции, в частности на возможность эффективного бесстолкновительного нагрева электронов в таких условиях, в [2] теоретически исследовано проникновение в плазму сверхкритической плотности регулярного и стохастического микроволнового излучения. Показано, что при нормальном падении волны на плазменный слой продольные поля в плазме малы (на 2 – 4 порядка меньше поперечных полей); продольная энергия электронов (и их температура) за время расчета ($5000/\omega_p$) изменяется менее чем на 1%. Функция распределения электронов близка к максвелловской, однако малая доля ($\sim 10^{-4}$) частиц ускользает от границы плазмы в обе стороны. Монохроматическое поле полностью отражается (за исключением фронта), стохастическое поле слабо отражается, что связано в основном с прохождением в плазму импульсов при срыве фазы волны. Коэффициент прохождения для случая, когда поле имеет тот же набор час-тот и плотность энергии, что и стохастическое, меньше на порядок и обусловлен тем, что в этом случае плазменный слой просто работает как фильтр, пропуская волны с частотой выше электронной лэнгмюровской, т. е. $\omega > \omega_p$ и отражая остальные. Для наклонного падения электромагнитного поля показано, что продольные поля близки по величине к поперечным полям. Продольная энергия электронов (и их температура) вырастает в несколько раз. Функция распределения электронов имеет немаксвелловский характер, есть ускоренные электронные хвосты. Падающее поперечное поле частично преобразуется в продольное, частично – в энергию электронов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования прохождения стохастического электромагнитного излучения, генерируемого широкополосным генератором [3], через плазму проводились на установке [4], блок схема которой представлена на рис. 1. Плазма в резонаторе (2) создавалась с помощью магнетронного генератора (1) типа М 571 с регулируемой выходной мощностью $W \leq 2.5$ кВт, работающего на частоте $f = 2,475$ ГГц. Резонатор (2) имеет длину 50 см и диаметр 50 см. Откачка и напуск рабочего газа (дейтерий) осуществлялась через патрубки (3) и (4). Магнитное поле пробочной конфигурации (распределение магнитного поля показано на рис. 1) создавалось катушками (5), расположенными в торцах резонатора (2). Сигнал от генератора регулярных колебаний типа Г4-76 (6) или широкополосного генератора микроволнового излучения со стохастически прыгающей фазой (7) через коаксиальный тройник (8) и ферритовый вентиль (9) типа Э6-32, включенный в прямом направлении, подавался через коаксиальную линию (10) на излучающий зонд (11), расположенный на оси установки. Сигнал, прошедший через резонатор (2), заполненный плазмой, принимался зондом (12) и через ферритовый вентиль (13) типа Э6-32, включенный в обратном направлении, подавался через коаксиальный тройник (14) на анализатор спектра (15) типа С4-60 или осциллограф (16) типа С7-19. Ферритовые вентиля (9) и (13) включены в прямом и обратном направлениях и предназначены для экранирования от излучения, создаваемого магнетроном (1). Излучающий и принимающий зонды, представляющие собой концы центральных жил кабеля РК-2 длиной $l = 100$ мм и диаметром $d = 1$ мм, экранированы от непосредственного контакта с плазмой с помощью керамических трубок, имеющих наружный диаметр 4мм. В

экспериментах положение излучающего зонда не изменялось, его край на 45 мм был удален от торца резонатора. Резонатор представлял собой цилиндрическую камеру, изготовленную из нержавеющей

стали диаметром $D=50$ см и длиной $L=50$ см, с обоих концов имеющую запредельные для исследуемого диапазона электромагнитных волн резонаторы.

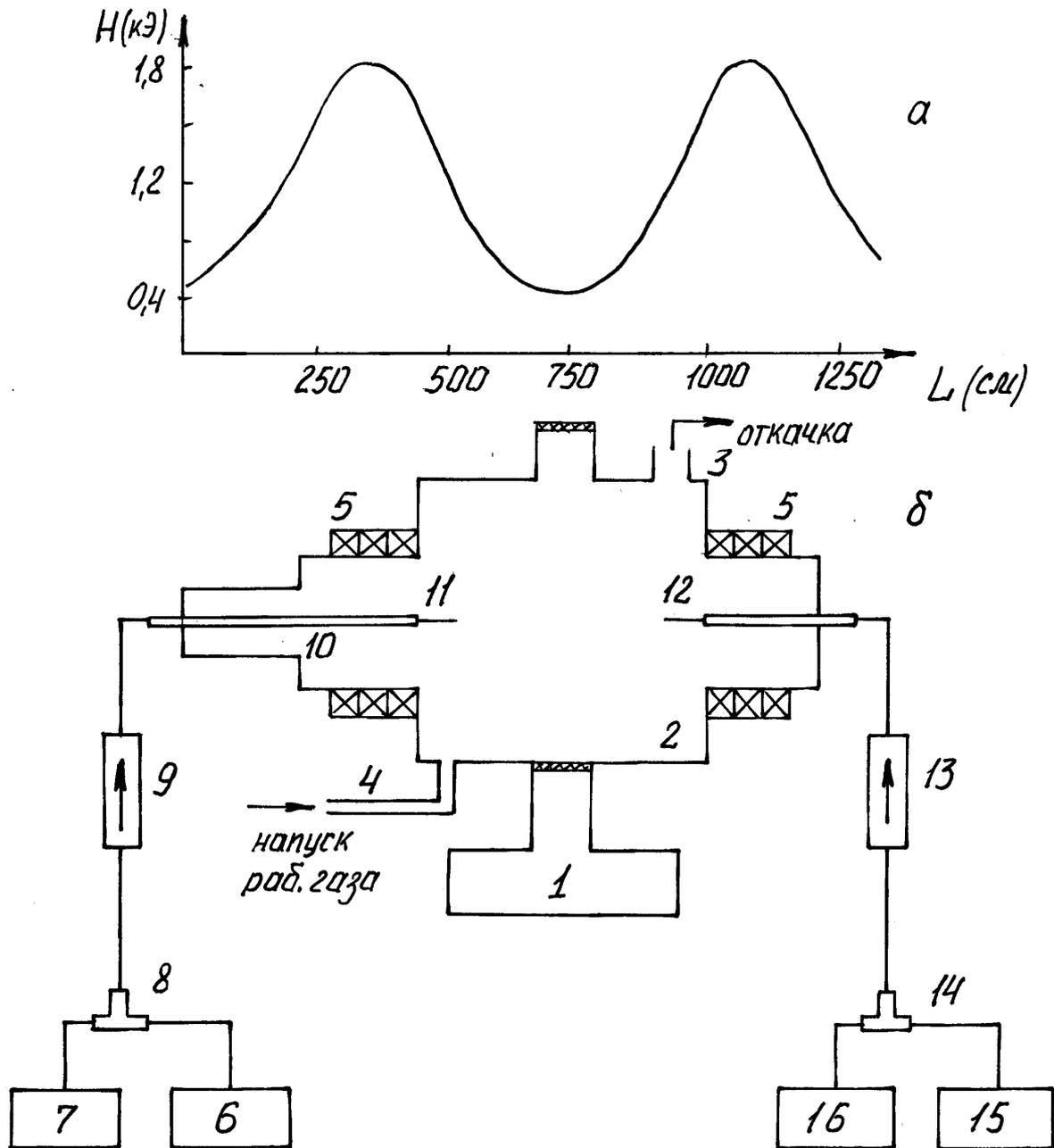


Рис. 1. Распределение напряженности магнитного поля вдоль установки (а) и блок схема измерений основных параметров (б)

Плазма в резонаторе создавалась с помощью магнетрона и в зависимости от его мощности могла изменяться в пределах $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$ (зависимость плотности плазмы от тока в магнетроне при давлении рабочего газа $P = 5 \cdot 10^{-5} \text{ мм.рт.ст.}$ показана на рис. 2). Исследовалась также зависимость плотности плазмы от давления рабочего газа, но она оказалась существенно менее слабой, поэтому мы изменяли плотность плазмы в резонаторе при постоянном давлении рабочего газа только за счет изменения тока в магнетроне. Сигналы с генератора Г4-76А или генератора стохастического излучения (представлены на

рис. 4 – 8) подавались через жестко установленный излучающий зонд (11) в резонатор, прошедший же через резонатор сигнал снимался зондом (12), который устанавливался поочередно в 4 фиксированные положения в резонаторе, и передавался на анализатор спектра. Так как в отрезке плазменного волновода имеется небольшое число собственных волн, частоты которых не превышают 1 ГГц, то для их идентификации целесообразно было использовать именно эти положения, так как они соответствуют экстремальным значениям или нулям амплитуды соответствующих волн.

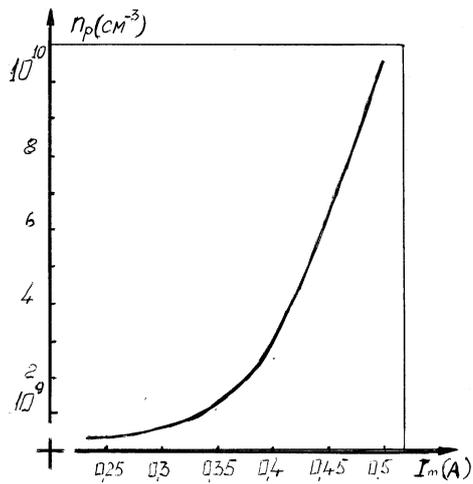


Рис.2. Зависимость плотности плазмы от тока в магнетроне

Для иллюстрации мы приводим характерную экспериментальную осциллограмму реализации стохастического сигнала.

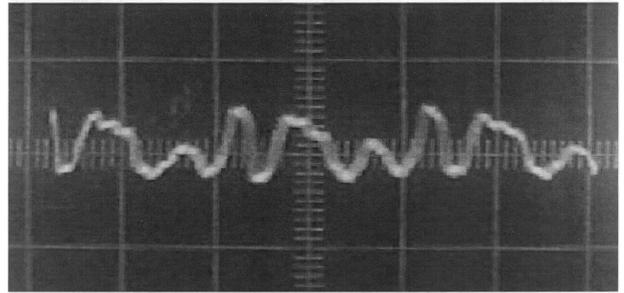


Рис. 3. Некоторая экспериментальная реализация микроволнового излучения со стохастически прыгающей фазой

Из рис.3 видно, что стохастические прыжки фазы сигнала происходят очень часто (через 3 – 5 периодов).

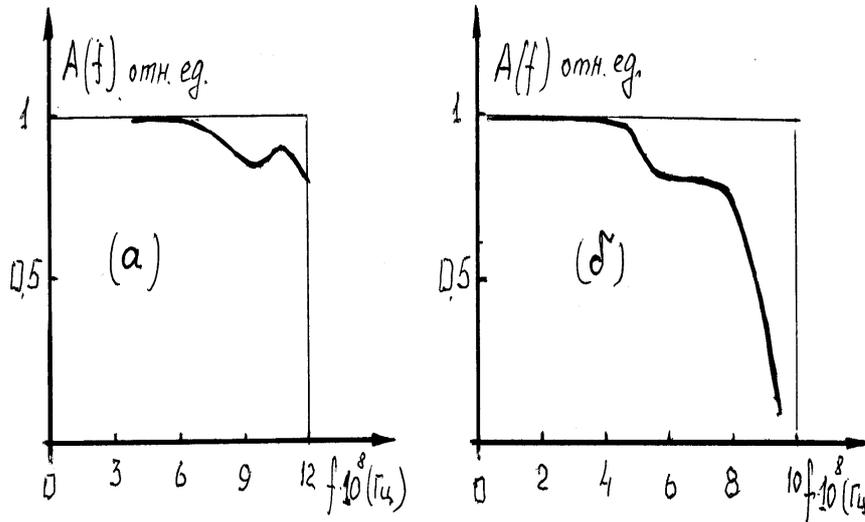


Рис.4. Амплитудно-частотные характеристики сигналов с генератора Г4-76А (а) и генератора стохастического излучения (б)

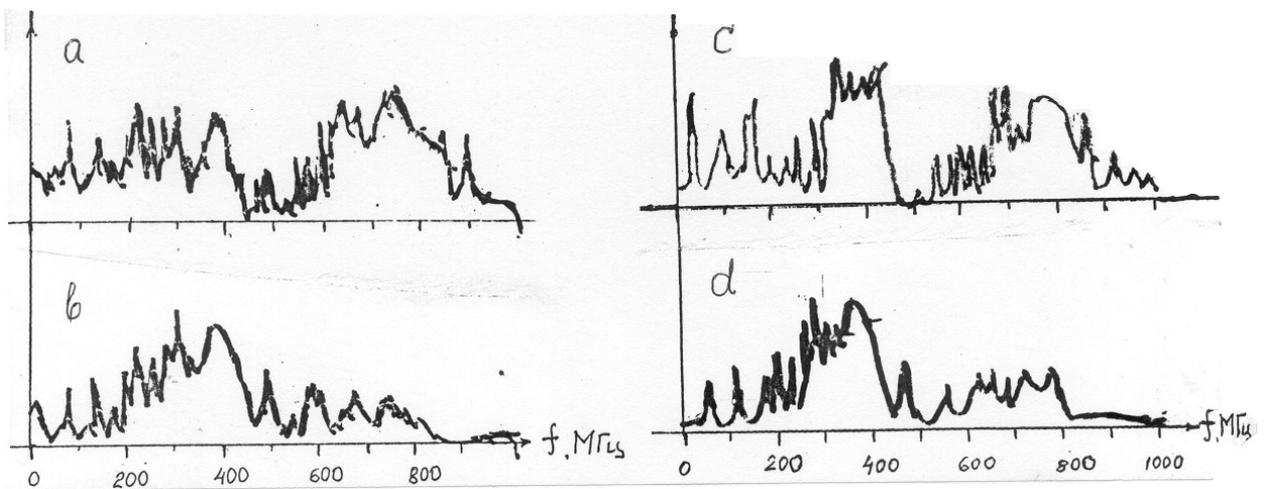


Рис. 5. Зависимость амплитуды стохастического сигнала, прошедшего через плазму плотности $n_p \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$ при расстоянии между зондами 140 мм (а) и при расстоянии между зондами 335 мм (с), а также $n_p \approx 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ при расстоянии между зондами 140 мм (б) и при расстоянии между зондами 335 мм (д) от частоты сигнала

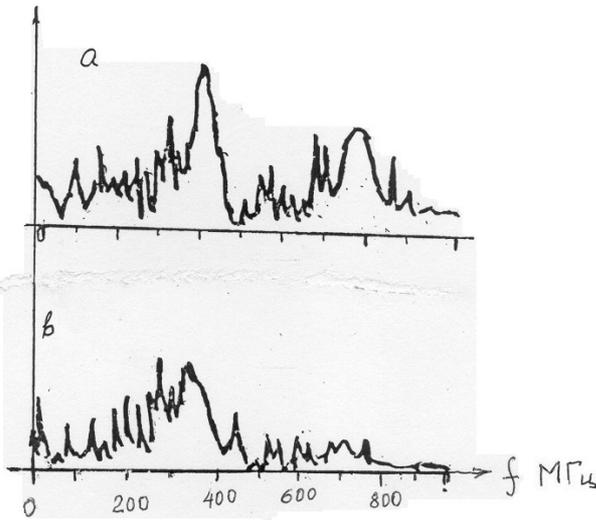


Рис. 6. Зависимость амплитуды стохастического сигнала, прошедшего через плазму плотности $n_p \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$ (а) и $n_p \approx 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ (б) от частоты сигнала при расстоянии между возбуждающим и принимающим зондами 270 мм

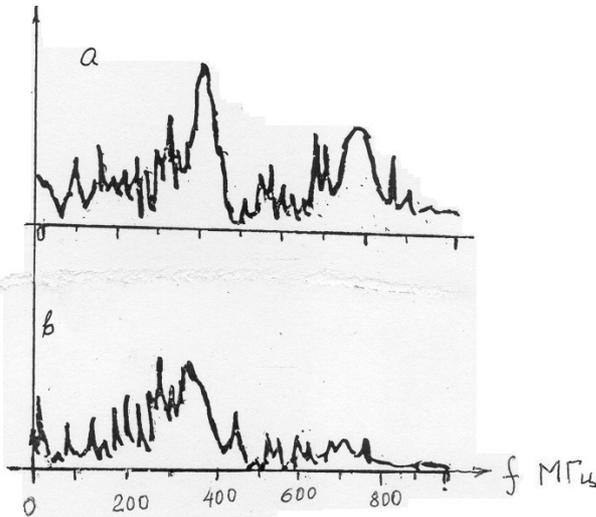


Рис. 7. Зависимость амплитуды стохастического сигнала, прошедшего через плазму плотности $n_p \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$ (а) и $n_p \approx 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ (б) от частоты сигнала при расстоянии между возбуждающим и принимающим зондами 206 мм

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Проанализируем структуру прошедшего через плазму стохастического сигнала от широкополосного генератора (см. рис. 5, 6, 7). На указанных рисунках вариант (а) соответствует низкой плотности плазмы $n_p \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$, а вариант (б) – высокой, $n_p \approx 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Отличие частотной зависимости сигналов обусловлено различным расположением принимающего зонда. Рассматриваемые экспериментальные условия соответствуют замагниченной плазме, так как электронная ларморовская частота ω_{He} превышает лэнгмюровскую ($\omega_{He}^2 \gg \omega_p^2$). Как известно, при этом есть два диапазона частот, в которых расположены собственные волны системы: высокочастотный – рабочие частоты ω выше частоты отсечки $\omega_{cut} = \sqrt{\omega_p^2 + c^2 k_{\perp}^2}$ (где $k_{\perp} = 2.4/R$, R – радиус резонатора); низкочастотный – рабочие частоты ниже электронной лэнгмюровской частоты ω_p . Для исследуемого диапазона частот до 1 ГГц плазменный резонатор имеет небольшое количество собственных мод. Однако, наблюдаемые на осциллограммах сигналы содержат большое число несобственных мод, появление которых обусловлено малой длиной резонатора и тем более расстоянием между зондами (11) и (12). Первые максимумы прошедшего стохастического сигнала в высокочастотном диапазоне, наблюдаемые на частоте $\omega_{1a} = 653 \text{ МГц}$ (см. рис. 6а) и частоте $\omega_{1b} = 764 \text{ МГц}$ (рис. 6б), отвечают первым радиальным гармоникам с продольной структурой поля, соответствующей одному максимуму в центре резонатора и двум минимумам на торцах. Можно видеть из рис. 5, что амплитуды сигнала на этих частотах соответствуют меньшим значениям, так как максимум указанной моды соответствует середине резонатора (рис.6 как раз и отвечает расположению приемного зонда в середине резонатора). Максимумы амплитуды стохастического сигнала в высокочастотном диапазоне, наблюдаемые на частоте $\omega_{2a} = 876 \text{ МГц}$ (рис. 5а и 5с) и частоте $\omega_{2b} = 955 \text{ МГц}$ (рис. 5б и 5д), соответствуют первым радиальным гармоникам с продольной структурой поля, соответствующей равенству продольной длины волны длине резонатора, т.е. максимуму и минимуму в резонаторе и нулям на торцах и в центре резонатора. Можно видеть из рис. 6, что амплитуды сигнала на этих частотах соответствуют минимальным значениям (тот факт, что мы наблюдаем минимальные значения, а не нулевые связано с тем, что зонд не является точечным) в середине резонатора, так как максимумы указанной моды соответствуют расстояниям в четверть длины от торцов резонатора (рис. 6 как раз и отвечает расположению приемного зонда в середине резонатора). Следующая собственная мода резонатора соответствует первой радиальной гармонике с продольной структурой поля, отвечающей трем экстремальным значениям в резонаторе, нулям на торцах и между экстремальными точками, соответствующей полутора продольным длинам волны в резонаторе с двумя нулями на торцах. Однако частота этой моды даже в отсутствие плазмы составляет более 1 ГГц, т.е. лежит вне изучаемого диапазона частот. Дальнейшее увеличение тока магнетрона приводит к соответствующему увеличению плотности плазмы, а значит увеличению частот ω_1 и ω_2 , вследствие которого они оказываются вне рабочего диапазона частот. Как мы уже отмечали выше, прохождение собственных волн резонатора в низкочастотном диапазоне происходит только при наличии в нем плазмы соответствующей плотности, наблюдение несобственных волн обусловлено малыми геометрическими размерами резонатора и расстоя-

стотный – рабочие частоты ω выше частоты отсечки $\omega_{cut} = \sqrt{\omega_p^2 + c^2 k_{\perp}^2}$ (где $k_{\perp} = 2.4/R$, R – радиус резонатора); низкочастотный – рабочие частоты ниже электронной лэнгмюровской частоты ω_p . Для исследуемого диапазона частот до 1 ГГц плазменный резонатор имеет небольшое количество собственных мод. Однако, наблюдаемые на осциллограммах сигналы содержат большое число несобственных мод, появление которых обусловлено малой длиной резонатора и тем более расстоянием между зондами (11) и (12). Первые максимумы прошедшего стохастического сигнала в высокочастотном диапазоне, наблюдаемые на частоте $\omega_{1a} = 653 \text{ МГц}$ (см. рис. 6а) и частоте $\omega_{1b} = 764 \text{ МГц}$ (рис. 6б), отвечают первым радиальным гармоникам с продольной структурой поля, соответствующей одному максимуму в центре резонатора и двум минимумам на торцах. Можно видеть из рис. 5, что амплитуды сигнала на этих частотах соответствуют меньшим значениям, так как максимум указанной моды соответствует середине резонатора (рис.6 как раз и отвечает расположению приемного зонда в середине резонатора). Максимумы амплитуды стохастического сигнала в высокочастотном диапазоне, наблюдаемые на частоте $\omega_{2a} = 876 \text{ МГц}$ (рис. 5а и 5с) и частоте $\omega_{2b} = 955 \text{ МГц}$ (рис. 5б и 5д), соответствуют первым радиальным гармоникам с продольной структурой поля, соответствующей равенству продольной длины волны длине резонатора, т.е. максимуму и минимуму в резонаторе и нулям на торцах и в центре резонатора. Можно видеть из рис. 6, что амплитуды сигнала на этих частотах соответствуют минимальным значениям (тот факт, что мы наблюдаем минимальные значения, а не нулевые связано с тем, что зонд не является точечным) в середине резонатора, так как максимумы указанной моды соответствуют расстояниям в четверть длины от торцов резонатора (рис. 6 как раз и отвечает расположению приемного зонда в середине резонатора). Следующая собственная мода резонатора соответствует первой радиальной гармонике с продольной структурой поля, отвечающей трем экстремальным значениям в резонаторе, нулям на торцах и между экстремальными точками, соответствующей полутора продольным длинам волны в резонаторе с двумя нулями на торцах. Однако частота этой моды даже в отсутствие плазмы составляет более 1 ГГц, т.е. лежит вне изучаемого диапазона частот. Дальнейшее увеличение тока магнетрона приводит к соответствующему увеличению плотности плазмы, а значит увеличению частот ω_1 и ω_2 , вследствие которого они оказываются вне рабочего диапазона частот. Как мы уже отмечали выше, прохождение собственных волн резонатора в низкочастотном диапазоне происходит только при наличии в нем плазмы соответствующей плотности, наблюдение несобственных волн обусловлено малыми геометрическими размерами резонатора и расстоя-

ния между зондами. Эти два замечания относятся в полной мере как к стохастическим, так и регулярным сигналам.

Далее проанализируем прохождение через резонатор регулярного сигнала, проведем сравнение результатов с данными, полученными для микроволнового излучения со стохастически прыгающей фазой, а также установим степень соответствия теоретическим результатам, приведенным в [2].

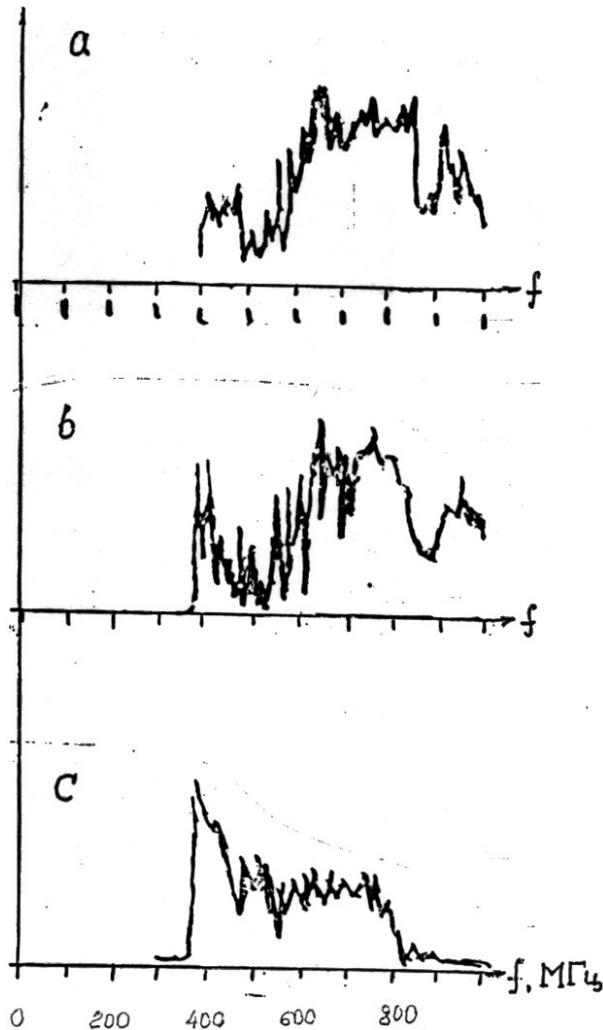


Рис. 8. Зависимость амплитуды регулярного сигнала, прошедшего через резонатор при различной плотности плазмы $n_p = 0$ (а), $n_p \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$ (б) и $n_p \approx 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ (с), от частоты сигнала при расстоянии между возбуждающим и принимающим зондами 335 мм

На рис. 8 приведены зависимости амплитуд регулярных сигналов после прохождения резонатора без плазмы (а), резонатора с плазмой низкой плотности $n_p \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$ (б), резонатора с плотной плазмой $n_p \approx 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ (с). Из рис. 8а видно, что при отсутствии плазмы регулярный сигнал проходит через ре-

зонатор на частотах выше 400 МГц, в то время как частота отсечки составляет 478 МГц, что соответствует критической длине волны ($\lambda_{cr} = 2.62R$) для моды E_{01} . Видно также, что пики собственных волн резонатора практически не выражены. Для получения одинаковой амплитуды прошедшего сигнала для МВИСПФ и регулярного требуется, чтобы амплитуда регулярного сигнала на один – два порядка была выше. Это свидетельствует: во-первых, о низкой эффективности возбуждения волн в резонаторе регулярным сигналом, а во-вторых, об отсутствии избирательности при прохождении такого сигнала относительно собственных и несобственных волн.

4. ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований возбуждения и прохождения в плазме различной плотности регулярных и стохастических электромагнитных волн установлено: возбуждение резонатора регулярным сигналом менее эффективно, чем МВИСПФ (для получения одинаковой амплитуды прошедшего сигнала для МВИСПФ и регулярного требуется, чтобы амплитуда регулярного сигнала на один – два порядка была выше); отсутствует избирательность при возбуждении и прохождении резонатора регулярным монохроматическим сигналом относительно собственных и несобственных волн. Результаты экспериментальных исследований находятся в удовлетворительном согласии с выводами теоретических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ya.B. Fainberg, F.G. Bass, V.D. Shapiro. Kvazilineynaya teoriya slaboturbulentnoy plazmy s uchetom korrelyatsii electriceskikh poley // *Zh. Eksp. Teor.fiz.* 1965, т. 49, с. 329-337.
2. V.I. Karas', V.D. Levchenko. Penetration of Microwave with a stochastic jumping phase (MSJP) into overdense plasmas and electron collisionless heating by it // *Proc of the V International Workshop "Strong Microwaves in plasmas."* (Nizhny Novgorod, Russia 2002, August 1-9), Abstracts, №19; Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения 2003 (этот же том).
3. A. Alisov, V. Antipov, A. Artamoshkin, I. Zagrebelny, N. Zemlyansky, V. Mirny, V. Karas', Ya. Fainberg. Investigations of propagation, reflection and action on plasma of microwave stochastic radiation // *Proc of the International School and Conference "Plasma Physics and Controlled Fusion"* (Alushta, Ukraine, September 16-21, 2002), abstracts, p. 140.
4. С.И. Солодовченко, А.Ф. Штань и др. Характеристики установки с ЭЦР-разрядом для ионно-плазменной установки // *Труды III-его межрегионального совещания "Тонкие пленки в электронике"*. Москва – Йошкар-Ола, 1992, с. 13.