

## О высокочастотных колебаниях, возбуждаемых при взаимодействии электронного пучка с плазмой

А. К. Березин, Я. Б. Файнберг, Л. П. Болотин, Г. П. Березина

В работе изложены результаты экспериментов по обнаружению и исследованию колебаний, возбуждаемых в пучке и плазме в результате их взаимодействия. Эксперименты проводились в условиях, когда  $\omega_0 < \omega_H$ , где  $\omega_0$  — электронная ленгмюровская частота плазмы;  $\omega_H$  — электронная циклотронная частота.

Определены условия возбуждения волн в пучке и плазме, их частотные спектры, фазовые скорости, коэффициенты усиления, напряженность электрического поля, абсолютные значения и спектральное распределение мощности возбуждаемых колебаний.

Экспериментальные результаты по измерению частот, коэффициентов усиления, фазовых скоростей возбуждаемых колебаний в плазме находятся в удовлетворительном согласии с расчетными данными.

Как было показано в работах [1—3], при прохождении сильноточного импульсного электронного пучка (ток 5—8,5 а; энергия 15 кэв; длительность импульса 3,6 мксек) через плазму в продольном магнитном поле (с напряженностью 400—1320 гс) при определенных условиях он теряет значительную часть своей первоначальной энергии (10—25%). В этих экспериментах плазма создается самим пучком. Из теоретических соображений [4, 5] следует, что эта энергия должна идти на возбуждение колебаний в пучке и плазме, а также на их нагревание.

Как известно [4—6], в случае, описываемом в настоящей работе, должны возбуждаться прямые волны (нормальная дисперсия). При больших плотностях электронных пучков наряду с ленгмюровскими электронными частотами плазмы должны также возбуждаться частоты, связанные с электронными ленгмюровскими колебаниями пучка.

Измерения проводились в режиме стоячих и бегущих волн для тока 5 и 8,5 а в продольном магнитном поле с напряженностью 720—1320 гс. В первом случае в конце камеры рас-

полагалась металлическая отражающая пластинка (коллектор тока), во втором — адiabатическая поглощающая нагрузка (конус из графита длиной 12 см).

### Изучение колебаний, возбуждаемых в плазме

Блок-схема установки показана на рис. 1. Остановимся подробнее на описании некоторых узлов этой установки.

Для регистрации  $H_\varphi$ -,  $H_\rho$ -,  $H_z$ -компонент ВЧ-поля колебания принимались петлей, а для регистрации  $E_z$ -компоненты ВЧ-поля — полуволновым диполем, расположенным в плазме, ориентированным соответствующим образом и присоединенным к подвижному коаксиальному кабелю, связанному с калиброванным по мощности резонансным волномером (полуширина полосы  $\sim 1,5$  Мгц).

Перестраивая волномер по частоте и регистрируя изменение мощности принимаемого сигнала, можно было снять частотный спектр колебаний, возбуждаемых в плазме, для фиксированного положения петли или диполя внутри камеры. Передвигая коаксиальный кабель с петлей или диполем в направлении движения электронного пучка и регистрируя изменение ВЧ-мощности колебаний, возбуждаемых в плазме на заданной частоте, можно было снять распределение интенсивности соответствующих составляющих этих ВЧ-колебаний.

Для устранения вибрации коаксиальный кабель с петлей или диполем перемещался внутри направляющей (медная трубка  $4 \times 6$  мм с боковым прорезом по всей длине). Направляющая закреплялась внутри камеры вблизи ее края параллельно оси системы. Подвижный кабель выходил через боковой прорез напра-



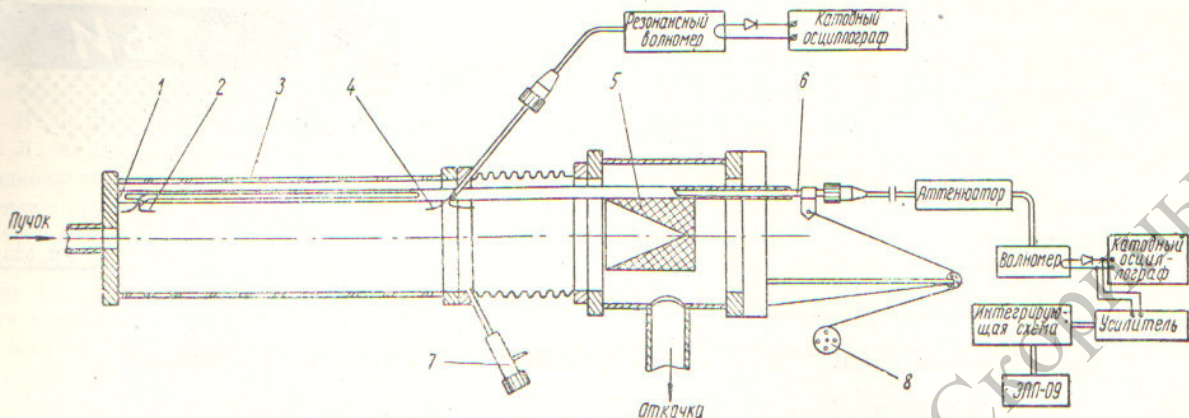


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования возбуждаемых колебаний в плазме в режиме бегущих и стоячих волн:

1 — направляющая; 2 — петли или диполь; 3 — камера; 4 — неподвижный диполь; 5 — коллектор тока; 6 — подвижный коаксиальный кабель; 7 — натекатель; 8 — синхронный мотор.

вляющей и оканчивался петлей (площадь  $\sim 1 \text{ см}^2$ ) или полуволновым диполем. Петли и диполь располагались на расстоянии 10 мм от границы пучка. Коаксиальный кабель через специальное вакуумное уплотнение выводился наружу и через калиброванный аттенуатор присоединялся к калиброванному по мощности резонансному волномеру. Сигнал с выхода волномера поступал одновременно на осциллограф и на широкополосный усилитель, затем на катодный повторитель с интегрирующей ячейкой и далее на автоматический электронный потенциометр ЭПП-09. На экране осциллографа наблюдалась огибающая ВЧ-колебаний и измерялась ее амплитуда (с точностью 5%). Калибровка волномера на заданной частоте (в заданной области частот) заключалась в следующем. От генератора стандартных сигналов, работающего в непрерывном режиме, колебания известной мощности поступали на волномер с кристаллическим детектором, на выходе которого измерялось постоянное напряжение. Мощность генератора определялась измерителем малых мощностей (ИММ-6) с точностью 7—10%. Такая калибровка проводилась до и после измерений ВЧ-мощности возбуждаемых колебаний. Учитывались только такие измерения, при которых калибровка в процессе работы не изменялась.

При измерении мощности таким способом суммарная ошибка составляла  $\pm 17-20\%$ , причем ошибка, связанная с градуировкой волномера, равнялась  $\pm 7-10\%$ , а ошибка определения ослабления аттенуаторов составляла  $\pm 10\%$ .

Напряженность магнитного поля соответствующей компоненты ВЧ-колебаний вычислялась по формуле

$$\tilde{H} = \frac{10^8 \sqrt{Pq}}{\omega S}, \quad (1)$$

где  $P$  — ВЧ-мощность, отбираемая петлей, *вт*;  $q$  — входное сопротивление волномера ( $q=75 \text{ ом}$ );  $S$  — площадь петли,  $\text{см}^2$  ( $S=1 \text{ см}^2$ );  $\omega$  — частота колебаний, *гц*.

Наиболее интенсивные колебания в плазме возбуждались в диапазоне 825—835 Мгц (с полушириной 50—70 Мгц) в области давлений  $(4 \div 7) \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ . Образец такой осциллограммы, снятой на частоте 825 Мгц, приведен на рис. 2.

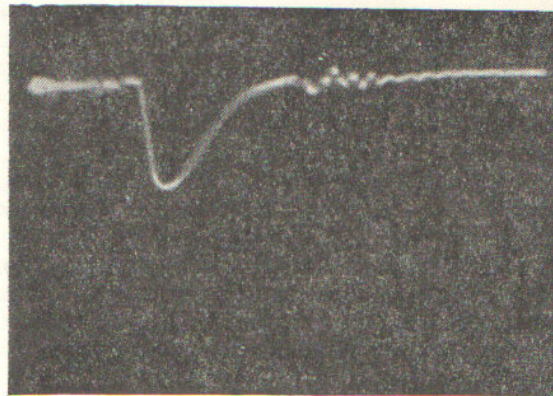


Рис. 2. Изменение амплитуды ВЧ-колебаний в зависимости от времени. Частота колебаний 825 Мгц; длительность импульса напряжения 3,6 мксек; масштаб 1 мксек.



По измерениям распределения ВЧ-поля в режиме стоячей волны определялись фазовые скорости, а в режиме бегущей волны — коэффициенты усиления возбуждаемых колебаний.

Относительная фазовая скорость  $\beta$  вычислялась следующим образом:

$$\beta = \frac{\lambda_g}{\lambda_0}, \quad (2)$$

где  $\lambda_g$  и  $\lambda_0$  — соответственно длины волн в плазме и в свободном пространстве. Коэффициент усиления  $\gamma$  вычислялся из соотношения

$$\gamma = \frac{1}{2(z_2 - z_1)} \ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{(z_2 - z_1)} \ln \frac{\tilde{H}_2}{\tilde{H}_1}, \quad (3)$$

где  $\tilde{H}_1$  и  $\tilde{H}_2$  — напряженности поля распространяющейся волны в точках  $z_1$  и  $z_2$ ;  $P_1$  и  $P_2$  — соответствующие им ВЧ-мощности.

Графики распределения  $H_\rho$ -компоненты электромагнитного ВЧ-поля вдоль направления движения пучка (оси  $z$ ) на частоте 835 МГц в режиме стоячих волн при различных напряженностях магнитного поля (1320, 960 и 720 гс) приведены в работе [2] на рис. 7, а, б, в. На этих графиках по оси ординат отложена ВЧ-мощность, пропорциональная  $H_\rho^2$  (в отн. ед.), которая отбирается петлей, ориентированной соответствующим образом и находящейся в заданной точке по  $z$ . По оси абсцисс отложено расстояние (в см), отсчитываемое от конца области взаимодействия.

На рис. 3, а, б приведены графики распределения  $H_\rho$ -компоненты ВЧ-поля в плазме вдоль направления движения пучка в режиме бегущих и стоячих волн.

Аналогичные графики были получены для  $H_\varphi$ -,  $H_z$ - и  $E_z$ -компонент ВЧ-поля в плазме.

Небольшие пики на кривой рис. 3, а можно объяснить тем, что из-за несовершенства нагрузки наряду с поглощением есть частичное отражение волны (длина конуса 12 см, т. е. примерно равна длине волны в системе на частоте 835 МГц). Измерения показывают, что в среднем длина волны колебаний в плазме  $\sim 10$ –12 см, т. е.  $\beta \approx 0,3$  (частота колебаний 835 МГц).

Ниже приводятся коэффициенты усиления в зависимости от напряженности продольного магнитного поля (частота 835 МГц):

Напряженность магнитного поля, гс	Коэффициент усиления, см <sup>-1</sup>
1320	0,21
960	0,23
720	0,26

При изменении тока пучка и его скорости коэффициенты усиления также изменяются. Они увеличиваются с ростом тока пучка и уменьшением его скорости.

Таким образом, в данных экспериментах при взаимодействии электронного пучка с плазмой в последней возбуждаются медленные электромагнитные волны, нарастающие по интенсивности в направлении движения пучка. Напряженность магнитного поля этих колебаний в конце камеры, вычисленная по формуле (1), достигает 0,3–0,4 гс. Изменение напряженности продольного магнитного поля от 1320 до 720 гс почти не влияет на частоту колебаний, но сильно изменяет их интенсив-

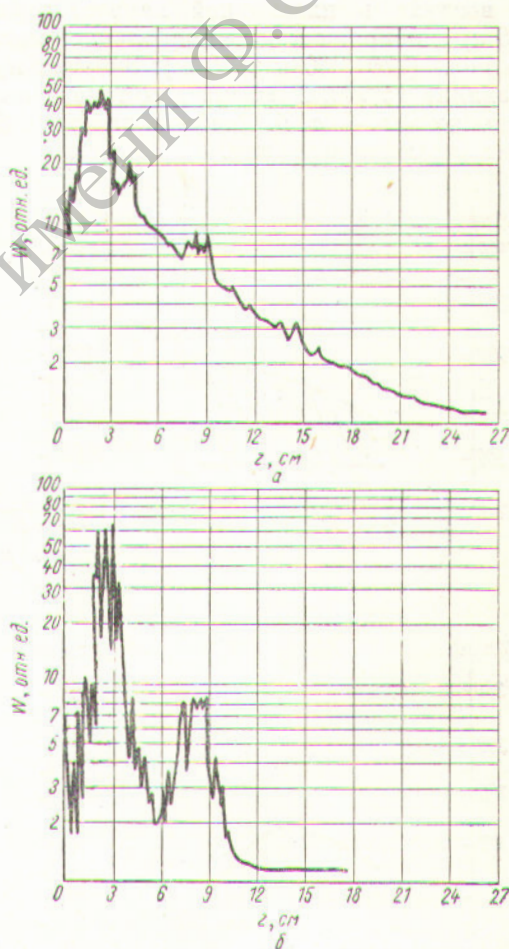


Рис. 3. Графики, показывающие пространственное распределение  $H_\rho$ -компоненты ВЧ-поля на частоте 835 МГц. Электронный пучок с током 5 а и энергией 15 кэв, давление рабочего газа  $6 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. при напряженности магнитного поля 1320 гс в режиме бегущих (а) и стоячих (б) волн. Пучок движется справа налево.



ность: с ростом напряженности интенсивность колебаний уменьшается.

Частотные спектры измерялись в диапазоне частот 400—3200 МГц в конце области взаимодействия пучка с плазмой. При давлениях ниже  $8 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. частотные спектры имеют два (иногда три) резко очерченных максимума. Для области высоких давлений ( $8 \cdot 10^{-4}$ — $2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) вместо острых максимумов характерно наличие плато.

На основании полученных данных были построены графики, на которых значения возбуждаемых частот, полуширины спектров и максимальная интенсивность возбуждаемых колебаний приведены в зависимости от давления воздуха в плазменной камере, тока (5 и 8,5 а) и напряженности продольного магнитного поля (720, 960 и 1320 гс). Энергия пучка составляла 15 кэв. Графики для тока 5 а приведены на рис. 4, а, б. Графики для тока 8,5 а имеют аналогичный вид.

Области частот между максимумами интенсивности на этом рисунке заштрихованы. Частота одного из максимумов интенсивности ( $f_1$ ) зависит от давления воздуха в плазменной камере, возрастая при увеличении давления. Наоборот, частота второго максимума ( $f_2$ ) не зависит от давления, оставаясь примерно постоянной; причем  $f_1 > f_2$ . Необходимо отметить, что  $f_2 \approx \frac{\Omega_0}{2\pi}$ , где  $\Omega_0$  — электронная ленгмюровская частота пучка.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 4, а, полуширины спектров возбуждаемых частот возрастают при увеличении давления воздуха в плазменной камере. Это, вероятно, можно объяснить тем, что указанные полуширины прямо пропорциональны частоте соударений в плазме, которая возрастает при увеличении давления рабочего газа.

С увеличением скорости электронного пучка частота  $f_1$  растет.

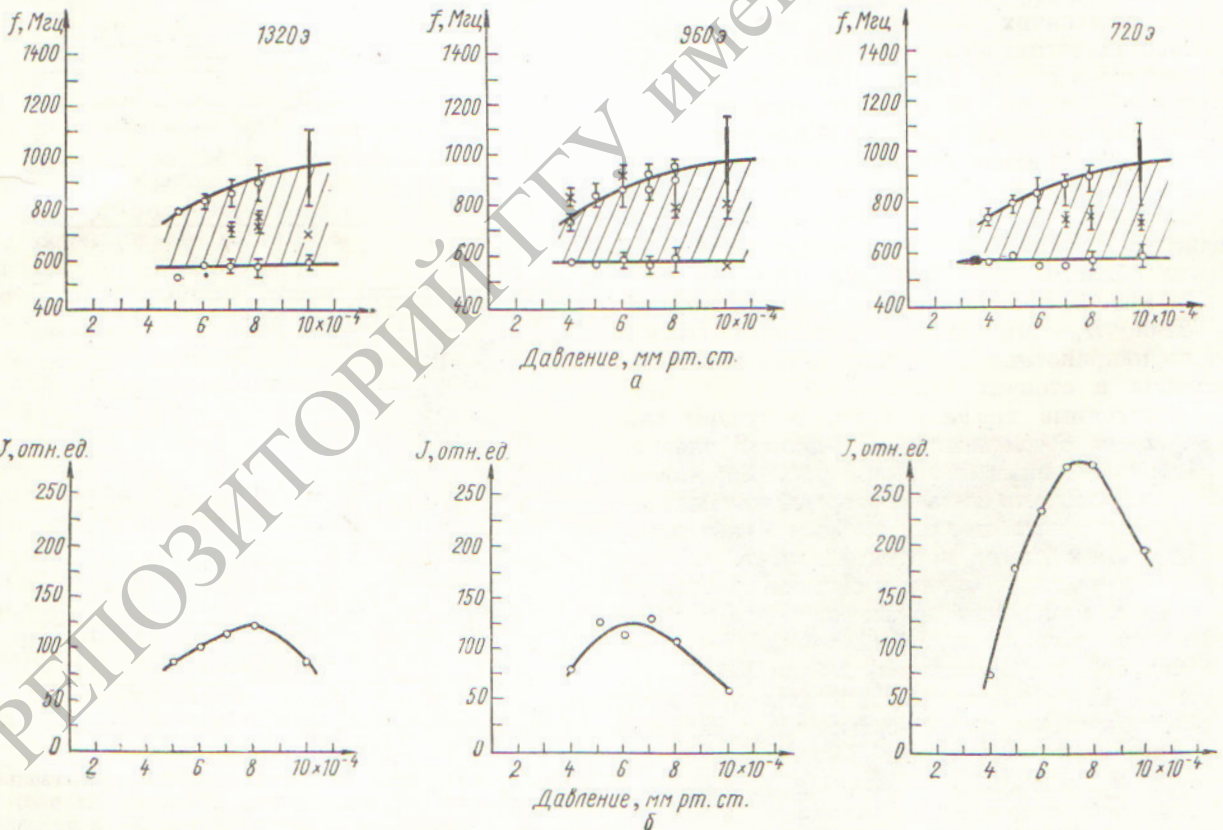


Рис. 4. Значения возбуждаемых частот  $f_1$  и  $f_2$  и полуширин спектра (а) и максимальной интенсивности возбуждаемых колебаний (б) в зависимости от давления воздуха в плазменной камере для электронного пучка с током 5 а и энергией 15 кэв для различных напряженностей продольного магнитного поля.



На рис. 4, б приведены максимальные интенсивности колебаний на частоте  $f_1$  в зависимости от давления воздуха в плазменной камере. Из приведенных графиков можно сделать следующие выводы: 1) интенсивность возбуждаемых колебаний достигает максимума при давлениях  $(4 - 7) \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.; 2) при уменьшении или увеличении давления относительно оптимального интенсивность возбуждаемых колебаний уменьшается; 3) при уменьшении напряженности продольного магнитного поля от 1320 до 720 гс интенсивность колебаний возрастает. Измерения также показывают, что при увеличении скорости электронного пучка интенсивность возбуждаемых колебаний уменьшается. Подобные закономерности наблюдались при исследованиях в режиме стоячих и бегущих волн.

Так как плотность плазмы  $N$  в нашем случае пропорциональна давлению воздуха в камере, были построены графики зависимости  $f_1^2$  от плотности плазмы для фиксированного значения тока и энергии электронного пучка. Такие графики приведены на рис. 5, а, б для токов 5 и 8,5 а соответственно. Значения плотностей плазмы в зависимости от давления воздуха в камере были взяты из графиков, приведенных на рис. 3 работы [2]. Плотность плазмы измерялась двумя методами: с помощью ВЧ-интерферометра ( $\lambda_d \approx 3,2$  см) и с помощью метода, основанного на использовании дисперсионных свойств плазменных волноводов.

Как известно, в нашем волноводе имеется полоса загираания, заключенная в пределах от  $\omega_0$  до  $\omega_H$  [для случая  $\omega_H > \omega_0$  (см. рис. 9, кривая—о—)]. Поэтому, определив частоту, соответствующую началу полосы загираания, можно найти плотность плазмы [2]. Таким образом, можно считать, что квадраты возбуждаемых частот  $(f_1)^2$  изменяются прямо пропорционально электронной плотности плазмы. Возбуждаемые частоты возрастают при увеличении тока электронного пучка.

Уравнение прямых линий, приведенных на рис. 5, а и б, можно записать в виде

$$f_1^2 = \alpha^2 f_0^2 + (A^*)^2,$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности между  $f_1$  и  $f_0$ ;  $A^*$  — частота возбуждаемых колебаний при отсутствии плазмы ( $f_0 = 0$ );  $f_0 = \omega_0/2\pi$ . В результате проделанных вычислений были получены значения, приведенные в таблице (напомним, что  $\Omega_0$  — электронная ленгмюровская частота пучка).

Ток, а	$\alpha$	$A^*$ , Мгц	$\Omega_0/2\pi$ , Мгц
5	0,53	450	560
8,5	0,44	600	730

Как видно из таблицы, значения  $A_1^* = 450$  Мгц и  $A_2^* = 600$  Мгц находятся в соответствии со значениями ленгмюровской частоты электронного пучка для указанных выше значений

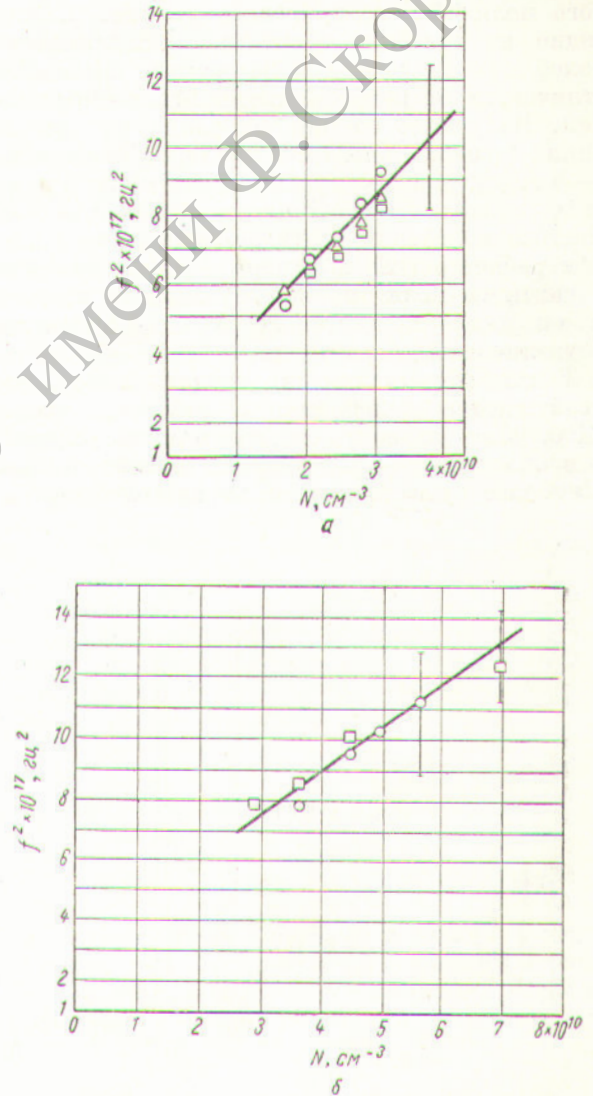


Рис. 5. Зависимость квадрата возбуждаемых частот в плазме  $f_1^2$  от плотности плазмы для электронного пучка с энергией 15 кэв током 5 а (а) и 8 а (б):

□—1320 гс; ○—960 гс; △—720 гс.



тока. Если пренебречь малой поправкой в области исследуемых частот  $A^*$  к  $f_1$ , то частота возбуждаемых колебаний  $f_1$  составит  $0,53 f_0$  для тока  $5 a$  и  $0,44 f_0$  для тока  $8,5 a$ .

В работе были также исследованы колебания с частотами в области  $2400 \text{ Мгц}$ . Эти колебания наблюдались только в режиме стоячих волн. Измерения показали, что у этих ВЧ-колебаний в плазме есть только  $H_z$ - и  $H_r$ -компоненты. Распределение интенсивности колебаний вдоль оси  $z$  на частоте  $2405 \text{ Мгц}$  для тока  $5 a$  и энергии  $15 \text{ кэв}$  и напряженности магнитного поля  $1320 \text{ гс}$  приведено на рис. 6. Как видно из графика, изменение интенсивности колебаний вдоль оси  $z$  на частоте  $2405 \text{ Мгц}$  отличается от ранее приведенных распределений. Излучение состоит из узких по частоте линий (две-три линии с полушириной порядка  $3-5 \text{ Мгц}$ ). Максимальная напряженность поля этих колебаний составляет  $0,05-0,15 \text{ гс}$ . Частота колебаний почти не зависит от давления рабочего газа в камере и напряженности магнитного поля, но сильно зависит от тока и скорости электронного пучка, возрастая с увеличением последних.

Таким образом, можно сделать вывод, что возбуждение колебаний в области частот  $2400 \text{ Мгц}$  зависит от граничных условий, а в области  $825-835 \text{ Мгц}$  не зависит от них. Наиболее существенное отличие колебаний на

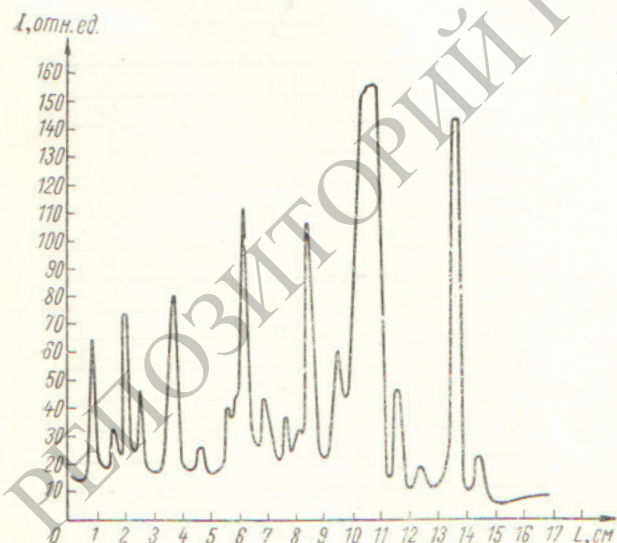


Рис. 6. Распределение  $H_r$ -компоненты ВЧ-поля в плазме вдоль оси системы на частоте  $2405 \text{ Мгц}$ . Энергия пучка  $15 \text{ кэв}$ , ток  $5 a$ , напряженность продольного магнитного поля  $1320 \text{ гс}$ . Направление движения пучка на осциллограмме справа налево.

частоте  $825 \text{ Мгц}$  — уменьшение их интенсивности при снижении напряженности магнитного поля.

Аналогичные измерения были проделаны при использовании в качестве рабочего газа не только воздуха, но и аргона и водорода. Зависимости  $H_r$  от  $z$  при использовании воздуха и аргона оказываются аналогичными, если давление рабочего газа в камере примерно одинаково при прочих одинаковых условиях эксперимента. Чтобы получить такую же картину колебаний в плазме при напуске в камеру водорода, необходимо увеличить его давление до  $5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$  (т. е. примерно в шесть-семь раз по сравнению с давлением воздуха). Эти результаты можно объяснить тем, что коэффициенты удельной ионизации  $\epsilon (V)$  у воздуха и аргона примерно одинаковые, а у водорода в шесть-семь раз меньше [7].

#### Изучение колебаний, возбуждаемых в электронном пучке после его прохождения через плазму

Блок-схема установки для исследования этих колебаний показана на рис. 7. Немодулированный на входе электронный пучок после взаимодействия с плазмой пропускаться через спиральный переход, с помощью которого у пучка отбиралась ВЧ-мощность.

Спиральный переход выполнен следующим образом. Внутри стеклянной трубки внутренним диаметром  $18 \text{ мм}$ , уплотненной на вакуум, помещалась спираль из молибденовой проволоки диаметром  $1,5 \text{ мм}$ . Шаг спирали выбирался так, чтобы фазовая скорость волны, распространяющейся вдоль спирали, была равна скорости электронного пучка, проходящего внутри этой спирали. Снаружи спираль была окружена второй, более короткой спиралью с обратным направлением намотки. Эта спираль соединялась с коаксиальным кабелем, волновое сопротивление которого равнялось  $75 \text{ ом}$ . Внутренняя спираль одним концом была соединена с электродом, находящимся под нулевым потенциалом («заземлена»). Торцы стеклянной трубки покрывались слоем акводага. Таким образом, электроны, попавшие на торцы стеклянной трубки и внутреннюю спираль, стекали на землю. Длина спирального перехода составляла  $\sim 15 \text{ см}$ . Коэффициенты стоячей волны по напряжению (КСВН) входа в эти спиральные переходы не превышали  $2,0$  в области частот  $650-5000 \text{ Мгц}$ . Эти измерения были проведены на системах безэлектронного пучка.



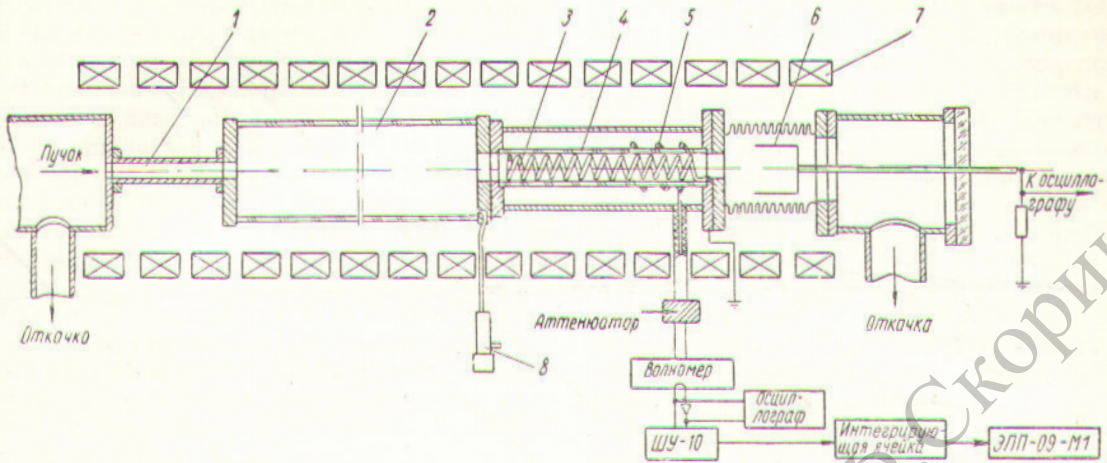


Рис. 7. Блок-схема установки для исследования колебаний, возбуждаемых в пучке:

1 — трубка для создания перепада давлений; 2 — камера; 3 — внутренняя спираль спирального перехода; 4 — стеклянная трубка; 5 — внешняя спираль; 6 — коллектор тока; 7 — соленоид для создания продольного магнитного поля; 8 — нагреватель.

За спиральным переходом располагался коллектор, на который попадал электронный пучок. Эксперименты в основном проводились с электронными пучками с током 5 а и энергией 15 кэв при давлении  $6 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. и напряженности продольного магнитного поля 1320 гс.

Измерения показывают, что спектры возбуждаемых частот в пучке аналогичны ранее приведенным спектрам колебаний, возбуждаемых в плазме при тех же условиях. Мощности колебаний определялись способом, подробно описанным выше, при помощи фиксированных аттенуаторов и калиброванного волномера.

Как показали измерения, абсолютная мощность колебаний на частоте 825 Мгц порядка 150—200 вт, на частоте 2400 Мгц порядка 1—2 квт. Суммарная же мощность колебаний, излучаемых в области частот 825 Мгц, равна 3—4 квт в импульсе. Таким образом, суммарная мощность излучения, зарегистрированная в пучке, составляет 6—8 квт в импульсе.

Оценки показывают, что для указанных выше параметров пучка и плазмы напряженность электрического поля возбуждаемой волны в конце области взаимодействия пучка с плазмой ( $f \approx 825$  Мгц) равна 0,5—0,6 кв/см. Свойства колебаний, возбуждаемых в пучке в области частот  $\sim 825$  Мгц, аналогичны свойствам колебаний, возбуждаемых в плазме и описанных выше.

Определено время появления колебаний, возбуждаемых в пучке на частотах в области

825—1100 и  $\sim 2400$  Мгц. Это время определялось из осциллограмм, подобных приведенным на рис. 2. Время отсчитывалось от начала импульса напряжения, подаваемого на катод электронной пушки, до максимума амплитуды высокочастотной огибающей. График, показывающий зависимость времени появления колебаний от давления воздуха, приведен на рис. 8. Как видно из графика, колебания

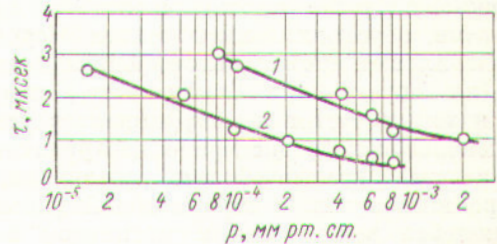


Рис. 8. Время появления колебаний, возбуждаемых в пучке, в зависимости от давления рабочего газа:

1 — частота 825 Мгц; 2 — частота  $\sim 2400$  Мгц.

на частоте 2400 Мгц возбуждаются в пучке раньше, чем колебания на частотах в области 825—1100 Мгц. С увеличением давления время возбуждения колебаний в пучке уменьшается.

#### Обсуждение полученных результатов и сравнение их с теоретическими данными

Проведем сравнение полученных экспериментальных результатов с теорией. Как ука-



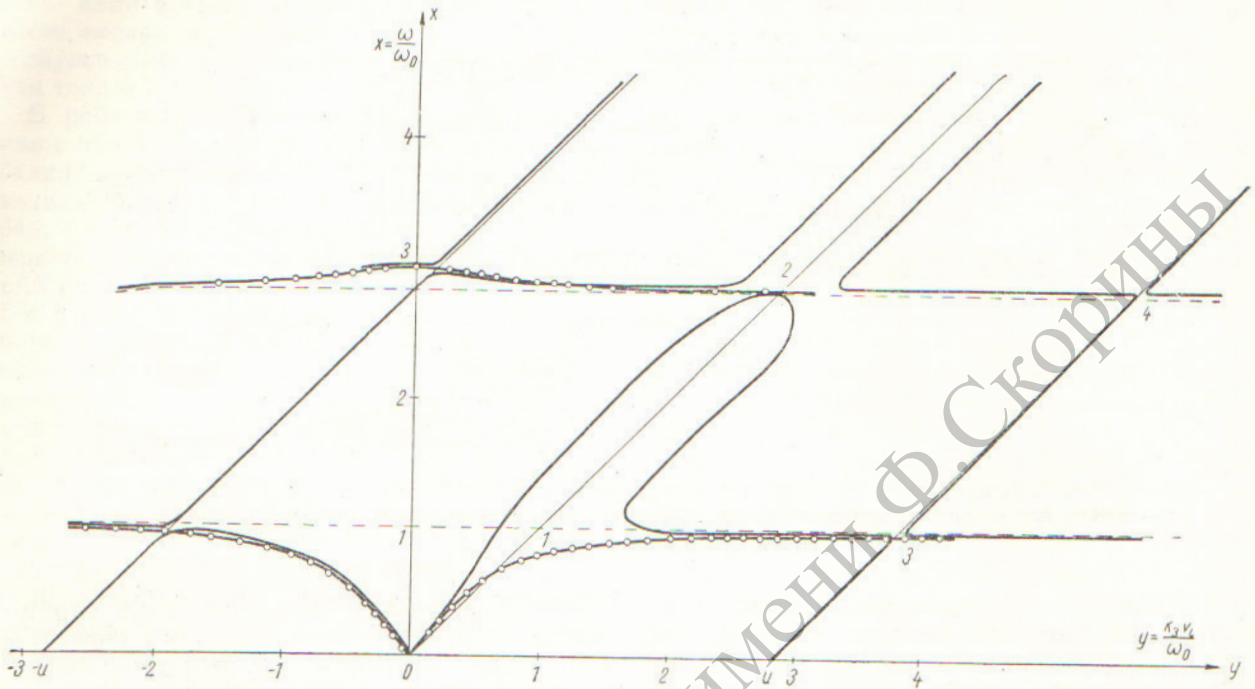


Рис. 9. Решение дисперсионных уравнений:

—○—○— для плазмы; — для пучка с плазмой (значения параметров приведены в тексте).

зывалось в работах [3—6], в результате взаимодействия электронного пучка с плазмой, находящейся в продольном магнитном поле, возможно развитие неустойчивостей в пучке и плазме, обусловленных эффектом Черенкова — Вавилова и аномальным эффектом Доплера. Для определения возможного спектра возбуждаемых частот и коэффициентов усиления использовалось дисперсионное уравнение, описывающее взаимодействие ограниченного электронного пучка с ограниченной плазмой, находящейся в продольном магнитном поле, полученное М. Ф. Горбатенко [6]\*. В случае, когда радиус столба плазмы  $b$  равен радиусу пучка  $a$ , дисперсионное уравнение имеет вид

$$1 + \frac{1}{u^2 - x^2} + \frac{\varepsilon}{u^2 - (y - x)^2} + N'y^2 \left[ 1 - \frac{1}{x^2} - \frac{\varepsilon}{(y - x)^2} \right] = 0, \quad (4)$$

где

$$N' = \frac{b^2 \omega_0^2}{\lambda_p v^2}; \quad \varepsilon = \frac{\Omega_0^2}{\omega_0^2}; \quad u^2 = \left( \frac{\omega_H}{\omega_0} \right)^2;$$

$$y = \frac{k_3 v}{\omega_0}; \quad x = \frac{\omega}{\omega_0}$$

\* Все последующие расчеты также выполнены М. Ф. Горбатенко.

(здесь  $k_3 = \frac{\omega}{v_{\text{ф}}}$ ;  $v$  — скорость пучка;  $v_{\text{ф}}$  — фазовая скорость волны;  $\lambda_p$  — постоянная, лежащая в пределах 2,4 — 3,8). Дисперсионные зависимости для наших параметров пучка и плазмы приведены на рис. 9, где  $u^2 = 8$ ,  $N' = 2$ ,  $\varepsilon = 0,125$ , что соответствует  $N \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ;  $H = 1200 \text{ гс}$ , значению тока  $5 \text{ а}$ ,  $v \approx 6 \cdot 10^9 \text{ см/сек}$ ;  $b \approx 2,5 \text{ см}$ .

Из анализа дисперсионного уравнения следует, что в нашем случае области возбуждения колебаний расположены вблизи частот  $\omega_0$  и  $\omega_H$ . При этом в области  $\omega_0$  возбуждение может быть обусловлено эффектом Черенкова — Вавилова (область 1) и аномальным эффектом Доплера (область 3) на прямой волне. В области  $\omega_H$  возбуждение может быть обусловлено эффектом Черенкова — Вавилова (область 2) и аномальным эффектом Доплера (область 4) на обратной волне.

Инкременты нарастания (мнимая часть  $x$ ), вычисленные для этих областей, в нашем случае имеют следующие значения: для области 1 максимальный инкремент нарастания равен 0,26; для области 2 он составляет 0,12; для области 3 равен 0,07; для области 4 равен 0,06.



Таким образом, инкремент нарастания имеет наибольшее значение для области 1, возбуждение колебаний в которой обусловлено эффектом Черенкова—Вавилова на прямой волне (нормальная дисперсия). Частота этих колебаний  $f_1$  близка к электронной ленгмюровской частоте плазмы  $f_0$ , но не совпадает с ней ( $f_1 \approx 0,6f_0$ ) из-за ограниченности пучка и плазмы и влияния сильного магнитного поля.

Экспериментально измеренная частота максимально усиливаемых колебаний  $f_1 \approx 0,53 f_0$  для тока 5 а (см. рис. 5, а и таблицу), что вполне удовлетворительно совпадает с расчетными данными. Кроме того, измерена частота максимально усиливаемых колебаний для тока 8,5 а. Она составляет 0,44  $f_0$  (см. рис. 5, б и таблицу).

Из расчетов следует, что в нашем случае должны возбуждаться медленные электромагнитные волны с длиной волны в плазме  $\sim 7,2$  см (на частоте 835 Мгц). Измеренная длина волны в плазме 10—12 см ( $\beta \approx 0,3$ ) (см. рис. 3, а). Следовательно, в данных экспериментах действительно возбуждаются медленные волны с фазовой скоростью, примерно равной скорости пучка ( $v_\phi \approx v$ ).

Расчетное значение коэффициентов усиления для условий, имеющих место в эксперименте, равно 0,32 см<sup>-1</sup>; экспериментальные значения заключены в пределах 0,21—0,26 см<sup>-1</sup> (см. выше). Таким образом, коэффициенты усиления также находятся в соответствии с расчетными величинами.

Как указывалось в работах [8, 9], при взаимодействии электронного пучка с плазмой должна развиваться конвективная (сносовая) неустойчивость. Графики рис. 3, а, б подтверждают справедливость этого предположения.

При измерениях не было обнаружено возбуждения частот заметной интенсивности в области электронной циклотронной частоты  $\omega_H$ . Это соответствует теории, так как для нашего случая инкременты в этой области частот равны 0,12, что значительно меньше инкрементов для частот в области  $\omega_0$ , равных 0,26. Следовательно, колебания, возбуждаемые в области частот  $\sim 800$ —1100 Мгц, являются продольными волнами в пучке и плазме, обусловленными эффектом Черенкова—Вавилова (прямые волны). Полученные экспериментальные данные соответствуют основным теоретическим положениям.

Наряду с колебаниями в области частот 800—1100 Мгц при определенных условиях возбу-

ждаются также колебания с частотой 2400 Мгц. Частота этих колебаний практически не зависит от плотности плазмы. По времени они возникают раньше колебаний в области частот 800—1100 Мгц (см. рис. 8). Их частота не зависит от напряженности продольного магнитного поля, но зависит от скорости электронного пучка. Интенсивность колебаний в области частот 2400 Мгц в отличие от плазменных колебаний возрастает при увеличении напряженности продольного магнитного поля.

Следует указать, что возбуждение колебаний на частотах 2400 Мгц имеет место только в том случае, когда в конце области взаимодействия пучка с плазмой расположена отражающая металлическая поверхность. Все это позволяет утверждать, что такие колебания обусловлены самим электронным пучком и не зависят от параметров плазмы. Можно предположить, что в данном случае имеет место параметрическое возбуждение колебаний. Однако для окончательного утверждения необходимы дополнительные измерения.

Из результатов измерений, приведенных в работах [1—3], следует, что при токе 5 а и энергии 15 кэВ при давлении  $(4 \div 6) \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. в результате взаимодействия с плазмой электронный пучок теряет до 18% своей первоначальной энергии ( $\sim 13$  кэВ в импульсе). Эта энергия идет на возбуждение колебаний в пучке и плазме и на их «нагрев». Как показывают измерения, мощность возбуждаемых колебаний составляет 8 кэВ в импульсе, т. е. по крайней мере 60% полных потерь энергии пучка.

Следует, однако, заметить, что в проведенных экспериментах связь пучка со спиральным переходом не была оптимальной, поэтому вполне возможно, что только часть мощности ВЧ-колебаний отбирается от электронного пучка при его прохождении через спиральный переход и, следовательно, мощность возбуждаемых колебаний в действительности больше. Некоторая часть энергии идет на нагрев пучка и плазмы.

Авторы выражают благодарность М. Ф. Горбатенко за проведенные расчеты.

Поступила в Редакцию 4/VI 1964 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Березин и др. «Атомная энергия», 14, 249 (1963).
2. А. К. Березин и др. В сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза». Т. III. Киев, Изд-во АН УССР, 1963, стр. 125.



3. А. К. Березин и др. «Атомная энергия», 18, вып. 3 (1965).  
 4. Я. Б. Файнберг. Диссертация. ФИАН СССР, 1960; «Атомная энергия», 11, 313 (1961).  
 5. В. Д. Шапиро, В. И. Шевченко. ЖЭТФ, 42, 1515 (1962); В. Д. Шапиро. ЖЭТФ, 44, 613 (1963); диссертация, ОИЯИ, Дубна, 1963.  
 6. М. Ф. Горбатенко. «Ж. техн. физ.», 33, 173, 1070 (1963); диссертация, Харьковск. гос. ун-т, 1964.  
 7. А. Энгель, М. Штеенбек. Физика и техника электрического разряда в газах. Ч. I. М.—Л., ОНТИ, 1935.  
 8. P. Sturrock. Phys. Rev., 112, 1488 (1958).  
 9. Я. Б. Файнберг, В. И. Курилко, В. Д. Шапиро. «Ж. техн. физ.», 31, 633 (1961).



УДК 621.384.623

## Взаимодействие сгустков плазмы с электромагнитной волной

В. И. Векслер, И. Р. Геккер, Э. Я. Гольц, Г. А. Делоне, Б. П. Кононов,  
 О. В. Кудреватова, Г. С. Лукьянчиков, М. С. Рабинович, М. М. Савченко,  
 К. А. Сарксян, К. Ф. Сергейчев, В. А. Силин, И. Э. Цопп

Сообщаются предварительные экспериментальные результаты исследования ускорения плазмы в круглых волноводах. Исследования проводились в 10-сантиметровом диапазоне на установках с волнами типа  $H_{01}$  и  $H_{11}$  и различными плазменными инжекторами. Плазменные сгустки с начальной концентрацией частиц  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> и выше инжектировались с начальной скоростью  $5 \cdot 10^6$  см/сек из искрового источника или формировались непосредственно на оси волновода с помощью источника плазмы с перепадом давления при рабочем вакууме в ускорителе  $10^{-7}$ — $10^{-6}$  мм рт. ст. Для диагностики использовались электрические зонды, СВЧ-методы и электростатический анализатор энергий частиц. Удержание плазмы осуществлялось с помощью внешних магнитных полей различной конфигурации. Были получены ускоренные ионы с энергией более 10 кэВ.

В 1954 г. было предложено [1] использовать когерентное взаимодействие заряженных частиц с электромагнитной волной для ускорения плазмы. Последующие теоретические исследования показали, что, соблюдая определенные условия, можно осуществить длительное ускорение плазменных сгустков при сохранении их формы и размеров [2, 3].

В настоящей работе были экспериментально исследованы начальный этап ускорения и поведение плазмы в волноводе при наличии мощной электромагнитной волны. В исследованиях не ставилась задача обеспечить устойчивое ускорение плазменных сгустков и достижение больших энергий ускоренных частиц. Были изготовлены две установки, отличающиеся типом ускоряющей волны и методом инжекции плазмы. Для уменьшения диффузии плазмы на стенки волновода применялись внешние магнитные поля. Плазменные сгустки создавались в волноводе при вакууме  $10^{-7}$ — $10^{-6}$  мм рт. ст. как искровым инжектором

[4], так и источником плазмы с перепадом давления [5]. Проведенные исследования позволили получить первые экспериментальные данные по радиационному ускорению плазмы.

### Ускорение плазмы на волне $H_{01}$

Выбор волны  $H_{01}$  определялся следующими соображениями:

1. Конфигурация поля волны  $H_{01}$  такова, что допускает введение по радиусу и вдоль оси металлических стержней малого поперечного сечения без существенного искажения картины поля. Это позволяет расположить внутри ускоряющего волновода плазменную пушку и зонды.

2. Волна  $H_{01}$  — одна из волн низшего типа и сравнительно легко возбуждается.

3. Конфигурация электрического поля волны  $H_{01}$  исключает возникновение СВЧ-пробоев на стенке волновода.

Для осуществления радиационного ускорения плазмы на волне  $H_{01}$  была создана установка, схема которой показана на рис. 1. Мощность от СВЧ-генератора поступает по волноводному тракту через ферритовый вентиль в преобразователь волны (типа Кинга). Здесь волна типа  $H_{01}$  в прямоугольном волноводе трансформируется в волну типа  $H_{01}$  в круглом волноводе. Ускоряющий волновод представляет собой трубу из нержавеющей стали с толщиной стенки 1 мм. Такая труба обеспечивает малое затухание СВЧ-волны (около 0,2 дБ) и практически не экранирует внешнее импульсное магнитное поле. Между ускоряющим волноводом и преобразователем имеется вакуумно-плотное СВЧ-окно. Уско-