

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОСЫХ МАГНИТНО-ЗВУКОВЫХ ВОЛН

### БОЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ

В.Д.Русанов, В.П.Смирнов

Волны большой амплитуды, распространяющиеся в плазме под углом к магнитному полю, изучались рядом авторов [1-3]. Первая попытка наблюдения косых ударных волн предпринята в работе [4]. В

данной работе, являющейся развитием исследований линейных косых магнитно-звуковых волн [5], называемых иначе свистами, изучался переход к нелинейным волнам.

Косые волны большой амплитуды возбуждались ударным контуром с частотой 15 мГц. Магнитное поле  $H_z$  в центре витка, имевшего длину 30 мм и радиус 45 мм, нарастало до 800 э за  $2 \cdot 10^{-8}$  сек.

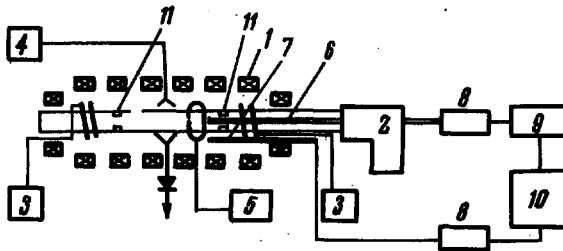


Рис. 1. Схема установки:

1 - Соленоид магнитного поля; 2 - вакуумная система с разрядным объемом; 3 - ВЧ - генераторы; 4 - система СВЧ - диагностики; 5 - ударный контур; 6 - измерительный зонд; 7 - запускающий зонд; 8 - линии задержки; 9 - усилитель; 10 - осциллограф; 11 - диафрагмы

Схема установки изображена на рис.1. Величина магнитного поля в однородной части соленоида менялась от 200 до 2000 э.

В рабочем режиме в камеру с внутренним диаметром  $2a = 78$  мм поступал водород, создавая давление от  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст. Ионизация производилась двумя ВЧ-генераторами. Величина концентрации при этом контролировалась по запиранию сигнала с  $\lambda = 8$  мм, а после быстрого выключения генераторов - по показаниям 8-миллиметрового интерферометра. Неоднородность распределения концентрации, определенная с помощью двойных электрических зондов, не превышала 20%. Зонды, диамагнитный датчик, ослабление пучка нейтральных атомов дают значение электронной температуры в диапазоне от 10 до 20 эв. Температура ионов, оцененная по контурам линий  $H_\beta$  и  $H_e I$ , была близка к 4 эв.

С помощью магнитного зонда, который мог перемещаться по

оси камеры, регистрировалась  $\tilde{H}_z$  - компонента поля волны. Полоса пропускания приемной системы равнялась 50 мГц. Распространение волны изучалось в зависимости от концентрации в диапазоне  $(10^{12} + 1,7 \cdot 10^{13}) \text{ см}^{-3}$ , от напряженности постоянного магнитного поля  $H_0$ , а также параметра  $q = \tilde{H}_{z \text{ max}} / H_0$ , где  $\tilde{H}_{z \text{ max}}$  - максимальная величина магнитного поля контура в центре витка ( $z = 0$ ) в отсутствие плазмы. Следует отметить, что на периферии при  $z = a$  отношение  $\tilde{H}_{z \text{ max}} / H_0$  в 1,5 раза превосходит  $q$ . По этой причине вблизи витка волна может существенно менять свою амплитуду.

Измерения были выполнены для значений  $q$ , лежащих в пределах от 0,2 до 1,7. В этих опытах расстояние  $x$  от центра витка до магнитного зонда менялось от 0 до 40 см. Было отмечено, что для малых величин  $q$  магнитное поле волны  $\tilde{H}_z$  и поле возбуждения в зазоре между витком и плазмой в основном совпадают по форме. Однако на переднем фронте видно появление пульсаций. Колебательная структура переднего фронта особенно четко проявляется при значительных  $q$ . При больших  $q$  волна в плазме при  $x < 2a$  образует возмущение с однонаправленным в основном магнитным полем. Особенности структуры волны на различных расстояниях от контура видны на рис.2. Здесь 1. а -  $d\tilde{H}_z/dt$  и  $\tilde{H}_z$  при  $x = 0, P = 20 \text{ дБ}, q = 0,9$ ; б -  $d\tilde{H}_z/dt$  и  $\tilde{H}_z$  при  $x = 0, P = 25 \text{ дБ}, q = 1,6$ . 2. а -  $d\tilde{H}_z/dt$  и  $\tilde{H}_z$  при  $x = 4 \text{ см}, P = 15 \text{ дБ}, q = 0,9$ ; б -  $d\tilde{H}_z/dt$  и  $\tilde{H}_z$  при  $x = 4 \text{ см}, P = 20 \text{ дБ}, q = 1,6$ . 3. а -  $d\tilde{H}_z/dt$  и  $\tilde{H}_z$  при  $x = 7 \text{ см}, P = 15 \text{ дБ}, q = 0,9$ ; б -  $d\tilde{H}_z/dt$  и  $\tilde{H}_z$  при  $x = 7 \text{ см}, P = 15 \text{ дБ}, q = 1,6$ . 4 -  $\tilde{H}_z$  при  $z = a, x = 0$ . 5 -  $f = 100 \text{ мГц}$  ( $P$  - коэффициент ослабления сигнала на входе приемной системы).

Вычисленные из осциллограмм характерные пространственные размеры колебаний на фронте примерно отвечают формуле  $c/\Omega_\alpha (\pi/2 - \theta)$ , где  $c$  - скорость света,  $\Omega_\alpha$  - ионная ленгмювская частота,  $\theta$  - угол между направлением распространения и постоянным магнитным полем.

Экспериментально было подтверждено влияние магнитного поля волны на скорость ее распространения. В частности, отношение ско-

постей волн сжатия и разрежения близко к  $(2H_0 + \tilde{H}_{max}) / (2H_0 - \tilde{H}_{max})$ .

Изучена зависимость максимального магнитного поля волны от максимального поля возбуждения. При  $z < a$  она нелинейна, что для больших  $Q$  в основном, по-видимому, объясняется нелинейными

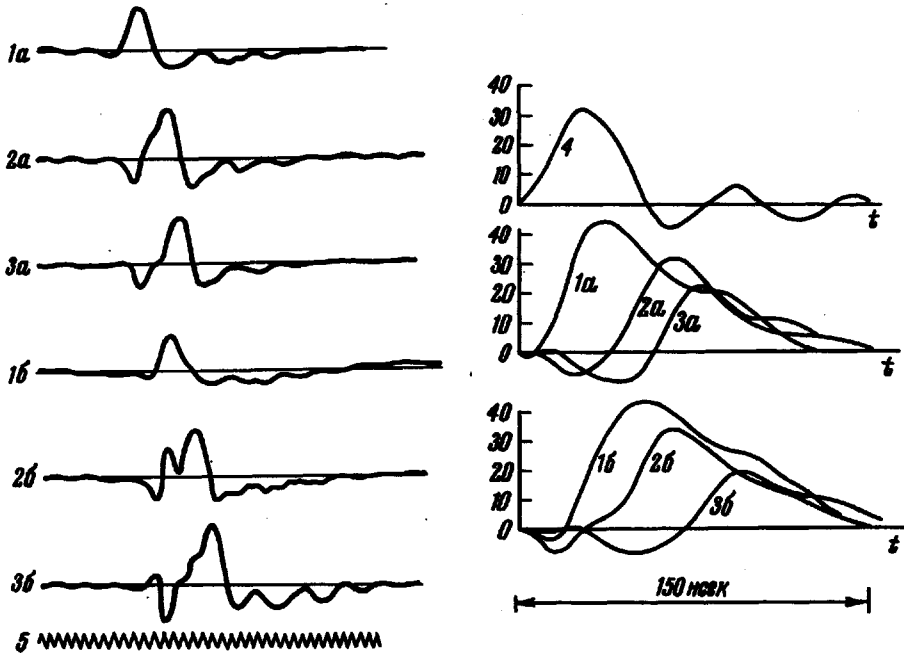


Рис. 2. Осциллограммы производной магнитного поля волны (левая часть рисунка) и их интегралы ( $n = 1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $H_0 = 350 \text{ э}$ ) (величины интегралов выражены в отн. ед.)

механизмами поглощения. Отметим, что для условий нашего разряда вплоть до промежутка времени в  $10^{-7}$  сек волну можно считать бесстолкновительной. Вблизи контура это условие выполняется. Однако на расстояниях  $z > 3a$  для  $n_e = 1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $H_0 = 350 \text{ э}$  из-за расплывания характерное время волны достигает  $(2+3) \cdot 10^{-7}$  сек. В этом случае столкновения могут влиять на затухание. В области  $4a < z < 6a$ , где расплыванием можно пренебречь, длина затухания волны равна 8 см, причем отношение максимального магнитного поля волны в этом эксперименте к постоянному составляло 0,2.

Измерения декремента затухания контура показывают, что с увеличением  $q$  он растет. При  $q = 0,8$  и  $n_e = 1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  в плазму передается 20% первоначальной энергии контура. В режиме послесвечения наблюдалось увеличение концентрации плазмы после срабатывания контура. Энергия электронов, затраченная на дополнительную ионизацию, в пределах точности измерений соответствует потерям контура. Предварительные измерения, сделанные при величине концентрации, близкой к  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ , указывают на наличие мягкого рентгеновского излучения с мишени, расположенной на промежуточном радиусе в 14 см от возбуждающего витка.

Таким образом в данных экспериментах наблюдались косые нестационарные волны, обладавшие нелинейным характером распространения и затухания. Для предельных значений параметра  $q$  такие волны по структуре близки к косым ударным волнам.

Авторы считают своим долгом выразить признательность Е.К.Завойскому за постоянный интерес к работе и Ю.Г.Калинину за участие в работе.

Поступило в редакцию  
2 августа 1965 г.

#### Литература

- [1] А.А.Веденов, Е.П.Велихов, Р.З.Сагдеев. Ядерный синтез, 1, 82, 1961.
- [2] В.И.Карпман. ЖТФ, 33, 959, 1963.
- [3] K.W. Morton. Phys. Fluids, 7, III, p. 1, 1800, 1964.
- [4] А.М.Искольдский, Р.Х.Куртмулдаев, Д.Е. Нестеркини, А.Г.Пономаренко. ЖЭТФ, 47, 774, 1964.
- [5] И.А.Кован, Б.И.Патрушев, В.Д.Русанов, В.П.Смирнов, Д.А.Франк-Каменецкий. Конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Зальцбург, 1961, стр. 205.