

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АКАДЕМИИ НАУК СССР

Совет физической секции Объединённого учёного
совета по физико - математическим и техническим
н а у к а м

На правах рукописи

А.Г.ПОНОМАРЕНКО

ИЗУЧЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ТУРБУЛЕНТНОЙ

П Л А З М Ы

Автореферат диссертации, представ-
ленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук.

г.Новосибирск

1965

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АКАДЕМИИ НАУК СССР

Совет физической секции Объединённого учёного
совета по физико-математическим и техническим
н а у к а м

На правах рукописи

А. Г. ПОНОМАРЕНКО

ИЗУЧЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ТУРБУЛЕНТНОЙ

П Л А З М Ы

Автореферат диссертации, представ-
ленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
кандидат - физико -
математических наук

Ю. Е. НЕСТЕРИХИН

г. Новосибирск

1965

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Совет физической секции Объединённого учёного совета
по физико-математическим и техническим наукам

г. Новосибирск, 72, Морской проспект, 32, тел. 9-74-II

"20" апреля 1965г. - 28-I-809/т/389.

Совет физической секции объединённого учёного совета по физико-математическим и техническим наукам Сибирского отделения Академии наук СССР направляет Вам для ознакомления автореферат диссертации А.Г. Пономаренко "Изучение высокочастотных свойств турбулентной плазмы", представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

ЗАВЕРЕННЫМ УЧРЕЖДЕНИЕМ отзыв о диссертации (в 2-х экземплярах) просим направить в адрес физической секции объединённого учёного совета.

О дне и времени защиты будет объявлено за 10 дней до защиты в газете "Советская Сибирь".

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
Совета физической секции
Объединённого учёного совета
Член-корреспондент АН СССР

С.Т. БЕЛЯЕВ

ДИССЕРТАЦИЯ ВЫПОЛНЕНА
в Институте ядерной физики Сибирского отделения
Академии наук СССР

Представленная диссертация посвящена некоторым вопросам экспериментального исследования турбулентного состояния плазмы. Изучение турбулентных процессов в плазме в последнее время становится очень важным, так как в большинстве практических случаев лабораторная плазма, вследствие развития различного рода неустойчивостей, переходит в турбулентное состояние /1/.

В первой части диссертации приведены результаты исследований некоторых свойств низкотемпературных плазм, полученных в обычных газовых разрядах (в.ч. разряд и разряд с осциллирующими электронами). Были обнаружены и исследованы неустойчивости, возникающие как в процессе создания плазмы, так и вызываемые извне, с помощью различного рода возмущений (в.ч. электро-магнитные поля, собственные шумы разряда и т.д.). Подробно изложены диагностические методы, использованные при измерениях, в том числе способ определения локальной концентрации заряженных частиц и в.ч. проводимости плазмы в магнитном поле.

В экспериментах, описанных в /2/, было показано, что в плазме обычного в.ч. разряда при достаточно больших амплитудах в.ч. полей может быть получен турбулентный режим, в котором взаимодействие между частицами не может быть объяснено обычной ламинарной теорией (т.е. парными соударениями типа: электрон - нейтрал). Измерение величины эффективной частоты столкновений электронов и ионов осуществлялось с помощью определения зависимости высокочастотной проводимости ионов и электронов в области

циклотронных резонансов (ω_{ce} и ω_{ci}). Как показывает теория и эксперимент /3,4/, полуширина резонансной кривой в этом случае непосредственно связана с эффективной частотой столкновений $\Delta\omega_c = \nu_{ef}$. Несмотря на очевидные преимущества указанного выше метода определения ν_{ef} - он обладает существенным, правда, не принципиальным, недостатком: невозможностью получить достаточно подробной зависимости величины ν_{ef} от магнитного поля, ибо для этого необходимо иметь в.ч. генераторы, работающие в очень широком диапазоне частот.

Пусть на плазменный стержень прямоугольной формы наложено внешнее в.ч. электрическое поле (длина волны $\lambda \gg x$). Магнитное поле H_0 направлено вдоль оси z . Будем считать, что начальная температура плазмы равна нулю. Движением ионов под действием в.ч. поля также пренебрегаем ($\vec{E} = \vec{E}_{ox} e^{i\omega t}$; $\omega > \omega_{ci}$).

При этих предположениях поглощение в.ч. энергии (джоулево тепло) в среднем по времени в единице объема равно:

$$P_1 = \frac{E_{ox}^2}{2m} \frac{ne^2}{\omega_{ce}^2} \cdot \nu_{ef} \cdot \frac{1}{\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{xy}^2}; \quad (1)$$

$$\text{при } (\omega - \omega_{ce})^2 \gg \nu_{ef}^2 \quad (2)$$

$$\epsilon_{xx} = 1 - \frac{\omega_{oe}^2}{\omega^2 - \omega_{ce}^2}; \quad \epsilon_{xy} = -i \frac{\omega_{oe}^2 \omega_{ce}}{\omega(\omega^2 - \omega_{ce}^2)}. \quad (3)$$

Если параметры плазмы подобрать таким образом, чтобы реактивные эффекты, искажающие внешнее в.ч. поле, были пренебрежимо малы, т.е.

$$\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{xy}^2 \rightarrow 1, \quad (4)$$

окончательно получаем:

$$P_1 = \sigma_1 E_{ox}^2; \quad \sigma_1 = \frac{ne^2}{m} \cdot \frac{\nu_{ef}}{\omega_{ce}^2}. \quad (5)$$

При известной зависимости $n(H_0)$ измерение величины P_1 позволяет не только установить значение величины σ_1 , но и сделать вполне определённые заключения о характере диффузии поперёк магнитного поля. Коэффициент амбиполярной диффузии D_1 , при выполнении следующих неравенств $\frac{\omega_{ce}}{\nu_{ef}} \gg \frac{\omega_{ci}}{\nu_{if}} \gg 1$, (для плазм с низкой степенью ионизации и $T_e \gg T_i$, они почти всегда справедливы) выражается следующим образом;

$$D_1 = 2D_1^- = \frac{2D_0}{\omega_{ce}^2} \cdot \nu_{ef} = \frac{kT_e}{m_e} \cdot \frac{\nu_{ef}}{\omega_{ce}^2}. \quad (6)$$

Таким образом, из (4) и (5) следует, что если $n(H_0)$ и $T_e(H_0) = const$, в.ч. проводимость σ_1 и коэффициент диффузии D_1 определяются одним и тем же множителем ν_{ef}/ω_{ce}^2 .

Поскольку значение ν_{ef} , обусловленное только парными соударениями, является теоретически и экспериментально хорошо известным, то отклонения, наблюдаемые в плазме от этих значений, должны быть непосредственно связаны с турбулентностью плазмы.

Экспериментально определялись одновременно величины $\sigma_1(H_0)$ и

$n(H_0)$. Используя выражение (5), можно было определить величину $\nu_{ef}(H_0)$. В качестве контрольных измерений нами применялись методы определения ν_{ef} с помощью циклотронных резонансов /4/.

Для измерения величины $\sigma_1(H_0)$ применялась схема, аналогичная использованной ранее /2/. Плазма, находившаяся в однородном магнитном поле $H_0 = 0-5$ кэрст., помещалась между пластинами плоского конденсатора, являвшегося элементом колебательного контура с добротностью $Q \sim 120 + 150$. Внешнее высокочастотное электрическое поле зондирующего сигнала ориентировалось перпендикулярно

магнитному полю. При незначительной реактивности $\epsilon_{\perp} \rightarrow 1$, напряжение на конденсаторе, прокалиброванное с помощью безиндуктивных сопротивлений, зависело от величины эквивалентного сопротивления плазменного стержня.

Для измерения величины $n(N_0)$ был использован принцип резонансного зондирования плазмы в магнитном поле /5/.

Сущность резонансного зондирования состоит в раскачке собственных колебаний в ограниченном объёме плазмы с помощью электромагнитного сигнала, например, переменным электрическим полем. Ограниченность объёма характеризуется соотношением $\frac{\omega}{c} \gg r$, где ω — частота зондирующего сигнала, r — размер возбуждаемого участка плазмы в направлении поля.

При этом, в предположении резкой границы между полем и плазмой, происходит поляризация данного объёма и, как следствие этого, изменение электрического поля внутри него за счёт колебаний зарядов (электронов, ибо рассматривается в.ч. колебания) под действием внешнего сигнала. Поле в плазме \vec{E}' зависит от величин ω , ω_{ce} и $\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi n e^2 L}{m}}$ — ленгмювская электронная частота; $\omega_c = \frac{eH_0}{mc}$ — электронная и циклотронная частота и L — геометрический фактор поляризации.

Теория и эксперимент показывают, что при выполнении условий, налагаемых как на параметры зондирующего устройства (величина ω), так и на параметры, характеризующие состояние плазмы в магнитном поле (ω_{oe}^2 и ω_{ce}^2), которые заключаются в том, что

$$\frac{\omega_{oe}^2}{\omega^2} = 1 \pm \frac{\omega_{ce}}{\omega}; \quad \frac{\omega_{oe}^2}{\omega^2} = 1; \quad \frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_{ce}}{\omega^2};$$

поле в плазме \vec{E}' действительно испытывает резонансное возрастание. В качестве наиболее удобного способа возбуждения была выбрана система типа "диполь Герца". Плазма создавалась в стеклянной колбе в форме куба ($\ell = 4$ см), помещённого между пластинами плоского конденсатора, являвшегося элементом колебательного контура генератора ($f = 30$ мгц, мощность — 300 вт). Генератор работал в непрерывном режиме, рабочий газ — гелий и воздух, давление $p \sim 3 \cdot 10^{-2} + 10^{-1}$ мм рт.ст. Поджигающий конденсатор и сама колба располагались между полюсами электромагнита. Магнитное поле H_0 могло плавно изменяться от 0 до 4 кэрст. и имело направление, совпадающее с в.ч. полем поджига. Основные результаты измерений состоят в следующем:

а). "Ленгмювский резонанс" $\frac{\omega_{oe}^2}{\omega^2} = 1$ и ветвь $\frac{\omega_{oe}^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_{ce}}{\omega}$ позволяют измерять плотность n и частоту соударений электронов в плазме в магнитном поле при $\frac{\omega_{ce}}{\omega} < 1$.

б) Ветвь $\frac{\omega_{oe}^2}{\omega^2} = 1 + \frac{\omega_{ce}}{\omega}$ даёт возможность на частоте $\omega = \frac{\omega_{oe}^2}{\omega_{ce}}$ при $\frac{\omega_{ce}}{\omega} > 1$ измерять концентрации электронов, превышающие критические в $\frac{\omega_{ce}}{\omega}$ раз.

в) Значение n — усредняется только по области, занимаемой приёмным зондом, размеры которого достаточно малы, что и позволяет получить информацию о локальных характеристиках плазмы.

Одновременное измерение величин $\sigma_{\perp}(H_0)$ и $n(H_0)$ позволило показать, что турбулентный режим, возникающий в плазме вследствие развития неустойчивости (в разряде с осциллирующими электронами это состояние плазмы определялось значением критического магнитного поля $H_{кр}$, а в в.ч. разряде — амплитудой в.ч. электрическо-

го поля) действительно характеризуется повышенным микроскопическим взаимодействием заряженных частиц, т.к. величина V_{ef} и зависимость её от магнитного поля, найденная из (5), существенно отличалась от значения V_{ef} , вычисленного из обычной теории парных соударений /6/.

II. Вторая часть диссертации посвящена изучению коллективных свойств плазмы при возбуждении в ней сильных бесстолкновительных ударных волн.

Из ряда теоретических и экспериментальных работ следует, что в разреженной плазме могут распространяться ударные волны с толщиной фронта значительно меньшей длины свободного пробега /7/. Если на границе холодной плазмы, находящейся в квазистационарном магнитном поле H_0 , быстро наращивать переменное магнитное поле \tilde{H} , играющее роль поршня, то в плазме будет распространяться магнитогидродинамическое возмущение (ударная волна) со скоростью $V > \frac{H_0}{\sqrt{4\pi\rho}}$. Существенная особенность бесстолкновительных ударных волн состоит в том, что начиная с определённого значения $M = \frac{\tilde{H}}{H_0} > 3 \div 4$, т.е. когда фронт волны из-за нелинейности станет достаточно крутым, в плазме самопроизвольно возникнут интенсивные плазменные колебания.

В главе I кратко рассмотрены основные положения теории бесстолкновительных ударных волн, обсуждаются вопросы, связанные с выяснением структуры и особенностями распространения волны, толщиной её фронта, скоростью движения и т.д. На основании качественных рассуждений и некоторых оценок делается вывод о возможности эффективного нагрева плазмы бесстолкновительными ударными

ми волнами. Качественно картину нагрева плазмы можно представить следующим образом: при движении сильной ударной волны по разреженной плазме на её фронте при $U_{max} > \sqrt{\frac{kT_e}{m_e}}$ возбуждаются колебания, плазма переходит в турбулентное состояние, в результате чего происходит интенсивный нагрев электронов /8/. Однако эксперимент показывает и наличие горячих ионов при достаточно больших числах Маха.

Разумным предложением для объяснения механизма нагрева ионов в такой волне является привлечение картины, подобной "изомагнитному скачку". В магнитной газодинамике это явление, возникающее внутри фронта ударной волны при $M > 3 \div 4$ хорошо известно. Для случая разреженной плазмы в работе /7/ подобный процесс представлен как опрокидывание фронта волны с одновременным образованием трёхпоточкового движения. Вследствие неоднородности магнитного поля происходит размешивание фаз вращения ионов и это трёхпоточковое распределение превращается в непрерывное. Кроме того, существует и второй эффект: многопоточковое движение ионов может быть неустойчиво.

Таким образом, по-видимому, ионные колебания могут также эффективно способствовать перераспределению и хаотизации энергии направленных встречных потоков в опрокинувшейся волне.

Во второй главе описаны эксперименты по возбуждению сильных ударных волн в движущемся плазменном ступке /9-12/. Эта задача имеет практическое значение в связи с проблемой инжекции быстрых плазматидов в магнитную ловушку. Теория и эксперимент /13/ утверждают, что при выполнении условия $(\tau_i < \frac{Mv_{ii}^2}{2} < \tau_e)$ существует возможность эффективной передачи направленной энергии плазматидов при их встречном движении в хаотическую, т.е. в тепло за

счёт развития быстрой турбулентности, связанной с ионной неустойчивостью. Результаты наших опытов указывают на возможность быстрого прогрева ударными волнами электронной компоненты плазменного ступка (при $n \approx 10^{13} + 10^{14}$, максимальная энергия электронов оказалась равной $40 + 25$ кв).

В 3-ей главе описываются эксперименты по возбуждению сильных ударных волн (число Маха > 3) в разреженной плазме, находившейся в магнитной ловушке ($H_0 = 0 - 2$ кэрст, α - пробочное отношение = 1,5) § 1-й посвящен изложению опытов по созданию предварительной плазмы методом внешней инжекции. Сочетание импульсного напуска газа с последующей его ионизацией, нагревом и выталкиванием с помощью конического β -пинча, располагавшегося вне пробкотрона, сквозь одну из пробок внутрь магнитной ловушки позволило получить плазму со следующими параметрами: $n \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx T_i \approx 200$ эв, τ - время удержания ~ 180 мксек.

Во втором параграфе приведены результаты опытов по непосредственному измерению ширины фронта ударной волны, предпринятому с помощью различных методов наблюдения (скоростная фотография - ЗОП, ФЭУ, магнитные и рентгеновские датчики). На основании полученных данных делается вывод о возможности существования ударных волн, основные свойства которых (ширина фронта, его структура и т.д.) определяются "коллективными" свойствами плазмы /14/.

В 3-ем параграфе описываются эксперименты по нагреву дейтериевой плазмы, находящейся в магнитной ловушке, сильными бесстолкновительными ударными волнами /15/. Совокупность оптических, магнитных, масс-спектроскопических измерений, а также ин-

тенсивность и энергетическое распределение рентгеновского и нейтронного излучения позволяет утверждать, что в условиях этого опыта был осуществлён интенсивный нагрев ионов плазмы. Температура ионов оказалась равной примерно 7-10 кв.

Появление ионов, получивших за время $t \approx 50 \cdot 10^{-9}$ сек (значительно меньшее характерных времён столкновений ион-ион, ион-электрон) энергию в несколько киловольт может быть объяснено возникновением турбулентных пульсаций на фронте волны и процессами, связанными с кумуляцией на оси камеры.

Если в первой части работы показано, что изменение состояния плазмы, осуществляемое при помощи внешних возмущений (магнитное поле в разряде с осциллирующими электронами или же сильное высокочастотное поле в в.ч. разряде) приводит к возникновению колебаний и появлению значительно более эффективного взаимодействия частиц друг с другом, то вторая часть диссертации указывает на возможность использования "коллективных свойств" плазмы для её нагрева в том случае, когда джоулева диссипация пренебрежимо мала. Экспериментальные результаты (см. 2 часть § 3) подтверждают реальную возможность быстрой передачи энергии внешнего магнитного поля \tilde{H} частицам плазмы с помощью возбуждения сильных бесстолкновительных ударных волн.

Основные результаты работы представлены в следующих статьях и докладах : /5,6,9 - 12, 14,15/.

Л и т е р а т у р а

1. Кадомцев Б.Б. Вопросы теории плазмы. Вып.4, 188 (1964) Атомиздат.
2. Дубовой А.В., Пономаренко А.Г., Швец О.М., Труды второго всесоюзного совещания по теоретической и прикладной магнитной гидродинамике. Сборник "Вопросы гидродинамики и динамики плазмы. Том II, стр. 355 (1962). Изд. АН. Латв. ССР. г.Рига.
3. Kelly C., Margenau H., Brown S., *Phys. Rev.* 108(6), 1367, (1957).
4. Дубовой Л.В., Пономаренко А.Г. *ЖТФ* 31, в.7 (1961)
5. Давидовский В.Г., Дубовой Л.В., Пономаренко А.Г., *ЖТФ*, т.34 в.7 (1964).
6. Дубовой Л.В., Корнилов В.А., Пономаренко А.Г.. Сборник трудов межвузовской научной конференции по новой технике (январь 1962 стр.104 Москва (1964).
7. Сагдеев Р.З. "Вопросы теории плазмы" том4, (1964г), Атомиздат.
8. Бабыкин М.В., Гаврин П.П., Завойский Е.К., Рудаков Л.И., Скорюпин В.А.. *ЖЭТФ* 46, 511, (1964).
9. Куртмуллаев Р.Х., Нестерихин Ю.Е., Пономаренко А.Г. *ПМТФ*, № 6, 144, (1964г.)

10. Куртмуллаев Р.Х., Нестерихин Ю.Е., Пономаренко А.Г., *ЖТФ*, т.34, № 1, 189 (1964).
11. Куртмуллаев Р.Х., Нестерихин Ю.Е., Пономаренко А.Г. *Теплофизика высоких температур*, 5, 661 (1964).
12. Куртмуллаев Р.Х., Малиновский В.К., Нестерихин Ю.Е., Пономаренко А.Г., *ПМТФ*, № 1, (1965).
13. Завойский Е.К. . *Атомная энергия* 14, 57 (1963).
14. Искольдский А.М., Куртмуллаев Р.Х., Нестерихин Ю.Е., Пономаренко А.Г. *ЖЭТФ*, т.47 в.8, (1964г)
15. Искольдский А.М., Куртмуллаев Р.Х., Лукьянов В.Н., Нестерихин Ю.Е., Пономаренко А.Г. Доклад на четвертом Рижском совещании по магнитной гидродинамике. 25 июня 1964г. г.Рига. *Магнитная гидродинамика*. № 1 (1965).

Ответственный за выпуск В.П. Лукьянов
Подписано к печати 3.02.65 МНО2542
формат бумаги 270 x 190, тираж 200
заказ № Бесплатно

Отпечатано на ротапринтере в Институте
ядерной физики СО АН СССР.