

Главный редактор

М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ

Заместители главного редактора:

Н. А. ВЛАСОВ, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, И. Н. ГОЛОВИН,
Н. А. ДОДЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, А. К. КРАСИН,
А. Н. ЛЕЙБУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, И. П. ПАЛЕЙ,
Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМЕРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

И. П. Ларский, П. П. Корешков, П. И. Моисейев. Уровни внешнего облучения персонала при работах с различными источниками излучений	463
Г. Б. Усатин. Расчет состава топлива и характеристика быстрого энергетического реактора в установившемся режиме	466
В. И. Гришков, В. А. Афанасьев, Г. А. Сапковский, Р. А. Шугам, И. Н. Соколов, Ю. А. Соловьев. Исследование системы автоматического регулирования атомной энергетической установки с кипящим реактором	469
В. И. Павловский, Л. Л. Финштейн. К выводу уравнения динамики паросодержания в парогенерирующих каналах при кипении перегретой воды	474
Р. Г. Васильков, В. И. Гольданский, Я. В. Ершовец, О. С. Лукиндин, Б. А. Нименов. Нейтронные выходы и потоки тепловых нейтронов в системе сшивки — вода, бомбардируемой протоками высоких энергий	479
А. П. Тугаринов, Г. Е. Ордынец, Р. И. Щенякова, Е. И. Крыськов. Об использовании палладий изотопного состава свинца при изменении уранового региона	483
В. С. Ермеев. Исследование динамики углерода на монокарбиде урана в молибдене и полибране	489
А. В. Давыдов, Е. С. Давышин, И. Н. Палей, Г. А. Прибылова. Соединения ионов Pa(V) в растворах галогенводородов	493
Ю. А. Сахаровский, Я. Д. Бельвинский. Экспериментальное определение значения коэффициента распределения при обменном обмене между жидким амальгамом и водной фазой	499
И. А. Копан, Л. И. Козаровицкая, И. М. Подгорный, В. А. Рязань, В. П. Смирнов, А. М. Спектор, Д. А. Франк-Камецкий. Нагрев плазмы магнитно-звуковыми волнами	503
Г. В. Яковлевский, Ю. И. Серебряков. Развитие неустойчивости пучка электронов в магнитном ускорителе	507
АННОТЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ	
Г. А. Сапковский, В. П. Гришков, Л. Л. Полтавцева, В. И. Плотинский. Методика исследования устойчивости водо-водяного кипящего реактора	514

В. Б. Дубровский, Ш. Ш. Ибрагимов, М. Я. Екин, А. Р. Тадыгин, Б. К. Пергаменцев. Устойчивость серпентинного б	515
Г. Я. Рязанцев, В. С. Дмитриева. Исследования в среде с пустым те	516
И. А. Иванов, Н. Ф. Прандок. Возможности использования молибдена и вольфрама для оценки относительного распределения изотопов быстрых нейтронов в реакторе	517
Л. Л. Бродер, С. А. Колосовский, в. С. Клыжуров, К. К. Попков, А. А. Сметанин. Прохождение быстрых нейтронов и излучения через прямоуг	517
И. П. Зольников, К. А. Суханова, Б. Л. Двининин. Энергетическое и пространственное распределение обратно рассеянного излучения	518
И. К. Карпенко. Полоидальные волны в минимум среднего магнитного поля в двухзаконном стеллараторе	518
И. К. Карпенко. Возможность существования магнитной ямы в комбинированном поле одного двухзаконного стелларатора	519
М. И. Авраменко, В. С. Кузнецов. К вопросу о расчете фазовой фокусировки итенициных ионных пучков	520
ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ	
Э. А. Стумбур. О некоторых интегральных соотношениях в теории реакторов	522
О. А. Мизлер, А. М. Демидов, Ф. И. Овчинников, Л. И. Голубев, М. А. Сумчаганов. Гамма-спектры теплоносителя реактора первого блока Ново-Воронежской АЭС	524
Г. Г. Завени, И. А. Горак, Н. Т. Скаир, И. А. Тонанй. Сечение радиационного захвата быстрых нейтронов изотопами Cu^{63} , Cu^{65} и W^{186}	526
С. Б. Ермагамбетов, Г. Н. Смиреники. Сечение деления Pu^{238} быстрыми нейтронами	527
А. Г. Доббенко, В. Е. Козесов, В. П. Королева, В. А. Толстиков, Ю. Н. Шубин. Сечение радиационного захвата нейтроном с энергией 0,2—3 Мэв ядрами Te^{128} и Te^{130}	529
Л. И. Прохорова, Г. Н. Смиреники, Ю. М. Турчин. Среднее число мгновенных нейтронов при спонтанном делении Pu^{242}	530



РЕПОЗИТОРИЙ ИМЕНА Ф. СКОРИНЫ

Сравнение экспериментальных и рассчитанных по уравнению (11) значений коэффициентов разделения Таблица 2

T, °C	ν	α (эксперимент)	α (по уравнению (11))	δ^*
-70	0,060	7,91±0,16	8,15	0,385
	0,108	7,83±0,11	7,98	
-40	0,081	5,74±0,07	5,75	0,316
	0,143	5,72±0,07	5,65	
-20	0,095	4,80±0,05	4,81	0,282
	0,169	4,68±0,04	4,71	
0	0,109	4,12±0,04	4,10	0,262
	0,191	4,03±0,03	4,01	
+20	0,126	3,50±0,03	3,57	0,231
	0,219	3,41±0,03	3,48	
	0,238	3,40±0,03	3,47	
	0,410	3,36±0,02	3,33	
+40	0,137	3,17±0,03	3,18	0,208
	0,237	3,06±0,02	3,10	
	0,435	3,02±0,02	2,97	
+60	0,150	2,85±0,03	2,87	0,190
	0,258	2,75±0,03	2,81	
+95	0,174	2,40±0,03	2,44	0,175
	0,288	2,36±0,03	2,40	

* При расчете величины δ были использованы значения констант равновесия k_0 , приведенные в работе [8].

расчетные и экспериментальные величины достаточно хорошо совпадают. Следовательно, уравнение (11) можно рекомендовать для вычисления коэффициентов разделения в широкой области концентраций дейтерия.

Нагрев плазмы магнитно-звуковыми волнами

И. А. КОВАН, Л. Л. КОЗОРОВИЦКИЙ, И. М. ПОДГОРНЫЙ, В. Д. РУСАНОВ,
В. П. СМЕРНОВ, А. М. СПЕКТОР, Д. А. ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ

УДК 533.9

Нагревание ионов при магнитно-звуковом резонансе. Вынужденные радиальные колебания однородного плазменного цилиндра в постоянном магнитном поле имеют резонансный характер, если собственная частота плазменного цилиндра совпадает с частотой внешнего продольного переменного поля. Это явление, получившее название магнитно-звукового резонанса, было теоретически предсказано [1], а затем в 1960 г. обнаружено и исследовано экспериментально [2]. Резонансное увеличение амплитуды переменного магнитного поля в плазме

Выводы

1. Проведено экспериментальное определение коэффициента разделения изотопов водорода при обмене между водородом и жидким аммиаком в широком температурном интервале от -70 до $+95$ °C.

2. Найдено, что зависимость α от температуры выражается уравнением $\lg \alpha = A/T + B$, причем величина коэффициента $A = 235$, что хорошо согласуется с расчетными данными Бигеляйзена.

3. Экспериментально установлено, что коэффициент разделения существенно зависит от концентрации дейтерия. Предложено уравнение, удовлетворительно описывающее зависимость α от концентрации.

4. В области малых концентраций дейтерия для определения можно использовать данные Бигеляйзена.

Поступила в редакцию 18/X 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

- С. Е. Казинина, Б. А. Трубицын, И. М. Гельперин. «Химическая промышленность», № 41, 861 (1965).
- Chem. Eng. Techn., 37, 1185 (1965).
- V. Desfrancois. Доклад 28/P/91, представленный Францией на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
- Nucl. Engng, 9, 405 (1965).
- M. Perlman, J. Bigeleisen. J. chim. phys. et phys.-chim. biol., 21, 70 (1953).
- G. Dirian, J. Ravoit. J. Chem. phys., 60, 130 (1963).
- А. М. Розен. Теория разделения изотопов в колоннах. М., Атомиздат, 1958.
- И. Киршенбаум. Тяжелая вода. М., Изд-во иностр. лит., 1953.

по сравнению с амплитудой поля в вакууме (эффект пространственного усиления переменного поля) описано в работах [3, 4].

В настоящей работе рассмотрены возможности использования магнитно-звукового резонанса для нагревания ионной компоненты плазмы [5]. Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Цилиндрическая вакуумная камера, изготовленная из стекла, размещалась коаксиально с соленоидом, создающим постоянное магнитное поле напряженностью 2 кэ. Колебания в плазме воз-

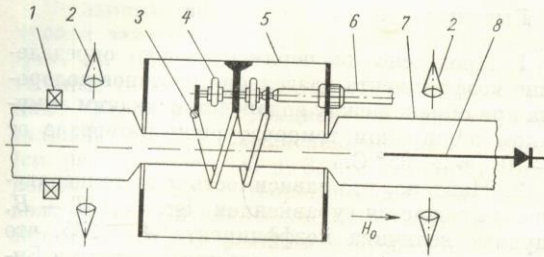


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — диамагнитный датчик; 2 — антенны интерферометра; 3—6 — элементы ВЧ-контура; 7 — стеклянная вакуумная камера; 8 — магнитный зонд.

буждались ВЧ-контуром. Амплитуда ВЧ-поля в вакууме составляла 75 э, при этом мощность, передаваемая плазме в импульсе длительностью 3 мсек, достигала 300 квт. Частота колебаний была равна 20 Мгц. Эксперименты проводились при начальном давлении водорода в камере $5 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Через несколько десятков микросекунд после включения ВЧ-генератора происходил пробой газа. Диаметр образовавшегося столба плазмы был равен диаметру камеры под ВЧ-контуром (6 см).

Изменение концентрации плазмы регистрировалось интерферометром, работающим на длине волны 8 мм. Антенны интерферометра и магнитный зонд располагались на расстоянии 3 см от края контура. Осциллограммы набегов фазы и напряженности ВЧ-поля представлены на рис. 2. Зависимость амплитуды компоненты \vec{H}_z от времени в этой точке имеет максимум при концентрации $n = 1,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Частота радиальных магнитно-звуковых колебаний, вычисленная для этого значения концентрации,

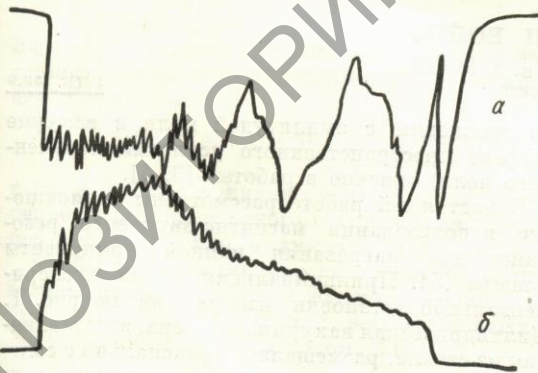


Рис. 2. Интерферограмма, полученная на длине волны $\lambda = 8$ мм (а), и осциллограмма напряженности ВЧ-магнитного поля в плазме (б).

с точностью до 20% совпадает с резонансной частотой в центре контура. Отметим, что в этих условиях эффект пространственного усиления мал (напряженность ВЧ-поля в плазме составляла $1,2 \vec{H}_z$ в вакууме). Однако совпадение частот, а также пространственное распределение ВЧ-полей в плазме позволяют сделать вывод о возбуждении магнитно-звукового резонанса на основной моде колебаний.

Увеличение давления плазмы при нагревании магнитно-звуковыми волнами регистрировалось по диамагнетизму плазмы. Величина газокINETического давления, измеренная по диамагнитному эффекту, составляла $\sim 2 \cdot 10^{13}$ эв·см⁻³. Подставляя измеренное значение концентрации $n = 1,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³, получим $T_i + T_e = 140$ эв. Температура электронов, оцененная из анализа интегрального спектра, равна ~ 10 эв. Этот результат можно объяснить нагреванием ионов до температуры, большей 100 эв.

Исследование распада плазмы после выключения ВЧ-генератора в момент времени, соответствующий максимуму nT , подтвердило, что диамагнитный эффект практически полностью определяется давлением ионов. На рис. 3 приведены осциллограммы диамагнитного сигнала и интерферометра распадающейся плазмы. Постоянная спада диамагнитного сигнала составляет 10 мсек. За это время концентрация изменяется не более чем на 10%, а уменьшение температуры электронов в e раз, определенное по спадаанию интенсивности спектральных линий водорода, происходит за время, меньшее чем 3 мсек.

Измерение распределения ВЧ-полей в стационарном режиме и их затухания в распадающейся плазме показало, что давлением поля волны по сравнению с давлением плазмы можно пренебречь. Измерение доплеровского уширения линий O^+ и Si^{++} дает значение температуры этих ионов, равное 20—30 эв.

Факт нагревания ионов не может быть объяснен в рамках классических механизмов диссипации энергии магнитно-звуковых волн. В принципе аномальная диссипация полей может происходить вследствие возбуждения ВЧ-потенциальных волн в плазме. Для проверки этого предположения был поставлен эксперимент с целью определения средней величины электрического поля в плазме. Анализ уширения спектральных линий водорода показал, что среднее значение электрического поля составляет 200—400 в/см. Это значение в пределах точности измерений совпадает с величиной радиального электрического поля магнитно-звуко-

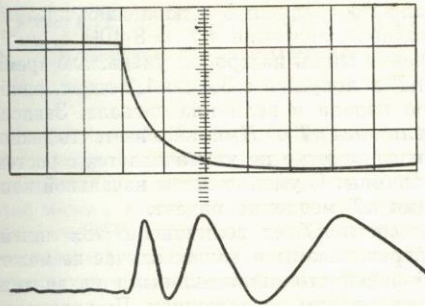


Рис. 3. Характеристики распадающейся плазмы (длительность развертки 10 мксек/см):
вверху — диамагнитный сигнал; внизу — интерферограмма.

вой волны и поэтому не дает возможности однозначно определить плотность энергии шумов. Однако на аномальный характер затухания магнитно-звуковой волны указывает также значение эффективной частоты столкновений ионов ($\nu_{iэфф} \approx 2 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$), отвечающее полной потере импульса радиально-массового движения. Величина $\nu_{iэфф}$, полученная несколькими независимыми способами, на три порядка превышает частоту кулоновских столкновений.

Данные, приведенные в настоящей работе, свидетельствуют о том, что магнитно-звуковой резонанс можно использовать для передачи энергии непосредственно ионной компоненте плазмы. Метод магнитно-звукового резонанса позволяет нагревать плазму в ловушках различной конфигурации, имеющих области, в которых магнитное поле близко к однородному.

Нагрев плазмы косыми магнитно-звуковыми волнами большой амплитуды. Был исследован нагрев плазмы косыми магнитно-звуковыми волнами большой амплитуды, генерируемыми ударным витком. Ранее изучены магнитно-звуковые волны малой амплитуды, возбуждающиеся в плазме с помощью стационарного генератора [6]. Вопросы нагрева плазмы аналогичными

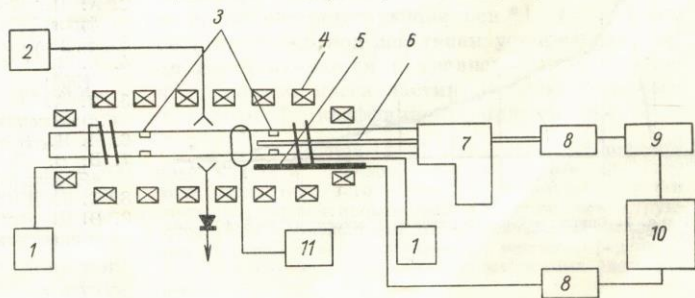
волнами рассматривались в работах [7, 8]. Структура нелинейных косых волн также была описана ранее [9]. В данной работе основное внимание уделено нагреву плазмы такой волной.

Схема эксперимента представлена на рис. 4. Водородная плазма приготавливалась в магнитном поле 250—1000 э посредством двух импульсных ВЧ-генераторов, частота которых 21 Мгц. Номинальная мощность каждого генератора составляла 100 кет, исходное давление водорода $4 \cdot 10^{-4}$ — 10^{-3} мм рт. ст. Концентрация электронов менялась в пределах $2 \cdot 10^{12}$ — $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Степень ионизации могла достигать 50—70%, температура электронов $\sim 10^4$ эв. На рис. 5 показана схема возбуждения магнитно-звуковой волны узким витком (диаметр витка 8 см, ширина 3 см) в столбе плазмы, помещенной в квазистатическое магнитное поле. Изменение ВЧ-магнитного поля ударного контура во времени имело вид затухающей синусоиды с характерной частотой $\sim 11 \text{ Мгц}$. ВЧ-магнитное поле на оси камеры под витком достигло значения ~ 1800 э.

На рис. 6 представлена осциллограмма сигнала с магнитного зонда, полученная при $n \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $H_0 = 300$ э (зонд располагался сбоку от витка в 1,5 см от оси камеры). Заметен осцилляционный фронт волны (убегание ВЧ-гармоники вперед), что объясняется законом дисперсии магнитно-звуковых колебаний при частотах, существенно превышающих ионную циклотронную частоту. В типичных условиях эксперимента пульсации имели размер 1—2 см. Волна имеет три компоненты магнитного поля \vec{H}_z , \vec{H}_ϕ , \vec{H}_r , что свидетельствует о ее косом распространении. Угол наклона фронта волны в случае цилиндрической геометрии непостоянен. В точке $r = 1,5 \text{ см}$, $z = 4 \text{ см}$ он равен 30° . Поля волны быстро затухают с увеличением расстояния от центральной плоскости возбуждающего витка. При $\vec{H}_z = 1800$ э, $H_0 = 300$ э, $n \approx$

Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — преионизирующие генераторы; 2 — СВЧ-интерферометр; 3 — диафрагмы; 4 — катушки магнитного поля; 5 — зонд синхронизации; 6 — магнитный зонд; 7 — насос; 8, 9 — усилители; 10 — осциллограф; 11 — ударный контур.



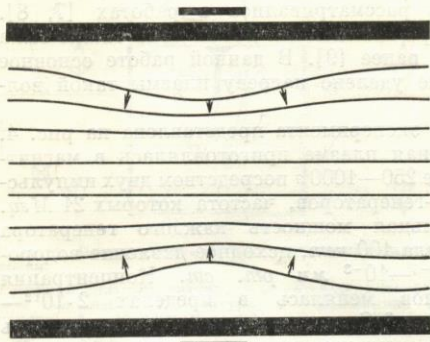


Рис. 5. Схема возбуждения магнитно-звуковой нелинейной волны.

$\approx 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³ амплитуда на длине 7 см от витка падает более чем в 3 раза. С увеличением амплитуды возбуждаемой волны длина затухания уменьшается. Основное энерговыделение происходит в непосредственной близости от контура, в объеме плазмы длиной ~ 15 см.

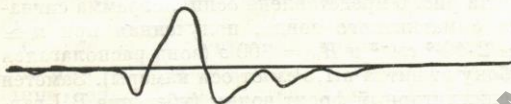


Рис. 6. Сигнал с магнитного зонда ($r = 1,5$ см; $z = 4$ см; полная длительность развертки 1 мксек).

Исследование состояния плазмы за фронтом волны производилось с помощью диамагнитного датчика, охватывающего плазму, и интерферометра на длине волны 8 м. На рис. 7 показана осциллограмма давления плазмы (nT), полученная датчиком на расстоянии 15 см от плоскости витка при пробочной геометрии магнитного поля. Сигнал, соответствующий основной частоте волны, подавлен фильтром. Давление поля волны в плоскости диамагнитного дат-



Рис. 7. Сигнал nT (одно деление 1 мксек; $nT = 8 \cdot 10^{14}$ эв \times см⁻³).

чика мало по сравнению с давлением плазмы. Максимальное значение $nT = 8 \cdot 10^{14}$ эв \cdot см⁻³. Выключение одной из пробок уменьшало время жизни nT в ловушке с 3,5 до 1,2 мксек, одновременно падала и величина сигнала. Зависимость величины nT от H_0 показывает, что давление плазмы заметно не увеличивается с ростом этой величины. С уменьшением начальной концентрации nT медленно падает.

Зависимость nT от величины $H^2/8\lambda$ линейная. Нагрев плазмы в нашем случае не может быть объяснен столкновительными механизмами и черенковским поглощением. По-видимому, эффективная диссипация энергии волны возникает из-за раскачки ВЧ-колебаний типа ионного звука и плазменных волн. Такое предположение подтверждается излучением СВЧ-шумов вблизи электронной плазменной частоты и рентгеновских квантов, возникающих на головке зонда, помещенного в ту же точку, что и магнитный зонд. Появление сигналов соответствует прохождению фронта волны.

Эффективное поглощение энергии плазмой, которое в описанных опытах носит бесстолкновительный характер, подтверждается измерениями декремента затухания контура, а также дополнительной ионизацией после срабатывания ударного контура.

Если привести энергию в плазме к объему, где происходит энерговыделение, то $(nT)_{\text{макс}} = 6 \cdot 10^{15}$ эв \cdot см⁻³. Оценка температуры электронов дает величину ~ 300 эв. Косвенные факты свидетельствуют о том, что энергия электронной компоненты существенно превышает энергию ионной компоненты. Однако прямых измерений температуры ионов не проводилось.

Поступила в Редакцию 14/XII 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Франк-Каменецкий. «Ж. техн. физ.», 30, 899 (1960).
2. А. П. Ахматов и др. «Ж. техн. и эксперим. физ.», 39, 536 (1960).
3. И. А. Кован и др. Там же, 43, 16 (1962).
4. А. В. Бородин и др. «Ядерный синтез», 3, 38 (1963).
5. И. А. Кован, А. М. Спектор. «Ж. техн. и эксперим. физ.», 53, 116 (1967).
6. И. И. Кован и др. Там же, 48, 72 (1965).
7. В. В. Долгополов, К. Н. Степанов. «Ядерный синтез», 3, 205 (1963).
8. В. В. Долгополов и др. Там же, 3, 251 (1963).
9. В. Д. Русанов, В. П. Смирнов. «Ж. техн. и эксперим. физ.», 2, 356 (1965).