

тронный режим ускорения протонов до кинетической энергии $W \approx 2,5 \text{ Гэв}$.

Дальнейшее увеличение энергии протонов с помощью рассмотренного варианта каскадного изохронного циклотрона будет определяться в значительной мере экономическими соображениями, поскольку каждый циклотрон обеспечивает прирост энергии протонов примерно на постоянную величину, равную E_0 . В этой связи целесообразен другой вариант каскадного изохронного циклотрона, когда прирост энергии во втором циклотроне составляет примерно не энергию покоя протона, а удвоенную или утроенную энергию покоя. Это может быть осуществлено, когда изменение частоты радиальных бетатронных колебаний в циклотроне равно не единице, а двум или трем.

При увеличении аксиальной жесткости изохронного циклотрона ($Q_z \geq 1$) средний ток пучка возрастает примерно на два порядка [5, 6].

Известно, что порог рождения тяжелых частиц протоном на ядрах составляет для K^+ , $\Lambda^0 - 1,1 \text{ Гэв}$, для Σ^+ , $\Sigma^0 - 1,3 \text{ Гэв}$, для K^- , $K^0 - 1,8 \text{ Гэв}$. Поэтому при энергии $\sim 2,7 \text{ Гэв}$ рассмотренный ускоритель становится высокоинтенсивной «фабрикой» K -мезонов, конкурентоспособной с линейным ускорителем.

Турбулентный нагрев и удержание плазмы в тороидальной ловушке мультипольного типа

Б. А. ДЕМИДОВ, С. Д. ФАНЧЕНКО

Как известно, отличие турбулентного нагрева током от обычного джоулева нагрева состоит в использовании сильных электрических полей, при которых сопротивление плазмы является аномально большим из-за развития мелкомасштабных неустойчивостей. Для облегчения протекания тока турбулентного нагрева вдоль обхода тора в установке «Вихрь-3» (рис. 1) помимо поля B_ϕ было предусмотрено продольное поле $B_z \leq 2 \text{ кэ}$. Поле B_z создавалось системой из 30 катушек 1, надетых на тороидальную кварцевую разрядную камеру 2 с большим диаметром тора $2R = 150 \text{ см}$ и малым диаметром $2a = 10 \text{ см}$. Поле B_ϕ создавалось наложенными на разрядную камеру четырьмя встречно включенными кольцевыми проводниками 3, через которые пропускаться квазистационарный ток с периодом 10 мсек . Ход силовых линий поля условно показан на рис. 1. Каждый проводник в отдельности создавал на оси камеры поле $B_\phi \leq 2 \text{ кэ}$.

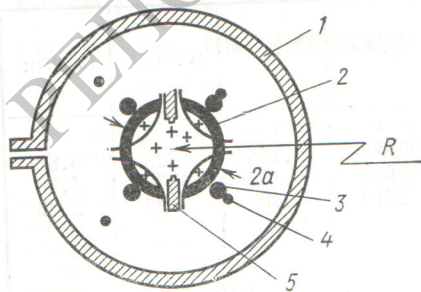


Рис. 1. Схема установки.

Отметим, что в качестве первой ступени каскада наряду с изохронным циклотроном можно использовать действующие и реконструируемые синхротроны с энергией 600—1000 Мэв и строящиеся линейные ускорители на энергию 700—1000 Мэв.

Поступило в Редакцию 11/V 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Дмитриевский, В. В. Кольга, Н. И. Полумордвинова. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)». М., Атомиздат, 1964, стр. 833.
2. J. Martin, J. Mann. Nucl. Instr. and Methods, 18, 19, 451 (1962).
3. H. Willax. Intern. Cyclotron Conference (Oxford, 1969).
4. J. Martin et al. Proc. of the Intern. Conf. on Sector-Focused Cyclotrons and Meson Factories, CERN, 1963, p. 52.
5. В. Н. Аносов и др. «Атомная энергия», 25, 537 (1968).
6. M. Gordon. Nucl. Instr. and Methods, 58, 245 (1968).

УДК 533.9.16:621.039.634

Область пространства, ограниченная кольцевыми проводниками, представляет собой своеобразный тороидальный пробкотрон. Магнитные силовые линии (за исключением одной центральной) выходят на стенки, но при этом поле возрастает от центра во всех направлениях. Для частиц, покидающих центральную область, пробочное отношение максимально и составляет:

$$R_{\text{проб}} = \sqrt{1 + 4B_\phi^2/B_z^2}. \quad (1)$$

Изменяя отношение B_ϕ/B_z , можно было в широких пределах варьировать пробочное отношение. При $B_\phi = B_z$ пробочное отношение $R_{\text{проб}} \approx 2,2$.

При достаточно большом отношении B_ϕ/B_z лишь немногие из заряженных частиц успеют проникнуть из области, ограниченной проводниками, во внешнее пространство за короткое время турбулентного нагрева. Это и позволило отказаться от обычной для мультипольных машин большой разрядной камеры и использовать в установке «Вихрь-3» камеру, занимающую лишь внутреннюю область между проводниками.

Разрядная камера предварительно откачивалась до давления $10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$. Водородная плазма с начальной плотностью, равной примерно 10^{12} см^{-3} , создавалась с помощью шести пар одновременно срабатывавших титан-гидридных инжекторов 5, расположенных через 60° по периметру тора. Ток через инжекторы протекал лишь в течение нескольких микросекунд, после чего плазма «послесвечения» постепенно распалась и плотность ее за время порядка 10^{-4} сек спадала до 10^{11} см^{-3} . Спустя 25—60 мксек после срабатывания инжекторов запускался ВЧ-контур ударного действия, индуктивным элементом которого служили четыре параллельно включенных витка 4. Контур создавал на

обходе тора вихревое электрическое поле E (рис. 2, а), и плазма турбулентно нагревалась.

Экспериментальные результаты. На рис. 3 (кривые 1—3) приводятся данные интерферометрических измерений (λ равно 8; 30 мм) плотности плазмы n при различных режимах работы установки. Кривая 1 соответствует распаду предварительной плазмы в простом тороидальном магнитном поле ($B_\phi = 0$). Включения поля B_ϕ (кривая 2) повышало время удержания примерно в пять раз.

Характеристики фазы турбулентного нагрева плазмы в установке «Вихрь-3» оказались в хорошем соответствии с данными, ранее полученными на установках «Вихрь-1» и «Вихрь-2» [1, 2]. При напряженности электрического поля $E = 60$ в/см амплитуда тока J в плазме достигала 500 а. Ток длительностью < 1 мксек рассеивал на аномальном сопротивлении плазмы энергию примерно 10^{16} эв·см⁻³. Максимальное давление нагретой плазмы, зарегистрированное в момент прекращения тока, составляло $nT_e = 5 \cdot 10^{14} \div 1 \cdot 10^{15}$ эв·см⁻³ при плотности плазмы $(1 \div 2) \times 10^{12}$ см⁻³.

Влияние турбулентного нагрева на поведение плотности плазмы при $B_z = B_\phi = 1,8$ кэ видно из кривой 3 рис. 3. До включения ВЧ-контура в момент $t = 35$ мксек происходил распад плазмы. После полного прекращения тока турбулентного нагрева наблюдалось плавное нарастание плотности, которая через 15—20 мксек проходила через максимум. Данные о поведении плотности интересно сравнить с изменением во времени в тех же условиях диамагнитного сигнала (см. рис. 2, в).

В мультипольном магнитном поле диамагнитный сигнал турбулентно нагретой плазмы удерживается в течение примерно 15 мксек, что хорошо соответствует времени нарастания плотности на кривой 3 рис. 3.

При $B_\phi = 0$ плавного нарастания плотности n после нагрева не наблюдалось, и соответственно диамагнитный сигнал исчезал сразу после прекращения нагрева (см. рис. 2, б). Экспериментально измеренное время удержания диамагнитного сигнала $t_{уд}$ быстро возрастало с увеличением T_e .

Обсуждение результатов. Распад плазмы в отсутствие турбулентного нагрева или до него может быть объяснен амбиполярной диффузией вдоль магнитного поля.

Возрастание времени удержания холодной плазмы τ_x при включении поля B_ϕ можно объяснить увеличением эффективной длины магнитных силовых линий до их выхода на стенку.

После турбулентного нагрева $T_e \approx 500$ эв электроны должны удерживаться в магнитной ловушке мультипольного типа в течение времени кулоновского рассеяния в конус потерь $\tau_{кул} \approx 100$ мксек. Однако при избранном способе приготовления плазмы степень ее ионизации не превышала 10%, и горячие электроны могли за более короткое время потерять свою энергию на ионизацию нейтральных атомов. Плотность появляющихся вследствие ионизации холодных электронов должна вначале возрастать во времени, а затем (после исчезновения горячих электронов) экспоненциально спадать, проходя через максимум в момент

$$t_0 = \tau_{ион} \frac{T_e}{A} \ln \frac{A}{T_e} \cdot \frac{\tau_x}{\tau_{ион}} \quad (2)$$

Здесь $\tau_{ион}$ — время ионизации атомов электронным ударом; A — цена ионизации; T_e — температура тур-

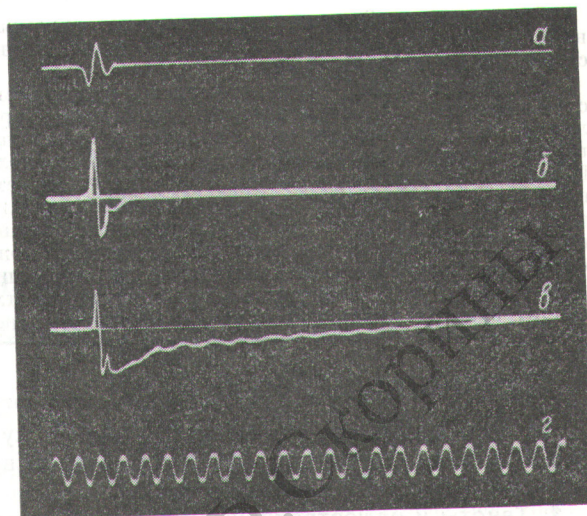


Рис. 2. Осциллограммы: а — вихревое электрическое поле; б — диамагнитный сигнал при $B_\phi = 0$; в — диамагнитный сигнал при $B_\phi = B_z = 1,8$ кэ; г — метки времени с периодом 1 мксек.

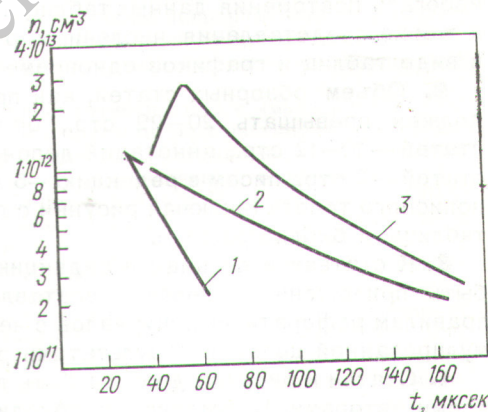


Рис. 3 Распад плотности плазмы в различных режимах работы установки.

булентно нагретых электронов с плотностью n_0 в момент прекращения нагрева. Подставляя значения $\tau_{ион} = 1 \cdot 10^{-6}$ сек, $T_e = 500$ эв, $A = 30$ эв, $\tau_x = 7,5 \cdot 10^{-5}$ (по данным рис. 3), находим $t_0 \approx 2 \cdot 10^{-5}$ сек, что хорошо соответствует экспериментальным данным.

Нетрудно показать, что диамагнитное давление плазмы при максвелловском распределении электронов по энергии описывается соотношением *

$$nT = n_0 T_e e^{-\frac{A}{T_e} \cdot \frac{i}{\tau_{ион}}} \quad (3)$$

* Соотношения (2), (3) получены в предположении, что $\tau_x, \tau_{кул} > \frac{T_e}{A} \tau_{ион}$.

Соотношение (3) достаточно хорошо описывает наблюдаемые на опыте осциллограммы диамагнитного сигнала и зависимость $\tau_{уд}$ от T_e .

В описанных выше опытах зарегистрировано весьма существенное увеличение времени удержания турбулентно нагретой плазмы при переходе от однородно-тороидального к квадрупольному магнитному полю. Показано, что время удержания турбулентно нагретой плазмы после прекращения нагрева намного превышает время тороидального дрейфа и в условиях создания предварительной плазмы методом инжекции может быть объяснено потерями электронов на ионизацию нейтрального газа. Несмотря на конструктивные отличия от обычных замкнутых мультипольных ловушек,

установка «Вихрь-3» достаточно хорошо моделирует торию турбулентного нагрева плазмы в мультипольной ловушке с внутренними проводниками.

В заключение авторы благодарят Е. К. Завойского за постоянную поддержку и Д. Д. Рютова за ценные обсуждения.

Поступило в Редакцию 14/V 1970 г.
В окончательной редакции 23/VII 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Д. Фанченко и др. ЖЭТФ, 46, 497 (1964).
2. S. Fanchenko et al. Phys. Rev. Letters, 21, 789 (1968).

К сведению авторов

Авторы, направляющие свои рукописи в журнал «Атомная энергия», должны руководствоваться следующими требованиями:

1. Тексты и иллюстративные материалы представляются в трех экземплярах в окончательно отработанном для печати виде.

Содержание статьи должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повтора данных таблиц и графиков, а также представления численных результатов в виде таблиц и графиков одновременно.

2. Объем обзорных статей, как правило, не должен превышать 20–22 стр., оригинальных статей — 10–12 стр., аннотаций депонированных статей — 2 стр., писем в редакцию — 5 стр. машинописного текста (включая рисунки с подписями, таблицы и библиографию).

3. К статьям и письмам в редакцию должны быть приложены рефераты, составленные по правилам реферативных журналов с четкой сформулированной целью и результатами работы.

4. Статьи и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. К рукописи необходимо приложить точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество авторов.

5. Названия всех работ, присылаемых в редакцию, должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции. Кроме того, рефераты к статьям должны быть переведены на английский язык (в строгом соответствии с русским рефератом).

6. Цитируемая литература приводится в конце работы общим списком с указанием:

а) для журнальных статей: инициалов и фамилий авторов, названия журнала, номера тома (подчеркнуть) или выпуска, страницы и года (в круглых скобках);

б) для книг: инициалов и фамилий авторов, полного названия книги, места издания, изда-

тельства и года издания; для иностранных книг указываются также данные русского перевода;

в) для статей в сборниках: инициалов и фамилий авторов статьи, название сборника, инициалов и фамилии составителя или редактора сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Текст рукописей должен быть напечатан на машинке через два интервала по 28–29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

8. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических журналов. Трудно различимые в рукописном обозначении буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

9. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовки.

10. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15×20 см; фотографии должны иметь контрастные изображения, размер фотографии 12×18 см.

11. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

12. Редакция посылает автору только одну корректуру, которую необходимо вернуть в предельно короткий срок.

КАК ПРАВИЛО, В ЖУРНАЛЕ МОЖЕТ БЫТЬ НАПЕЧАТАНО НЕ БОЛЕЕ ДВУХ ПУБЛИКАЦИЙ ОДНОГО И ТОГО ЖЕ АВТОРА В ГОД.

Рукописи, не соответствующие этим требованиям, не рассматриваются. Отклоненные статьи не возвращаются.