

Замкнутая магнитная ловушка «Сириус»

с винтовым полем

О. В. БИРЮКОВ, П. Я. БУРЧЕНКО, Б. Т. ВАСИЛЕНКО, Е. Д. ВОЛКОВ, А. В. ГЕОРГИЕВСКИЙ,
А. С. ЛОГИНОВ, Р. М. НИКОЛАЕВ, Ю. В. САШЕНКО,
В. А. СУПРУНЕНКО, В. Т. ТОЛОК

УДК 533.9

Исследования бесстолкновительных методов нагрева, проведенные за последние годы, позволили получить плазму с температурами электронной и ионной компонент порядка нескольких килоэлектронвольт и достаточно высокой плотностью ($\sim 10^{13}$ для горячей ионной и до 10^{15} для электронной компонент [1—4]).

Напротив, исследования удержания плазмы с подобными параметрами только начинаются, и к настоящему времени в этой области еще очень мало экспериментальных данных.

Программа исследований на замкнутой магнитной ловушке «Сириус» предусматривает в первую очередь изучение удержания плазмы с горячими электронами, а также исследование поведения высокотемпературной изотермической плазмы, которая может быть создана в результате синтеза циклотронного и турбулентного методов нагрева. Кроме того, в дальнейшем предусматриваются исследования удержания бестоковой плазмы, инжектируемой в стелларатор из внешних источников.

Указанная программа исследований явилась определяющим фактором при выборе конфигурации стелларатора. В частности, для использования турбулентного и циклотронного нагрева, а также для размещения систем инжекции плазмы из внешних источников камера стелларатора должна иметь прямолинейные участки. С другой стороны, для плазмы с горячими электронами можно было пойти на некоторое уменьшение угла прокручивания вблизи оси магнитной системы при сохранении максимального возможного шира, т. е. градиента угла прокручивания $d\varphi/dr$, который может оказать большое влияние на стабилизацию конвективных неустойчивостей.

С учетом этого была выбрана рейстрекковая конфигурация с трехзаходными винтовыми

обмотками. Основные параметры ловушки следующие:

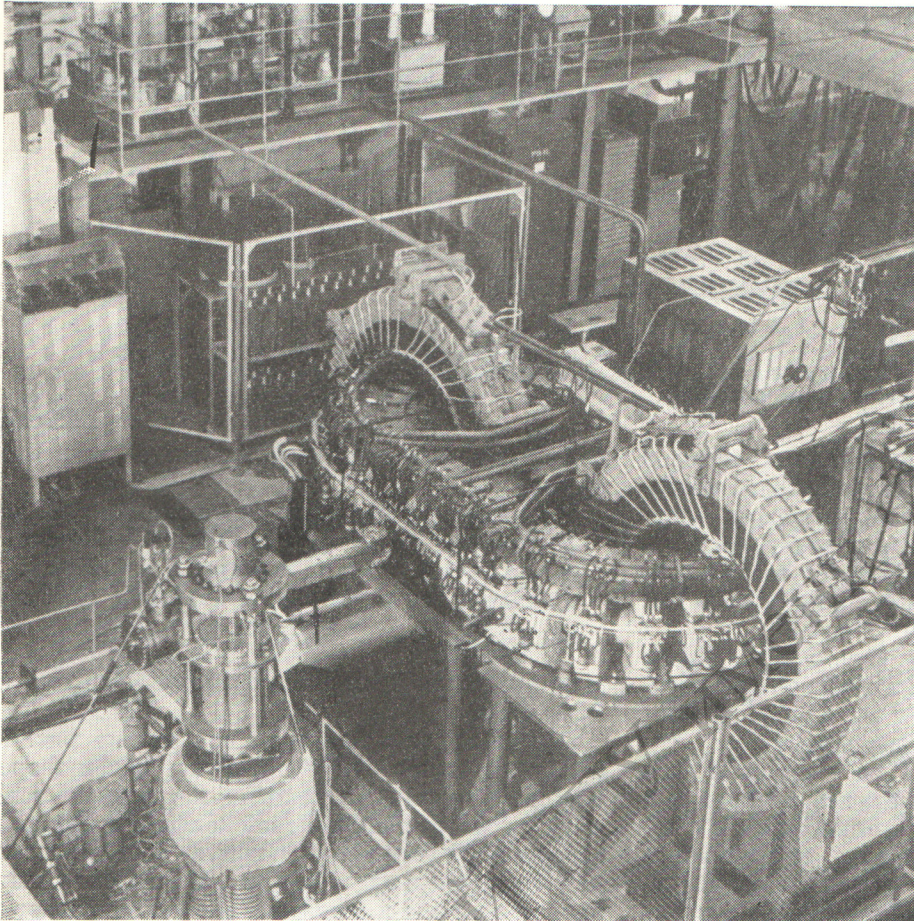
- 1) удерживающее магнитное поле $H_0 = 20$ кэ;
- 2) диаметр вакуумной камеры $d = 10$ см;
- 3) аксиальная длина камеры $L = 600$ см;
- 4) радиус тороидальных участков $R = 60$ см;
- 5) $\beta_{\text{равновесн}} = \frac{8\pi kT}{H_0^2} \approx 0,008$;
- 6) предельный ток Шафранова — Крускала $I_0 \approx 4$ ка.

Общий вид стелларатора показан на рис. 1. Так как в настоящее время нет ясной теоретической картины топологии магнитного поля в стеллараторе рейстрекковой конфигурации, при сооружении установки «Сириус» особое внимание было уделено точности изготовления магнитной системы и изучению магнитных поверхностей.

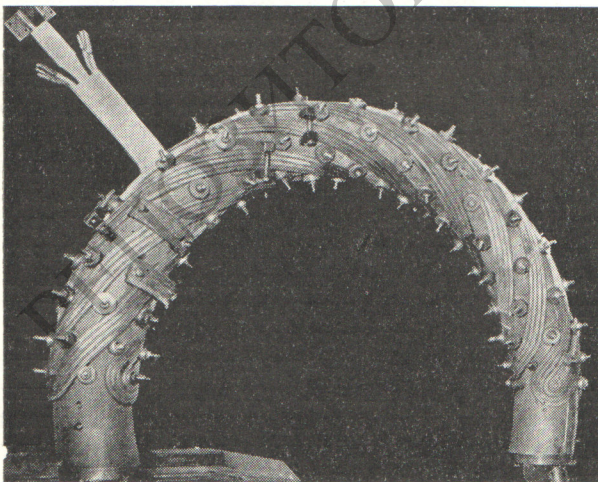
Основное удерживающее магнитное поле стелларатора «Сириус» создается системой 32 многовитковых катушек, равномерно расположенных вдоль рейстрека. Катушки наматываются полой медной шиной сечением 10×10 мм² с отверстием 5×5 мм² и заливаются эпоксидной смолой. После заливки они помещаются в корпус из древесного пластика (ДСП-Г).

Катушки укреплены в специальной силовой раме, изготовленной из стали 1Х18Н9Т. Узел крепления каждой катушки выполнен на двойных эксцентриках, при помощи которых можно обеспечить поворот катушек вокруг осей на углы до 7° и их радиальное и вертикальное перемещения на величину ~ 12 мм.

Катушки основного удерживающего магнитного поля разделены на две ветви, включенные параллельно; в ветвях катушки соединены последовательно. Неоднородность продольного поля $\Delta H_0/H_0$ вдоль оси системы составляла 1,6%, поперечные составляющие поля от под-



Р и с. 1. Общий вид стелларатора «Спирус».



Р и с. 2. Винтовая обмотка (сборка).

водящих проводников не превышают 0,01% H_0 .

На криволинейных участках камеры стелларатора располагаются две трехзакходные винтовые обмотки с «цилиндрителями» на концах. Средний тангенс угла наклона спиральной обмотки $\operatorname{tg} \alpha_1 = 0,3636$. Цилиндритель представляет собой спиральную обмотку с углом наклона α_2 ($\operatorname{tg} \alpha_2 = 2 \operatorname{tg} \alpha_1$). Длина каждого цилиндрителя 115, 2 мм.

Основанием обмотки служит каркас из стеклопластика, запеченный в эпоксидном компаунде. Обмотка, выполненная полый медной шиной сечением 10×10 мм², уложена на поверхности каркаса и состоит из шести секций по четыре проводника в каждой. Электрически все шины соединены последовательно. На рис. 2 показана винтовая обмотка на оправке перед пере-

несением ее на силовой каркас. Точность изготовления винтовой обмотки характеризуется следующими данными: $\frac{\Delta R}{R} \approx 0,1\%$; $\frac{\Delta a_0}{a} \approx$

$\approx 1,0\%$; $\frac{\Delta \gamma}{\gamma} \approx 1,5\%$, где R и a_0 — большой и малый радиусы винтовой обмотки; γ — угловой размер полюса. Обмотки винтового поля включены последовательно с системой продольного поля.

Источником питания магнитной системы служит конденсаторная батарея емкостью 0,144 ф, состоящая из 960 импульсных конденсаторов типа ИМ-5/150, включенных параллельно. Батарея может запасть энергию 4,8 Мдж; ее максимальное рабочее напряжение 5 кВ.

Для обеспечения условий безопасной работы батареи были выполнены следующие предосторожности:

1) вся батарея разделена на шесть параллельно соединенных блоков;

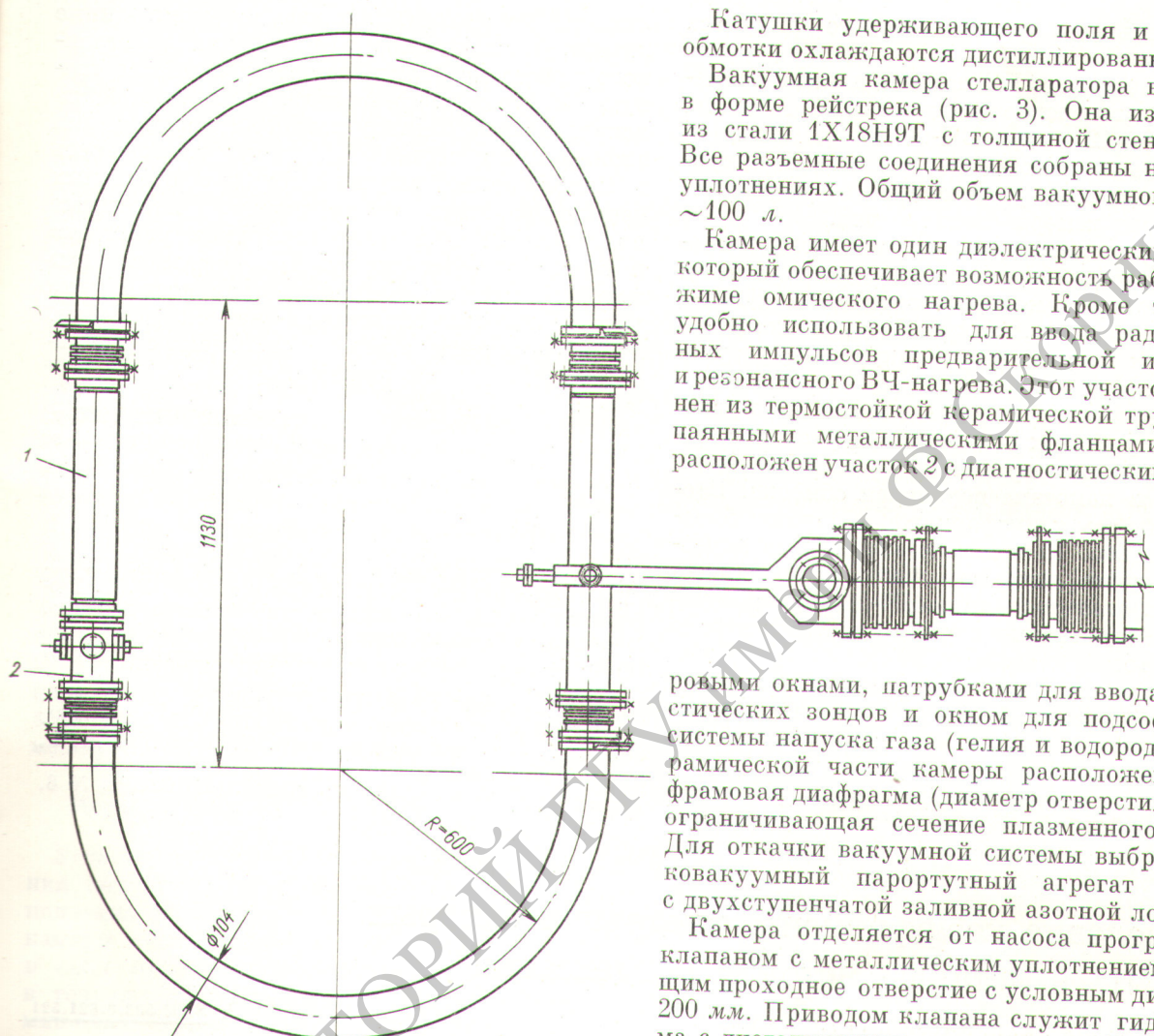


Рис. 3. Схема вакуумной камеры.

1 — керамический участок; 2 — участок с диагностическими окнами.

- 2) каждый блок разделен на две секции;
- 3) установлены защитные индуктивные сопротивления (реакторы) между секциями и общий реактор между коммутирующим устройством и нагрузкой, ограничивающие величину токов короткого замыкания и скорость выделения энергии в поврежденном участке;
- 4) каждые два конденсатора защищены плавким предохранителем.

Коммутирующим элементом каждого блока является игнитрон типа ИВС-100/15. Шесть игнитронов собраны в отдельный коммутирующий блок и при разряде работают параллельно.

Катушки удерживающего поля и винтовые обмотки охлаждаются дистиллированной водой.

Вакуумная камера стелларатора выполнена в форме рейстрека (рис. 3). Она изготовлена из стали 1Х18Н9Т с толщиной стенок 2 мм. Все разъемные соединения собраны на медных уплотнениях. Общий объем вакуумной системы ~100 л.

Камера имеет один диэлектрический разъем, который обеспечивает возможность работы в режиме омического нагрева. Кроме того, его удобно использовать для ввода радиочастотных импульсов предварительной ионизации и резонансного ВЧ-нагрева. Этот участок выполнен из термостойкой керамической трубы с напаянными металлическими фланцами. Рядом расположен участок 2 с диагностическими саффи-

ровыми окнами, патрубками для ввода диагностических зондов и окном для подсоединения системы напуска газа (гелия и водорода). В керамической части камеры расположена вольфрамовая диафрагма (диаметр отверстия 50 мм), ограничивающая сечение плазменного шнура. Для откачки вакуумной системы выбран высоковакуумный парортутный агрегат РВА-1-2 с двухступенчатой заливной азотной ловушкой.

Камера отделяется от насоса прогреваемым клапаном с металлическим уплотнением, имеющим проходное отверстие с условным диаметром 200 мм. Приводом клапана служит гидросистема с дистанционным управлением. Перед окончатальной сборкой вакуумная камера вместе с клапаном и ловушкой прошла несколько циклов обезгаживания длительным прогревом при температуре 350—450° С на специальной стенде. Предельный вакуум после прогрева $4 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст. Предусмотрены также возможность прогрева вакуумной системы непосредственно на установке и обработка стенок камеры разрядом.

Стелларатор «Сириус» снабжен устройствами, обеспечивающими создание и нагрев плазмы. Для предварительной ионизации используется автогенератор мощностью 0,5 Мвт на частоте 100 кГц, обеспечивающий пробой нейтрального газа при начальном давлении $5 \cdot 10^{-5}$ — $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Питание генератора осуществляется от модулятора с искусственной лини-

ей. Длительность радиочастотного импульса 1—2 мсек.

Для резонансного ВЧ-нагрева плазмы применяется автогенератор мощностью 4 Мвт на частотах 8—12 Мгц. ВЧ-мощность вводится в плазму при помощи периодической индукционной катушки, размещенной на керамическом участке камеры стелларатора.

При экспериментах по турбулентному нагреву используется быстрая конденсаторная батарея из четырех конденсаторов типа КИМ-2 общей емкостью 0,8 мкф. Батарея коммутируется при помощи двух вакуумных разрядников [5].

Для омического нагрева плазмы на криволинейных участках стелларатора располагаются тороидальные сердечники трансформаторов, на которые намотана первичная обмотка. Вторичным витком трансформаторов служит плазменное кольцо. Конденсаторная батарея омического нагрева емкостью 1500 мкф собрана из 10 конденсаторов типа ИМ-5/150; коммутирующим элементом служат два игнитрона ИВС-100/15.

В дальнейшем на прямолинейном участке вакуумной камеры будет установлен импульсный магнитный клапан для инжекции плазмы в стелларатор [6].

Последовательное использование трех методик настройки системы магнитных полей (маг-

нитные измерения, кольцевые электронные пушки, многократное прохождение электронного пучка) позволило провести наиболее точную юстировку. Методика, основанная на использовании многократного прохождения электронного пучка [7], дала возможность в приближении ведущих центров отдельных частиц доказать существование магнитных поверхностей в стеллараторе типа рейстрекса и определить их форму. Положение и углы поворота катушек основного поля позже были рассчитаны на электронно-счетной машине. Результаты расчета хорошо совпадают с результатами юстировки системы.

Поступила в Редакцию 20/VIII 1966 г.
В окончательной редакции 10/I 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Сухомлин и др. ЖЭТФ, 1, 45 (1965).
2. Н. И. Назаров, А. И. Ермаков, В. Т. Толок. В сб. «Высокочастотные свойства плазмы». Киев, «Наукова думка», 1965.
3. Е. К. Завойский. «Атомная энергия», 14, 57 (1963).
4. W. Hooke et al. Phys. Fluids, 8, 1146 (1965).
5. П. Я. Бурченко и др. ЖЭТФ, III, 243 (1966).
6. К. Д. Синельников, В. Т. Толок. ЖТФ, 32, 248 (1962).
7. Г. М. Батапов и др. «Докл. АН СССР», № 6, 1293 (1965).

Определение коэффициента внедрения быстрых ионов H_1^+ в металлы методом конденсации

Е. С. БОРОВИК, Н. П. КАТРИЧ, Г. Т. НИКОЛАЕВ

УДК 533.9:621.521

В работе [1] было показано, что величина коэффициента внедрения η ионов H_1^+ с энергией 35 кэв в металлы зависит от концентрации внедренного водорода, температуры T и вида металла. Характер зависимости η от T для различных металлов неодинаков. В области больших концентраций внедренного водорода кривая зависимости η от T для металлов, образующих с водородом прочные химические связи (тантал, титан), имеет максимум в интервале температур 300—600° К. Для металлов, образующих с водородом слабые химические связи (например, никель), кривая не имеет максимума. Общее для них то, что при высоких температурах коэффициент внедрения близок к нулю, при низких температурах величина η практически одинакова и достаточно велика.

Как отмечалось в работе [1], при температурах выше 300° К удовлетворительное объяснение результатов может быть получено на основе обычных представлений о диффузии водорода в металлах. Высокий коэффициент внедрения при низких температурах объяснить трудно. Действительно, при 78° К коэффициент диффузии настолько мал, что диффузией водорода в глубь металла можно пренебречь. В связи с этим внедренный водород должен концентрироваться в тонком поверхностном слое металла и величина η должна определяться диффузией внедренного водорода из металла по макроскопическим тепловым каналам. При больших концентрациях внедренного водорода коэффициент η должен равняться нулю. Однако эксперименты показали [1], что η не снижается ниже