

04;12

Сферический токамак Глобус-М

© В.К. Гусев¹, В.Е. Голант¹, Е.З. Гусаков¹, В.В. Дьяченко¹, М.А. Ирзак¹, В.Б. Минаев¹, Е.Е. Мухин¹, А.Н. Новохацкий¹, К.А. Подушникова¹, Г.Т. Раздобарин¹, Н.В. Сахаров¹, Е.Н. Трегубова¹, В.С. Узлов¹, О.Н. Щербинин¹, В.А. Беляков², А.А. Кавин², Ю.А. Косцов², Е.Г. Кузьмин², В.Ф. Сойкин², Е.А. Кузнецов³, В.А. Ягнов³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова, 189631 Санкт-Петербург, Россия

³ Троицкий институт научно-инновационных термоядерных исследований, 142092 Троицк, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 14 января 1999 г.)

Приведены основные параметры и описание конструкции сферического токамака Глобус-М с учетом изменений, внесенных на момент завершения строительства. Обсуждается экспериментальная программа и возможности оптимизации режимов работы установки. Программу исследований предполагается начать с экспериментов по омическому нагреву и продолжить работами по ВЧ нагреву и генерации токов увлечения. Представлены последние результаты по моделированию распространения ВЧ волн в диапазонах 10–50 МГц и 2.45 ГГц и обсуждается возможность их применения для управления профилями параметров плазмы. Приведено краткое описание диагностик первой очереди и обсуждается дальнейшее развитие диагностического комплекса.

Сферический токамак Глобус-М разработан в рамках проекта Международного научно-технического центра организациями-участниками и изготовлен на государственном предприятии "Ленинградский северный завод" (Санкт-Петербург). Токмак установлен в новом экспериментальном корпусе ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН. Площадь двухэтажного здания равна 600 м². Кроме установки в корпусе будет размещено технологическое оборудование и комплексы для диагностики и дополнительного нагрева плазмы.

Описание установки

Окончательные параметры сферического токамака Глобус-М были улучшены по сравнению с первоначальным проектом [1]: номинальный ток плазмы увеличен до 0.5 МА, тороидальное магнитное поле — до 0.65 Т. Большой радиус установки R равен 0.36 м, малый $a = 0.24$ м, что соответствует аспектному отношению 1.5, при этом вертикальная вытянутость шнура может достигать 2.2, а треугольность — 0.6.

Вакуумная камера объемом около 1.1 м³ представляет собой цельносварную конструкцию из аустенитной нержавеющей стали. Она имеет 38 диагностических патрубков общей площадью 0.8 м², что обеспечивает хороший доступ к плазме для диагностического комплекса и источников дополнительного нагрева. Предусматривается применение как методов ВЧ нагрева и генерации токов, так и нейтральной инжекции. Большие патрубки и малое расстояние между внешней магнитной поверхностью плазмы и стенкой камеры позволяют удобно и эффективно размещать антенны для ввода ВЧ мощности

в плазму, а также увеличить эффективность нейтральной инжекции за счет снижения потерь на перезарядку. Конструкция токамака позволяет вводить в плазму до 8 MW дополнительной мощности.

Электромагнитная система (ЭМС) токамака спроектирована по классической схеме, когда все обмотки расположены вне вакуумной камеры (рис. 1). 16 одновитковых D -образных катушек тороидального поля изготовлены из электротехнической меди М1, соединены последовательно и образуют обмотку тороидального поля (TF). Проходящие через внутренний цилиндр вакуумной камеры части катушек изготовлены в виде 16 изолированных друг от друга бронзовых сегментов, подвергнутых термической закалке. На образованный сегментами центральный стержень надета обмотка вихревого поля — центральный соленоид (CS). Соленоид выполнен в виде двухслойной катушки, общая высота обмотки составляет 1.3 м. Для намотки был использован непрерывный проводник длиной 66 м из холоднокатанной серебросодержащей меди прямоугольного сечения 20 × 20 мм. Девять пар полоидальных обмоток разбиты на три функциональные группы — обмотки компенсации рассеянного поля (CC), "медленные" (PF) и "быстрые" (VFC, HFC) обмотки управления положением и формой плазмы.

Работа полоидальной системы токамака Глобус-М в режиме компенсации рассеянных полей центрального соленоида в предпробойной фазе представлена на рис. 2, а. На рис. 2, б показана магнитная конфигурация в разряде с двумя X -точками (ток плазмы 0.5 МА, вытянутость 2, треугольность 0.6).

Обмотки токамака питаются от силовых трансформаторов, подключенных к высоковольтной сети перемен-

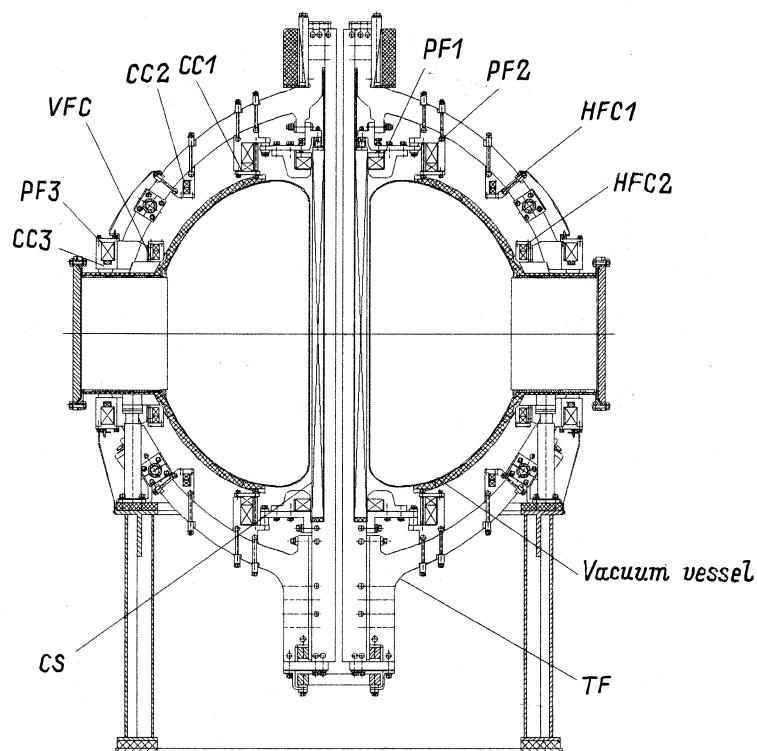


Рис. 1. Поперечное сечение токамака Глобус-М. Vacuum vessel — вакуумная камера; TF — обмотки тороидального поля; CS — центральный соленоид; CC — обмотки компенсационные; PF — ”медленные” обмотки полоидального поля; VFC, HFC — ”быстрые” обмотки управления.

ного тока 110 kV, с помощью 6-фазных тиристорных выпрямителей и быстрых инверторов тока с частотой до 3 kHz. Источники питания охвачены петлей обратной связи и позволяют поддерживать заданные положение, форму и ток по плазме. Система охлаждения обмоток электромагнитной системы обеспечивает работу токамака с частотой 6 импульсов в час при длительности разряда 0.3 s и номинальном токе 0.5 MA, что достаточно для релаксации профиля плотности тока. Разряды с номинальным током плазмы обеспечиваются за счет вольт-секундной емкости системы полоидальных катушек 0.33 V · s, вклад центрального соленоиды в которую составляет 90%. Детали конструкции токамака описаны в [2,3].

Предельные режимы токамака Глобус-М

При выбранной схеме питания токамака от сети переменного тока длительность рабочего импульса ограничивается в основном тепловыделением в обмотках ЭМС. Длительность разряда может быть доведена до 1 s при увеличении пауз между импульсами.

Привлекательной особенностью сферического токамака является возможность получения предельно высоких значений тока. Внесенные в проект изменения позволили увеличить ток по центральному стержню токамака до

1.2 MA, что привело к увеличению тороидального пика на оси шнура B_T до 0.65 T и обеспечивает получение тока по плазме I_p до 0.5 MA. Предельная величина тока плазмы при условии обеспечения устойчивости к винтовым возмущениям очень высока и для таких токамаков, как Глобус-М, может приближаться по величине к току по центральному стержню. Ряд экспериментов на сферическом токамаке START продемонстрировал возможность работы с малыми q_a на границе [4]. При $q_a \approx 3.6$ и $B_T = 0.62$ T в Глобусе-М можно достичь ток по плазме до 1 MA.

По сравнению с другими строящимися сферическими токамаками Глобус-М позволяет получать очень высокие значения средней по сечению плотности тока в плазменном шнуре. Даже в обычных режимах эта величина составляет 1.4 MA/m². Данное обстоятельство делает омический режим более эффективным, так как вклад удельной мощности пропорционален квадрату плотности тока. Высокая плотность тока, как и высокое значение отношения B_T/R порядка 1.8 T/m, позволяет получить разряд с высокой предельной средней плотностью плазмы около $2 \cdot 10^{20}$ m⁻³ даже в режиме подпитки разряда газонапуском. Получение режимов с низким q_a на границе и высокой плотностью плазмы является важным направлением исследований по программе управляемого термоядерного синтеза, так как позволяет повысить энергетический выход термоядерной реакции, пропорци-

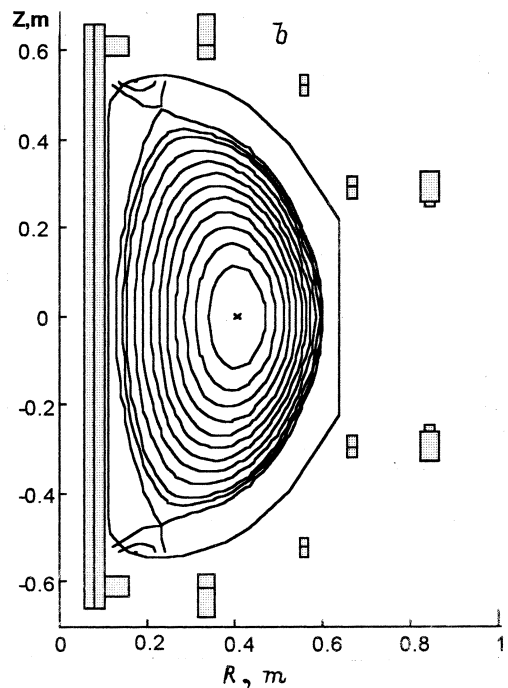
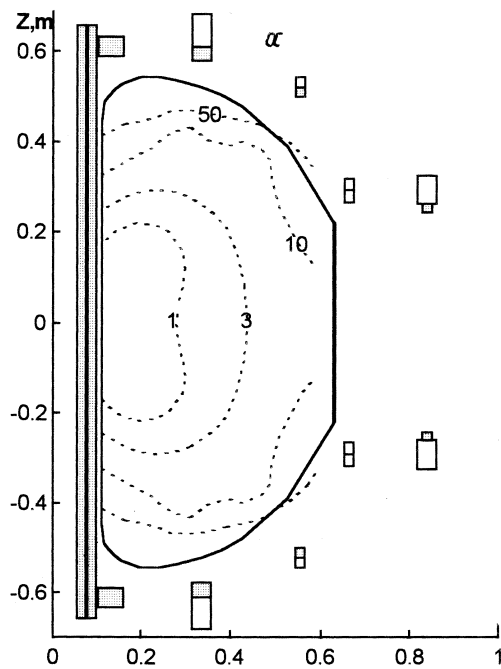


Рис. 2. Линии постоянной величины полоидальной составляющей магнитного поля внутри камеры токамака: *a* — предпробойная фаза, цифрами указаны значения магнитного поля в гауссах; *b* — разряд с двумя X-точками, $I_p = 0.5$ МА, $\beta_T = 0.27$, $I_i = 0.5$, $k = 2$, $\delta = 0.6$, Глобус-М. Включенные обмотки электромагнитной системы заштрихованы.

ональный квадрату плотности плазмы, и эффективность реактора за счет высоких значений нормализованного тока $I_N = I_p/a \cdot V_T$ в режимах с предельными коэффициентами Тройона. Глобус-М при низких значениях

q_a достигает значения $I_N \approx 7$. Расчеты устойчивости шнура в обычном режиме ($q_a \approx 3.3$) в конфигурации с двумя X-точками при $I_N = 4.4$ показывают, что он остается устойчивым по отношению к балонным модам при $\beta_T \leq 18\%$ для первой зоны устойчивости [5]. Для достижения режимов с большой долей неиндукционного тока, генерируемого градиентами давления плазменного шнура [6], требуется получение режимов с большой $\beta_p = \langle p \rangle / (B_p^2 / 8\pi)$, где $\langle p \rangle$ — среднее по объему давление плазмы, B_p — напряженность магнитного поля тока плазмы. Получение таких режимов при предельном давлении плазмы возможно лишь при увеличении запаса устойчивости на границе. При этом важно увеличивать величину $q^* = L_p V_T / 2\pi \cdot R \cdot V_p$ (где L_p — длина обхода плазменного шнура в полоидальном направлении), т.е. снижать ток или магнитное поле при ограниченной вытянутости. Уменьшение как тока, так и поля приводит в свою очередь к снижению предельной плотности плазмы. Глобус-М позволяет работать в диапазоне $1.15 < q^* < 7$ при средней плотности плазмы $0.5 - 2.0 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, что существенно выше, чем в других сферических токамаках.

Методы и программа исследований

Первый этап экспериментальной программы — оптимизация параметров омического разряда будет осуществлен с применением традиционных методов получения плазмы и управления ее параметрами. Компенсация рассеянных полей до величины в несколько гаусс (рис. 2, *a*) и предыонизации плазмы на частоте 15 GHz позволяет существенно снизить напряжение пробоя плазменного шнура и сэкономить запас V · s полоидальной системы. На начальном этапе эксперимента подъем тока будет осуществляться индуктивным методом. Согласно расчетам необходимо около 0.18 V · s для достижения тока по плазме 0.3 МА, при этом скорость подъема тока составит около 5 МА/с. Стабилизация плазменного разряда обеспечивается, с одной стороны, за счет токов, возникающих в близко расположенной проводящей стенке камеры, и контура управления с обратной связью, с другой. Это позволяет подавить как быстрые броски шнура по вертикали, так и низкие гармоники винтовых мод. Другим способом подавления МГД активности плазмы может служить генерация тока в граничном слое с помощью подачи напряжения на диверторные пластины [7]. Сегменты диверторных пластин токамака Глобус-М изолированы друг от друга и от вакуумной камеры, что позволяет осуществить такой эксперимент без внесения существенных изменений в их конструкцию.

Мощный омический нагрев в комбинации с дополнительными методами нагрева приводят к повышенным потокам частиц и энергии на стенку камеры. Наряду с традиционными методами подготовки поверхности стенки камеры особое внимание уделено выбору защитных материалов и конструкции внутрикамерных элементов. Элементы защиты центрального цилиндра и дивертор-

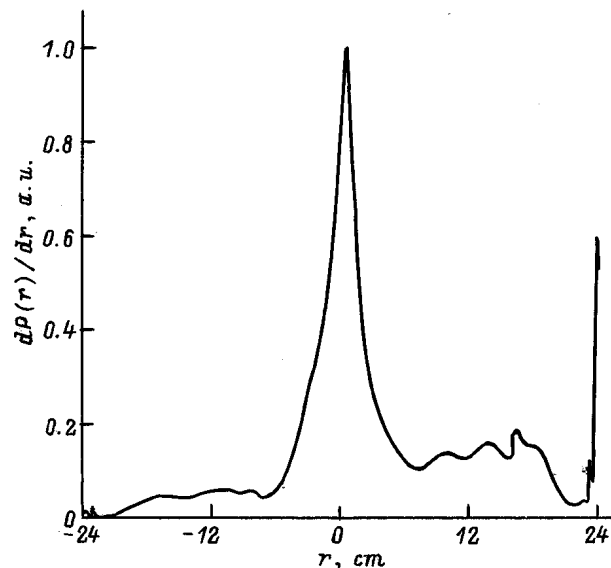


Рис. 3. Пространственный профиль поглощения ВЧ мощности при ионном циклотронном нагреве плазмы: $f = 11$ MHz, $B_0 = 0.5$ T, 5% H + 95% D.

ные пластины изготовлены из нержавеющей стали, легко снимаются и могут быть покрыты различными защитными материалами. Возможно нанесение покрытий из В, Ве и С толщиной до 1 mm. Быстрый доступ к защитным элементам для их замены осуществляется через два люка диаметром 400 mm в экваториальной части камеры.

За последнее время были выполнены работы по развитию методов ВЧ нагрева и генерации токов [8,9]. Проводилось моделирование распространения и поглощения магнитно-звуковых волн в квазитороидальной геометрии с учетом полоидальной и парамагнитной компонент поля. Расчеты проводились для диапазона частот 6–50 MHz, перекрывающего область от основной до восьмой гармоники ионного циклотронного резонанса. Разработанный код позволял решать одномерное волновое уравнение с "горячим" тензором диэлектрической проницаемости с учетом поправок 2-го порядка малости. В расчетах учитывались, таким образом, поглощение на основной и второй циклотронных гармониках, а также затухание Ландау, магнитная накачка и интерференционные механизмы. Для токамака Глобус-М было предсказано сильное поглощение магнитных звуковых волн в течение одного прохода (в некоторых случаях до 80%). Профили локального поглощения мощности, проинтегрированные по спектру волн, излучаемых антенной, показаны на рис. 3. Зона поглощения для основной гармоники ионной циклотронной частоты достаточно узкая. Для высоких гармоник быстрых звуковых волн поглощение энергии на частоте 30 MHz обеспечивает нагрев электронов в достаточно широкой зоне, равной половине малого радиуса. Возможна комбинация этого метода с нагревом ионов на второй гармонике ионно-

го циклотронного резонанса. При этом одновременно нагреваются как электроны (в широкой зоне), так и ионы (в узкой зоне). Этот эффект можно использовать для изменения профиля давления плазмы путем подстройки частоты генератора; такое изменение частоты не оказывает существенного влияния на поглощение энергии и нагрев в целом.

Традиционная схема генерации нижегибридных волн малоэффективна для сферических токамаков из-за барьера непрозрачности на краю плазмы. При этом лишь волны с большим начальным затуханием $N_{||} = 7-10$ проникают внутрь. Однако сильная неоднородность магнитного поля по полоидальному обходу позволяет использовать нестандартную схему для нагрева: волны с частотой менее $e \cdot B_{pol} / m_e \cdot c$, где B_{pol} — полоидальное магнитное поле, m_e и e — масса и заряд электрона, c — скорость света, и малыми начальными значениями $N_{||} = 2-4$ вводятся в плазму в полоидальном направлении в районе экватора. По мере проникновения внутрь $N_{||}$ растет вследствие неоднородности магнитного поля, что приводит к эффективному затуханию. Согласованность грилла, расположенного в экваториальной плоскости и повернутого на 90° , с плазмой довольно высока: коэффициент отражения составляет всего 10–15%, если профиль плотности плазмы не чрезмерно крутой. Расчеты лучевых траекторий показали, что в зависимости от параметров плазмы, энергия поглощается на радиусе от $0.3a$ до $0.7a$. Более низкая плотность и температура электронов на периферии приводит к центральному поглощению. Более высокие значения полного тока создают условия для эффективной генерации токов на границе, которая может достигать $0.04 \cdot 10^{20} \text{ A/m}^2 \cdot \text{W}$ [9]. График зависимости тока, генерируемого волнами, от тока плазмы приведен на рис. 4.

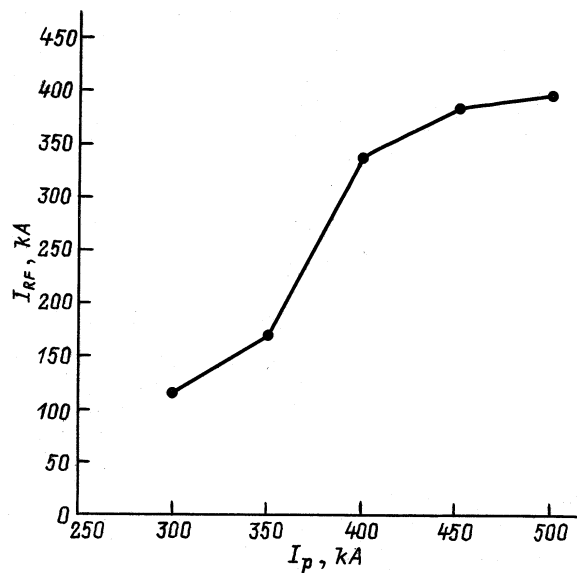


Рис. 4. Зависимость величины тока, генерируемого ВЧ волнами с частотой 2.45 GHz, от тока плазмы ($n_{e0} = 0.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$).

В соответствии с программой исследований разрабатывается комплекс диагностики для токамака Глобус-М. На первом этапе предполагается проводить магнитные измерения с помощью измерительных петель и двух наборов зондов (по 36 в каждом), использовать видеокамеру для контроля геометрии шнура, а также производить измерения некоторых интегральных параметров плазмы, таких как средняя плотность, потоки мягкого и жесткого рентгеновского излучения и т.п. Соответствующее оборудование подготовлено к монтажу или уже установлено на токамак. Дальнейшее развитие диагностического комплекса направлено на измерение локальных параметров плазмы с высоким временным и пространственным разрешением. На сегодняшний день завершены эскизные проекты и начато рабочее проектирование четырех инновационных диагностик: импульсного радар-рефлектометра, системы томсоновского рассеяния, системы рентгеновской томографии и высокоскоростной видеокамеры. Радар-рефлектометр представляет собой комбинацию фазового рефлектометра со свипированием частоты и импульсно-го радара. Система томсоновского рассеяния построена на базе неодимового лазера, генерирующего в течение разряда последовательность из 20 импульсов по 20 J каждый, и кремниевых лавинных детекторов. Предельная чувствительность системы по плотности плазмы очень высока — около $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^{-3}$. Система рентгеновской томографии включает две камеры-обскуры для регистрации мягкого рентгеновского излучения и измерения как неустойчивостей плазмы, так и ее электронной температуры. Скоростная видеокамера на базе прибора с зарядовой связью матрицы оснащена системой автоматической подстройки времени экспозиции во время записи кадра и обладает очень большим динамическим диапазоном.

Работы по подготовке эксперимента на сферическом токамаке Глобус-М вступили в завершающую стадию. Физический пуск установки предполагается осуществить в начале 1999 г.

Список литературы

- [1] *Belyakov V.A., Divavin V.A., Dvorkin N.Ya.* et al. Project of Spherical Tokamak Globus-M. Препринт ФТИ РАН. № 1629. СПб., 1994. 36 с.
- [2] *Golant V.E., Gusev V.K., Dyachenko V.V.* et al. // Proc 16th Int. Conf. on Fusion Energy. IAEA-CN-64/GP-15. Vienna, 1997. Vol. 3. P. 591–599.
- [3] *Gusev V.K., Sakharov N.V., Spheizman V.V.* et al. // Fusion Technology. 1998. Vol. 34. N 2. P. 137–146.
- [4] *Gryaznevich M.P., Akers R., Carolan P.G.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80. N 18. P. 3972–3975.
- [5] *Bespoludennov S.G., Degtyarev L.M., Medvedev S.Yu.* // Spherical Torus'97. 1997. Vol. 1. P. 403–415.
- [6] *Menard J.E., Jardin S.C., Kaye S.M.* et al. // Nuclear Fusion. 1997. Vol. 37. N 5. P. 595–610.
- [7] *Goldston R.J.* // Controlled Fusion and Plasma Physics. 1997. Vol. 21A. Pt III. P. 1061–1064.
- [8] *Ирзак М.А., Трегубова Е.Н., Щербинин О.Н.* // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 7. С. 1–9.
- [9] *Esterkin A.R., Gusakov E.Z., Irzak M.A.* // Spherical Torus'97. 1997. Vol. 1. P. 265–282.