

УДК 533.9.082.74

## РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ НА УСТАНОВКЕ TRT: АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

© 2022 г. Д. А. Шелухин<sup>а</sup>, \*, Г. Ф. Субботин<sup>а</sup>, В. А. Вершков<sup>а</sup>, И. А. Владимиров<sup>а</sup><sup>а</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*e-mail: shelukhin\_da@nrcki.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 16.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Рефлектометрия рассматривается в настоящий момент как одна из перспективных диагностик для измерения параметров плазмы в термоядерных установках. Диагностика имеет хорошую совместимость с высокими потоками нейтронов, устойчива к механическим, тепловым и электромагнитным нагрузкам во время плазменного режима, имеет малую чувствительность к пыли. Рефлектометрия широко применяется на существующих установках для измерения профиля электронной плотности и параметров флуктуаций плотности. В данной работе проводится анализ возможностей рефлектометрии на создаваемой установке TRT с точки зрения физической возможности проведения измерений, параметров требующихся рефлектометров, технической реализуемости диагностики с учетом современного развития микроволновой техники и диагностики рефлектометрия в России и за рубежом. При создании системы рефлектометрической диагностики для установки TRT предлагается широко использовать опыт создания аналогичной системы для токамака ИТЭР.

*Ключевые слова:* токамак, рефлектометрия

**DOI:** 10.31857/S036729212260042X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент рефлектометрия широко применяется для исследования параметров плазмы в термоядерных установках. Существует два основных направления при проведении измерений с помощью рефлектометрии – измерение профиля электронной плотности и измерение параметров флуктуаций плазмы.

Измерение профиля электронной плотности с помощью рефлектометров в настоящий момент реализовано на ASDEX-Upg [1], JET [2], DIII-D [3], TORE-SUPRA [4] и других установках. Есть успешный опыт создания подобной диагностики и в Российской Федерации в рамках работ по созданию рефлектометрической диагностики со стороны сильного магнитного поля для установки ИТЭР [5]. Наибольшее распространение при измерении профиля электронной плотности получила методика, основанная на быстром изменении частоты зондирующего излучения с регистрацией разности частот излучаемого и отраженного сигналов – Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW, непрерывная волна с частотной модуляцией) [6]. Для измерения параметров флуктуаций плазмы применяется анализ флуктуаций отраженного сигнала, в том числе с использованием корреляционного анализа [7].

Целью данной работы является анализ возможностей проведения измерений с помощью рефлектометрии на разрабатываемой установке TRT [8]. Основное внимание будет уделено физическим возможностям для проведения измерений с учетом запланированных параметров плазмы в TRT (высокое магнитное поле, высокая электронная плотность). Также в работе будет представлено возможное размещение элементов диагностики в вакуумной камере TRT. Детальный анализ возможностей диагностики (достижимое пространственное и временное разрешение, погрешность измерений, диапазон измеряемых величин и пр.), как и детальный инженерный анализ систем диагностики (интеграция внутри вакуумной камеры с другими системами, анализ нагрузок и пр.) лежит за рамками данной работы.

Статья организована следующим образом. После данного краткого введения, во второй главе излагаются принципы работы рефлектометрии и проводится анализ возможностей для организации измерений в существующем сценарии работы установки TRT. Третья глава посвящена возможным вариантам конструкций систем установки – антенной системы и приемно-передающего тракта диагностики. Схема приемно-передающего оборудования и СВЧ-электроники приведены

в главе четыре. Там же приведены оценки требуемых параметров электроники и системы сбора и обработки данных. Пятая глава посвящена предварительному анализу достижимых параметров диагностики. В заключении кратко сформулированы основные выводы и предложения по реализации диагностики на TRT.

## 2. АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ НА TRT

Рефлектометрия – активная диагностика, основанная на отражении зондирующего излучения гигагерцового диапазона частот от слоя плазмы с параметрами, определяемыми, вообще говоря, частотой зондирующего излучения, электронной плотностью плазмы и внешним магнитным полем, а также, с учетом релятивистской поправки, и температурой электронов [9]. Для практически значимого случая нормального распространения волн по отношению к магнитному полю, диэлектрическая проницаемость плазмы зависит от взаимного направления магнитных полей зондирующей волны и плазмы

$$\varepsilon^O = 1 - X^2 \text{ (O-мода)}$$

$$\varepsilon^X = \frac{(1 - X^2)^2 - Y^2}{1 - X^2 - Y^2} \text{ (X-мода)} \quad X = \frac{\omega_{pe}}{\omega}, Y = \frac{\omega_{ce}}{\omega}, \quad (1)$$

где  $\omega_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / m_e \varepsilon_0}$  – плазменная частота,  $\omega_{ce} = eB / m_e c$  – электронная циклотронная частота,  $\omega = 2\pi F$  – частота зондирующего излучения. Здесь и далее  $n_e$  – концентрация электронов,  $m_e$  – масса электрона,  $e$  – заряд электрона,  $c$  – скорость света в вакууме и  $B$  – величина внешнего магнитного поля. Зондирующая волна с магнитным полем, нормальным по отношению к внешнему магнитному полю называется обыкновенной (или O-волной), а волна с полем, параллельным внешнему магнитному полю – необыкновенной (или X-волной).

При равенстве нулю показателя преломления, происходит отражение зондирующего сигнала с заданной частотой (называемой частотой отсечки  $F_{cutoff}$ ), определяемой соотношениями:

$$F_{cutoff} = \begin{cases} \omega_p / 2\pi \text{ (O-мода)} \\ \frac{1}{2\pi} (\sqrt{\omega_p^2 + (\omega_c/2)^2} - (\omega_c/2)) \\ \text{(X-мода, ниж. отс.)} \\ \frac{1}{2\pi} (\sqrt{\omega_p^2 + (\omega_c/2)^2} + (\omega_c/2)) \\ \text{(X-мода, верх. отс.)} \end{cases} \quad (2)$$

При анализе работы рефлектометра для измерения профиля электронной плотности в плазме лабораторных установок практическое значение

имеет также время распространения зондирующего сигнала от антенны до области отражения и назад  $\tau_{TFD}$  (т.н. Time Flight Delay – TFD):

$$\tau_{TFD} = 2 \int_{R_A}^{R_{cutoff}} dl / v_g, \quad (3)$$

где  $R_A$  соответствует положению антенн диагностики,  $R_{cutoff}$  – положению области отражения, а  $v_g$  – групповая скорость зондирующего излучения в плазме.

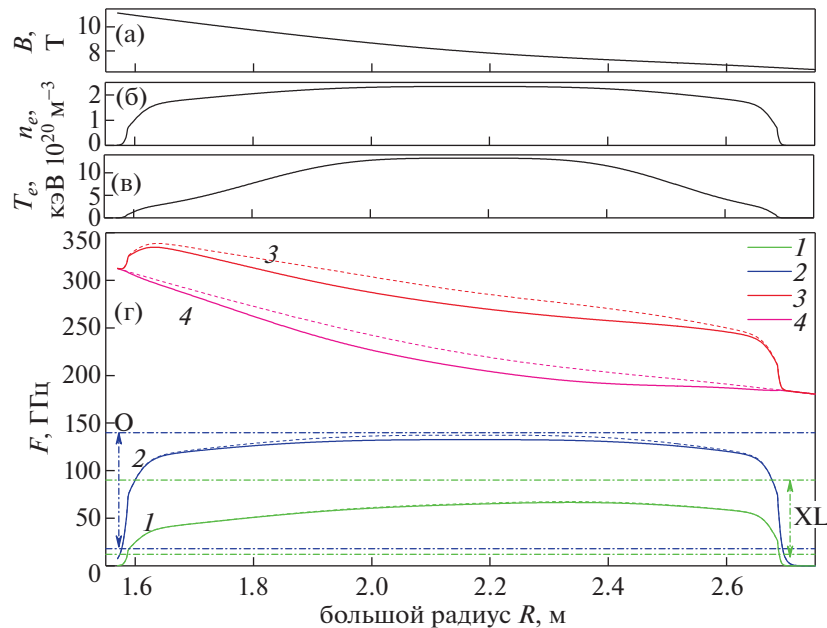
Анализ возможностей проведения измерений с помощью рефлектометрии опирается на анализ характерных частот отсечки для разных типов волн и их доступность для проведения измерений, связанную с наличием в плазме поглощения на основной и высших гармониках электронного циклотронного резонанса. Если резонанс располагается между антенной и областью отражения, это делает проведение на данной частоте невозможным.

В качестве базовых профилей основных параметров плазмы были выбраны профили для основного индуктивного сценария работы TRT [8] (рис. 1а, б, в).

Значения характерных частот плазмы рассчитывалось с использованием соотношений (2). Для учета релятивистской поправки использовалась формула, предложенная Э. Маццукато [10]. Профили характерных частот для анализируемого режима приведены на рис. 1г.

Большинство установок используют для измерения профиля электронной плотности зондирование плазмы с помощью рефлектометра со стороны слабого магнитного поля и отражения от плазмы на верхней отсечке необыкновенной волны [1–4]. Это связано с хорошей доступностью плазмы и отсутствием проблем инициализации задачи восстановления профиля электронной плотности [11]. Анализ характерных частот для токамака TRT показывает, что данная схема измерений требует использования СВЧ-источников с частотами 200–270 ГГц. Хотя такие источники коммерчески доступны, однако использование зондирующего излучения с длиной волны порядка 1–1.5 мм в турбулентной плазме приводит к сильным возмущениям фазы в отраженной волне.

Как было показано в работе Э. Маццукато и Р. Назикяна, возмущения фазы  $\sigma_\phi$  более 1.5 радиана делают проведение измерений профиля электронной плотности невозможным [12]. Полученная в работе [12] оценка связи между амплитудой флуктуаций плотности и возмущениями фазы отраженного сигнала может быть использована для



**Рис. 1.** Профили параметров разряда в основном квазистационарном разряде установки TRT. На графике г) штриховыми линиями показаны характерные частоты в приближении холодной плазмы, сплошными – с учетом релятивистской поправки. 1 – нижняя отсечка необыкновенной волны, 2 – отсечка обыкновенной волны, 3 – верхняя отсечка необыкновенной волны, 4 – частота электронного циклотронного резонанса. а) – полное магнитное поле; б) – электронная плотность; в) – электронная температура; г) – характерные частоты в плазме TRT.

оценки ожидаемых возмущений фазы отраженного сигнала в TRT

$$\sigma_\varphi = \langle |\tilde{\varphi}|^2 \rangle^{1/2} = 4\pi M \frac{F \sqrt{L_\varepsilon \Delta_r^{cor}} \sigma_n}{c n_{cr}}, \quad (4)$$

$$M_o = 1, \quad M_x = 2,$$

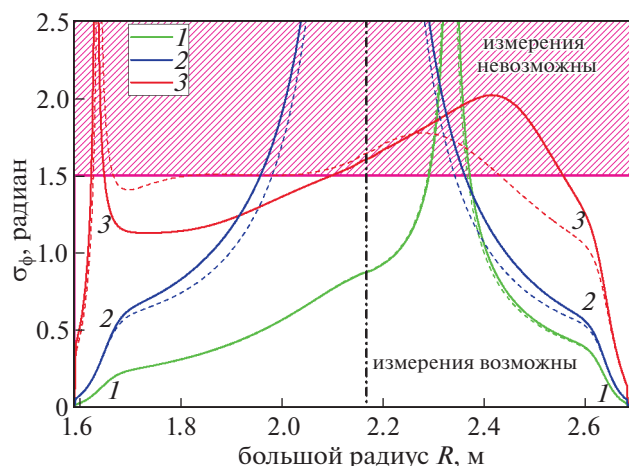
где  $L_\varepsilon = (d\varepsilon/dR)^{-1}$  – характерный размер профиля диэлектрической проницаемости в точке отражения,  $\Delta_r^{cor}$  – радиальная корреляционная длина флуктуаций,  $\sigma_n/n_e$  – относительная амплитуда возмущений электронной плотности в точке отражения. Значение коэффициента  $M$  зависит от поляризации волны зондирующего излучения. Результаты оценки ожидаемой амплитуды флуктуаций фазы отраженного сигнала для установки TRT приведены на рис. 2. При оценке использовался типичный для современных установок уровень флуктуаций плотности в Н-режиме 0.1% и радиальный корреляционный размер флуктуаций 1 см. Видно, что при использовании зондирования со стороны слабого магнитного поля и верхней отсечки необыкновенной волны амплитуда флуктуаций фазы существенно превышает 1.5 радиана, что делает проведение измерений невозможным.

Проведение измерений с использованием обыкновенной волны возможно на периферии плазменного шнура, однако в центральной области плазменного шнура (внутри  $r/a \leq 0.3$ ) проведение измерений будет невозможно из-за плос-

кого профиля электронной плотности и высокого уровня флуктуаций фазы отраженного сигнала. Целесообразность реализации отдельной диагностики для наблюдения внешней половины плазменного шнура со стороны слабого магнитного поля должна быть дополнительно проанализирована с учетом требований к измеряемым диагностикой параметрам и ожидаемым параметрам турбулентности.

Таким образом, единственной схемой для проведения измерений параметров плазмы с помощью рефлектометрии на TRT во всем плазменном шнуре является использование сочетания зондирования со стороны сильного магнитного поля и отражения от нижней отсечки необыкновенной волны. Для данного типа измерений доступна вся внутренняя часть плазменного шнура, поскольку частота отсечки монотонно возрастает и далека от циклотронного резонанса. Уровень флуктуаций фазы составляет менее 1 радиана вплоть до центра плазменного шнура. Данная схема была предложена для проведения измерений на установке ИТЭР [13]. Работоспособность схемы была подтверждена в экспериментах на установке T-10 [5].

Следует отметить, что при измерении профиля электронной плотности с использованием нижней отсечки необыкновенной волны серьезную проблему представляет инициализация задачи восстановления профиля. В работе [5] для этого используются данные измерений профиля элек-



**Рис. 2.** Профили ожидаемых возмущений фазы отраженного сигнала рефлектометра в основном квазистационарном разряде установки TRT. На графике штриховыми линиями показаны характерные частоты в приближении холодной плазмы, сплошными — с учетом релятивистской поправки. Заштрихованная область показывает область плазмы, измерения в которой для данного типа волны невозможны. 1 — нижняя отсечка необыкновенной волны, 2 — отсечка обыкновенной волны, 3 — верхняя отсечка необыкновенной волны.

тронной плотности на периферии плазмы с использованием измерений на обыкновенной волне. Таким образом, для проведения измерений профиля электронной плотности потребуется не менее двух приемно-передающих линий и антенных систем на стороне сильного магнитного поля. По-видимому, целесообразно ориентироваться на проведение измерений в диапазоне частот от 18 до 140 ГГц на обыкновенной волне и от 12 до 90 ГГц на необыкновенной волне.

### 3. АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДИАГНОСТИКИ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ УСТАНОВКИ

При анализе возможной конструкции элементов диагностики авторы исходили из следующих предпосылок:

- диагностика размещается со стороны сильного магнитного поля в плоскости магнитной оси установки;
- в конструкцию размещенных внутри вакуумной камеры систем будут внесены требуемые для интеграции диагностики изменения, как-то: вырезы, перенос инженерных сетей, трубопроводов, креплений и т.д.;
- элементы диагностики в свободном пространстве размещаются без учета требований других систем, в том числе допускается перекрытие хорд наблюдения, патрубков и пр.

В целом в конструкции рефлектометрических систем можно выделить три основных части — антенный комплекс, приемно-передающий тракт и СВЧ-оборудование. Рассмотрим каждую из этих частей подробнее.

#### 3.1. Антенная система диагностики

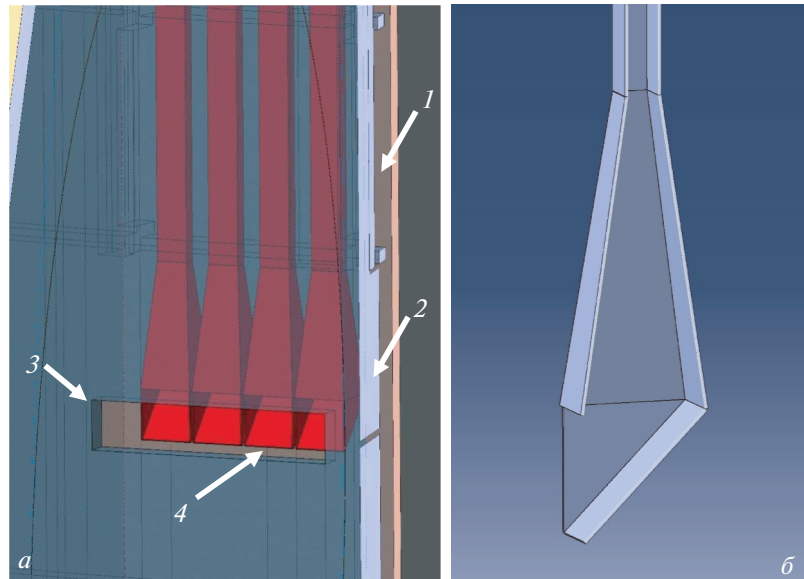
Особенностью токамака TRT является малое расстояние между вакуумной камерой и первой стенкой. Это не позволяет разместить на стороне сильного магнитного поля волноводный поворот и полноценную антенную систему классического типа (пирамидальный рупор). Единственной возможностью является использование рупорной антенны с интегрированным уголковым отражателем, аналогично антенной системе рефлектометра для токамака T-15МД. Подобные антенны были применены на установке T-10 и показали свою работоспособность как для задач измерения профиля электронной плотности, так и при исследовании флуктуаций плазмы [5, 14].

Измерения на стенде рефлектометрии ИТЭР показали, что при измерении расстояния до точки отражения в пределах от 20 см до 2 метров достаточно апертуры антенны около  $40 \times 40$  мм. Предлагаемая конструкция антенны показана на рис. 3.

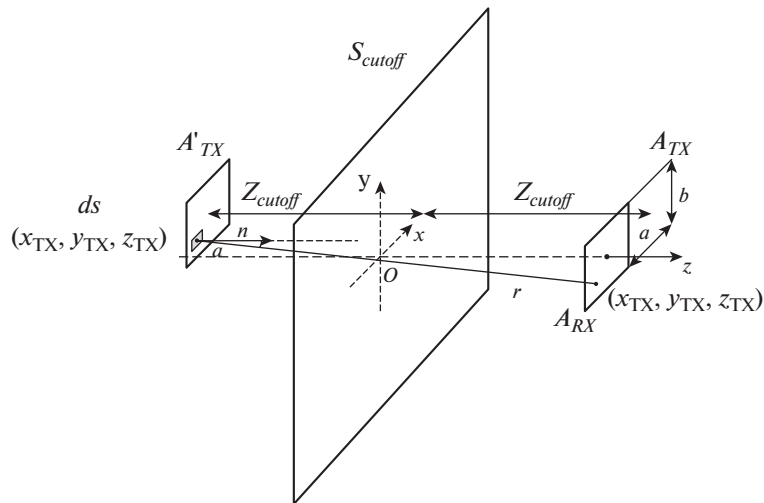
Проведем оценку связи антенн в вакуумном приближении, пользуясь принципом Гюйгенса—Френеля в формулировке Кирхгофа [15]. Выберем систему координат, в которой плоская отражающая поверхность  $S_{cutoff}$  лежит в плоскости  $Oxz$  (рис. 4). Ось  $Oz$  проходит через центр апертуры приемной антенны  $A_{RX}$  с размерами  $a \times b$  вдоль осей  $Oz$  и  $Oy$  соответственно. Излучающая антенна  $A_{TX}$  смещена вдоль оси  $Ox$  на расстояние, равное размеру антенны ( $a$ ). Излучающая и приемная антенны расположены на расстоянии  $Z_{cutoff}$  от отражающей поверхности, нормали к апертурам антенн коллинеарны оси  $Oz$ . Отражающая поверхность формирует изображение излучающей антенны  $A'_{TX}$ . Согласно формуле Кирхгофа, напряженность электрического поля в точке на апертуре приемной антенны  $E_{RX}$  будет определяться как

$$E_{RX}(x_{RX}, y_{RX}, z_{RX}) = -\frac{ik}{2\pi} \int_S F(\alpha) E_{TX}(x_{TX}, y_{TX}, z_{TX}) \frac{e^{-ikr}}{r} ds,$$

где  $k$  — волновой вектор зондирующего излучения в вакууме,  $r$  — расстояние между точками на изображении излучающего рупора и на апертуре приемного рупора,  $E_{TX}$  — распределение напряженности электрического поля на изображении апертуры излучающего рупора  $A'_{TX}$ ,  $F(\alpha)$  — функция угла между нормалью  $n$  к излучающей по-



**Рис. 3.** Антенная система со стороны сильного магнитного поля на токамаке TRT. а) – антенная система в окружении вакуумной камеры токамака; б) – антенная система рефлектометра для измерения профиля электронной плотности. 1 – стенка вакуумной камеры; 2 – первая стенка (показана полупрозрачной); 3 – вырез в первой стенке; 4 – антенная система рефлектометра.



**Рис. 4.** Геометрия, используемая при оценке связи антенн.

верхности  $ds$  и направлением на анализируемую точку в приемном рупоре. При использовании данного подхода не учитывается влияние на связь антенн плазмы, которая дополнительно рассеивает пучок зондирующего излучения, однако метод дает достаточную для предварительных оценок точность.

Пренебрежем влиянием сложной геометрии антенн и будем считать, что на апертуре излучающей антенны формируется плоский волновой фронт с распределением напряженности электрического поля, соответствующего волноводной моде  $TE_{10}$  при зондировании плазмы на необык-

новенной волне и  $TE_{01}$  при зондировании плазмы на необыкновенной волне. Напряженность поля на изображении излучающей антенне в таком случае равна

$$TE_{10} : E_{TX}(x_{TX}, y_{TX}, -z_{cutoff}) = \sqrt{\frac{2}{ab}} \cos\left(\frac{\pi(x-a)}{a}\right), \quad (3.1)$$

$$TE_{01} : E_{TX}(x_{TX}, y_{TX}, -z_{cutoff}) = \sqrt{\frac{2}{ab}} \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right).$$

Напряженность поля на апертуре антенны нормирована, так, чтобы полная мощность в излучаемой волне была равна единице.

Функция  $F(\alpha)$  определяется проекцией направления на приемную точку на нормаль  $n$  к излучающей площади  $ds$ . В случае плоского волнового фронта в излучающей антенне эта функция определяется из геометрических соображений

$$r = \sqrt{(x_{RX} - x_{TX})^2 + (y_{RX} - y_{TX})^2 + 4Z_{cutoff}^2},$$

$$F(\alpha) = \cos(\alpha) = \frac{2Z_{cutoff}}{r}.$$

Интегрирование выполняется по апертуре изображения излучающей антенны

$$E_{RX}(x_{RX}, y_{RX}, Z_{cutoff}) =$$

$$= -\frac{ik}{2\pi} \int_{a/2}^{3a/2} \int_{-b/2}^{b/2} E_{TX}(x_{TX}, y_{TX}, -Z_{cutoff}) \frac{e^{-ikr}}{r} \frac{2Z_{cutoff}}{r} dx dy.$$

При оценке связи антенн также следует принять во внимание, что распределение поля на апертуре приемной антенны отличается от распределения, соответствующего основной волноводной моде и определяемого формулами (3.1). Несмотря на то, что возбуждаемые в антенне и волноводе высшие типы волноводных мод могут передаваться по сверхразмерному волноводному тракту, они не будут участвовать в формировании сигнала на приемном миксере, так как приемные СВЧ-миксеры рассчитаны на работу с фундаментальным типом волноводной моды  $TE_{10}$ . С учетом этого, связь антенн определяется как:

$$TE_{10} : C_X =$$

$$= 20 \log \int_{a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{\sqrt{2}}{a} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) E_{RX}(x_{RX}, y_{RX}) dx dy,$$

$$TE_{01} : C_O =$$

$$= 20 \log \int_{a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{\sqrt{2}}{b} \cos\left(\frac{\pi x}{b}\right) E_{RX}(x_{RX}, y_{RX}) dx dy.$$

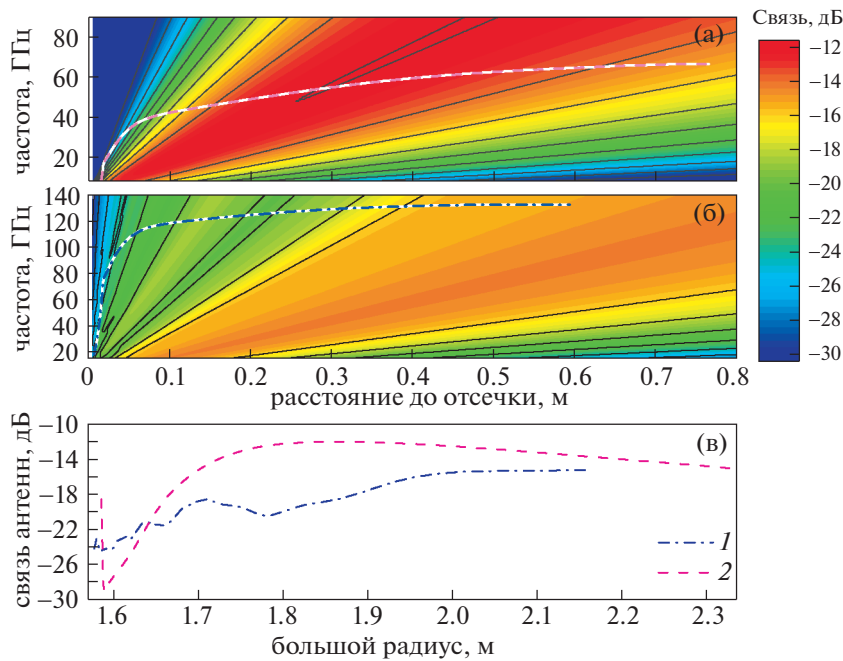
Полученная в указанных предположениях связь антенн показана на рис. 5а и б. Связь антенн для основного режима работы TRT показана на рис. 5а и б цветными линиями для необыкновенной и обыкновенной волны и на рис. 5в. Видно, что типичная связь антенн в центральной части плазменного шнура составляет от  $-12$  до  $-25$  дБ, что сопоставимо со связью антенн в установке Т-10. На периферии шнура и области SOL можно ожидать падения связи антенн до  $-30$  дБ из-за малого расстояния между антеннами и отражающей поверхностью. Следует отметить, что достоверность расчетов в этой области невелика, так как связь антенн в ближней зоне сильно зависит от частоты зондирующего излучения и расстояния до отсечки, определяемыми параметрами режима.

### 3.2. Приемно-передающий тракт

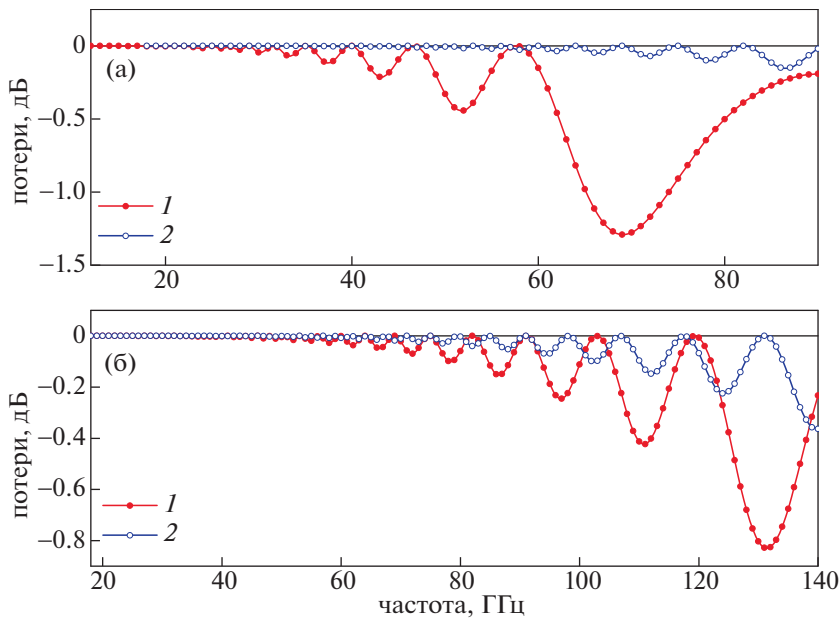
Особенности расположения антенной системы, необходимость интеграции тракта в области с большим количеством других систем и широкий диапазон рабочих частот не позволяют использовать тракты с низкими потерями на основе гофрированных волноводов. Единственным вариантом является использование тракта на основе прямоугольных волноводов аналогично системе рефлектометра со стороны сильного магнитного поля ИТЭР. Размер поперечного сечения волновода определяется минимальной частотой зондирующего излучения. Поскольку требуемый диапазон частот зондирующего излучения совпадает с требуемым ИТЭР, можно применить волноводы с типоразмером, используемым на ИТЭР ( $20 \times 12$  мм, стенка 1 мм). Также возможно применение стандартного волновода  $23 \times 10$  мм, стенка 1 мм [16]. Следует отметить, что с целью снижения нагрузки на волноводы во время срывов целесообразны волноводы из материалов с низкой электропроводностью (нержавеющая сталь SS304, SS316, сплав 718) с тонким слоем меди на внутренней стенке. Образец волноводов такого типа длиной до 2.5 метра был изготовлен для установки ИТЭР фирмой CONVEXUM (Франция). Тестирование макетов волновода показало, что омические потери превышают ожидаемые потери в медном волноводе не более чем на 20%.

Еще одной проблемой является наличие в волноводном тракте поворотов. Поскольку волновод работает в многомодовом режиме, неоднородности тракта (к которым относятся и повороты), приводят к преобразованию СВЧ-излучения основной волноводной моды  $TE_{10}$  в высшие волноводные моды. Для уменьшения данного эффекта следует применять повороты специальной формы [17]. Для оптимизации волноводной траектории и для описания распространения рабочей моды в сверхразмерном волноводе и расчета потерь на преобразование мод использовался численный код на основе метода поперечных сечений [18]. На каждом шаге код проводит проверку на возможность размещения волновода в существующем окружении токамака [19]. Пример расчета потерь в изогнутой секции волновода вдоль вакуумной камеры показан на рис. 6.

Видно, что для существующей геометрии предпочтительным выглядит изготовление внутренней части приемно-передающего тракта рефлектометра из волновода с внутренним сечением  $23 \times 10$  мм. Максимальные потери на преобразование мод в повороте для данного типоразмера волновода составляют около 0.2 дБ для Х-волны и 0.3 дБ для О-волны, тогда как для волновода типоразмера  $20 \times 12$  мм они составляют 1.3 и 0.8 дБ соответственно. К сожалению, данная траектория целиком определяется геометрией ваку-



**Рис. 5.** Оценка связи антенн в вакууме. 1 – рефлектометр на обыкновенной волне, 2 – рефлектометр на нижней отсечке необыкновенной волны. а) – связь антенн как функция рабочей частоты рефлектометра и расстояния до поверхности отсечки при зондировании плазмы на необыкновенной волне; б) – связь антенн как функция рабочей частоты рефлектометра и расстояния до поверхности отсечки при зондировании плазмы на обыкновенной волне; в) – связь антенн для сценария работы ТРТ с магнитным полем 8 Т и током плазмы 5 МА.

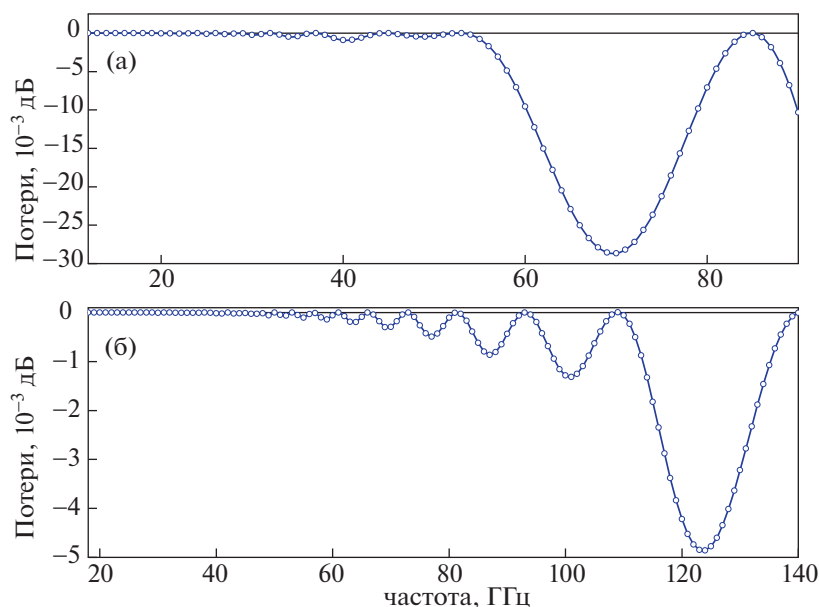


**Рис. 6.** Потери СВЧ-излучения на преобразование в высшие типы волн в плавном повороте вдоль стенки вакуумной камеры. 1 – волновод сечением  $20 \times 12$  мм, 2 – волновод сечением  $23 \times 10$  мм. а) – потери на преобразование в высшие типы волн для волноводной моды  $TE_{10}$  (соответствует  $X$ -волне в плазме), б) – потери на преобразование мод для волноводной моды  $TE_{01}$  (соответствует  $O$ -волне в плазме).

умной камеры и не может быть оптимизирована. Еще одним преимуществом волновода с внутренним сечением  $23 \times 10$  мм является его доступность в Российской Федерации в виде готового проката и наличие на производствах технологи-

ческой оснастки для изготовления волноводов и элементов тракта.

Для поворота на выходе в верхний порт была проведена оптимизация траектории с учетом трассировки волноводной линии внутри камеры



**Рис. 7.** Потери СВЧ-излучения на преобразование в высшие типы волн в оптимизированном повороте из вакуумной камеры в верхний порт. а) – потери на преобразование в высшие типы волн для волноводной моды  $TE_{10}$  (соответствует  $X$ -волне в плазме), б) – потери на преобразование в высшие типы волн для волноводной моды  $TE_{01}$  (соответствует  $O$ -волне в плазме).

и ограничений на размещение поворота в верхнем патрубке. Зависимость потерь СВЧ-мощности от частоты в повороте оптимизированной формы показано на рис. 7. Видно, что поворот оптимизированной формы позволяет снизить потери СВЧ-мощности на преобразование мод до менее чем 0.1 дБ.

Предварительная трассировка волноводной линии в камере установки TRT в окружении внутрикамерных конструкций токамака показана на рис. 8. Следует отметить, что для сохранения низких потерь в волноводной линии в траектории должны отсутствовать повороты большой кривизны. Поэтому для успешной реализации рефлектометрической диагностики на установке TRT потребуется перенос технических коммуникаций в вакуумной камере и верхнем вертикальном порту.

Для ввода излучения внутрь вакуумной камеры предполагается использовать диэлектрические вакуумные окна. Одним из возможных вариантов является первичное вакуумное окно ИТЭР на основе кварцевых пластин, соединенных с тонкостенной металлической обечайкой с использованием диффузионной сварки алюминием [20]. Существенным недостатком вакуумного окна ИТЭР является большое количество резонансов (вплоть до  $-5$  дБ). Возникновение резонансов связано с отражением СВЧ-волны на границах высокой диэлектрической проницаемостью плавленого кварца. Представляется целесообразным рассмотреть вопрос о применении в качестве материала вакуумного окна вспененного полиметакрилимид

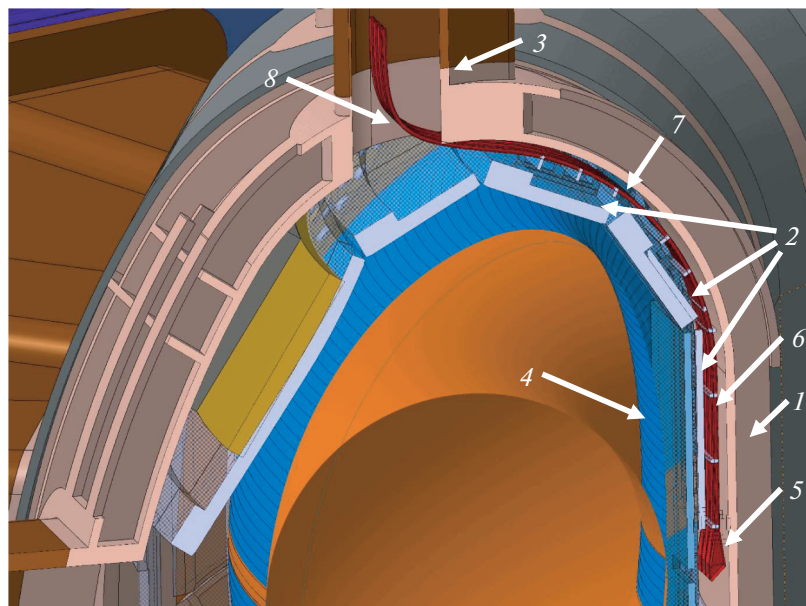
(коммерческое название RОНACELL HF) [21]. Данный материал обладает низкой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon \approx 1.09$ ) и тангенсом угла диэлектрических потерь ( $\tan \delta \approx 2 \times 10^{-3}$ ). Стендовые измерения продемонстрировали, что поток дейтерия через материал RОНACELL 71HF составляет  $9.5 \times 10^{12}$  мол.  $D_2/cm^2$  с при максимальной рабочей температуре ( $180^\circ C$ ) [22]. Для уменьшения натекания можно использовать двойное окно с дифференциальной откачкой. Вакуумные окна из RОНACELL использовались в экспериментах на установке T-10 и продемонстрировали хорошую работоспособность.

Поскольку волноводные элементы должны работать в полосе частот порядка одной октавы, для построения широкополосной схемы потребуется использование набора СВЧ-генераторов в стандартных частотных диапазонах. Для объединения сигналов различных частотных диапазонов предлагается использовать систему сложения, разработанную для установки ИТЭР ИПФ РАН (Н. Новгород), позволяющую проводить объединение волн 5 различных частотных диапазонов от 12 до 90 ГГц с потерями не более 2.5 дБ [23].

#### 4. АКТИВНОЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Поскольку рефлектометрия является активной диагностикой, она включает в свой состав как приемники, так и излучатели СВЧ-сигнала. Традиционная схема рефлектометра для измерения профиля электронной плотности основана





**Рис. 8.** Предварительная трассировка волноводной линии рефлектометра на стороне сильного магнитного поля в камере установки TRT. 1 – стенка вакуумной камеры, 2 – элементы первой стенки, 3 – верхний вертикальный порт, 4 – плазма, 5 – антенная система рефлектометрии со стороны сильного магнитного поля, 6 – прямая волноводная секция диагностики, 7 – плавный изгиб волноводной линии вдоль стенки вакуумной камеры, 8 – изгиб волноводной линии оптимизированной формы для выхода в верхний порт.

на использовании генераторов, управляемых напряжением (ГУН) в качестве источников СВЧ-излучения в диапазоне частот от 8 до 20 ГГц и активных умножителей частоты для получения зондирующего излучения требуемого частотного диапазона. Типичная схема такого рефлектометра приведена на рис. 9 [5].

Существенным условием при проведении измерений является квазистационарность профиля плазмы во время быстрого изменения (сви́пирования) частоты ГУН. Оптимальным временем для изменения частоты в полном частотном диапазоне считается интервал от 1 до 10 мкс. Меньшие времена сканирования частоты ГУН приводят к существенным техническим сложностям (высокие частоты биений сигнала на приемном миксере, необходимость использования высокоскоростных ЦАП для управления ГУН, конечная ширина полосы управления ГУН). Помимо этого, малые времена сви́пирования приводят к потере информации на краях частотного диапазона. Использование больших времен развертки приводит к артефактам на восстановленном профиле, связанным с эволюцией профиля плазмы за время измерений. По-видимому, период сви́пирования 5 мкс, принятый на ИТЭР, является оптимальным выбором, и в дальнейших оценках авторы будут опираться на данное значение времени сви́пирования.

Макет задающего генератора с интегрированным термостатированным модулем для поддержания стабильности температуры ГУН был изготовлен в рамках работ по проекту ИТЭР сотруд-

никами МАИ в 2013 году и использован в ходе работ по измерению профиля плазмы с использованием зондирования со стороны сильного магнитного поля на необыкновенной волне на установке Т-10 [5]. Созданный прибор осуществлял генерацию СВЧ-излучения с заданной частотой в диапазоне частот от 8 до 20 ГГц по измерительному и опорному каналам, формирование промежуточных частот и квадратурную демодуляцию принятого сигнала.

Формирование требуемого частотного диапазона осуществлялось модулями излучения и приема, выполненных в виде отдельных изделий. Модули были соединены с управляющим генератором с помощью коаксиальных СВЧ-кабелей для облегчения размещения на системе сложения.

Требуемые параметры генератора (промежуточную частоту гетеродина) и системы сбора данных (частоту дискретизации) можно оценить из ожидаемой скорости сви́пирования частоты зондирующего излучения и задержки. Ориентируясь на профили основного режима TRT, можно оценить задержку в распространении сигнала до области отсечки и обратно и частоту сигнала биений на приемном миксере (рис. 10). Принимая время сканирования равным 5 мкс и максимальные рабочие диапазоны частот 60–90 ГГц для рефлектометра на нижней отсечке необыкновенной волны и 90–140 ГГц для рефлектометра на обыкновенной волне можно оценить характерные частоты биений для рефлектометров как 70 МГц и 350 МГц соответственно. Характерная

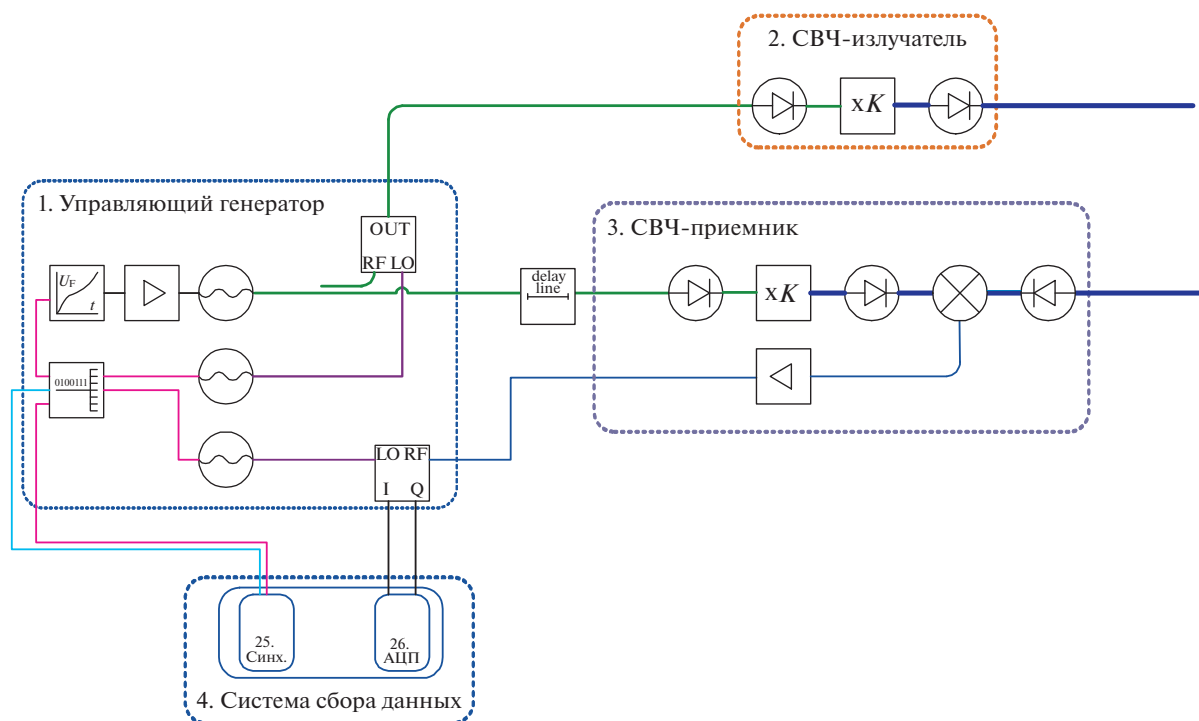


Рис. 9. Схема рефлектометра для измерения электронной плотности со стороны сильного магнитного поля установки Т-10 [5].

частота гетеродина при этом должна составлять не менее 700–800 МГц. Для унификации оборудования с оборудованием Т-15МД и ИТЭР можно ориентироваться на оборудование с промежуточной частотой 1 ГГц. Характерная частота биений накладывает также ограничения на выбор аналогово-цифровых преобразователей для регистрации сигналов. Входная полоса АЦП должна быть не менее 350 МГц, а частота опроса не менее

1 ГГц. Удобным вариантом выглядит предложенный для ИТЭР АЦП SP Devices/Teledyne ADQ414 – 4-канальный 14-битный АЦП с частотой опроса 1 ГВыборка/с и входной полосой в зависимости от модификации от 500 МГц до 2 ГГц.

Рефлектометр для измерения флуктуаций параметров плазмы в области отражения может быть реализован как по схеме, аналогичной рефлектометру для измерения профиля электронной плотности на основе СВЧ ГУН, так и с применением альтернативных СВЧ-источников, таких, как синтезаторы частоты. Выбор СВЧ-схемы рефлектометра для измерения флуктуаций плазмы может быть сделан после формулировки детальных требований к измеряемым параметрам.

## 5. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ

Измерение параметров плазмы с помощью рефлектометрии имеет существенные особенности, накладываемые спецификой данного метода диагностики. Хотя детальный анализ измеряемых параметров может быть сделан только для конкретного режима плазмы, некоторые оценки достижимых параметров диагностики могут быть сделаны на основе общих соображений.

Рассмотрим ограничения на рефлектометр для измерения профиля электронной плотности. Первое ограничение накладывает принцип

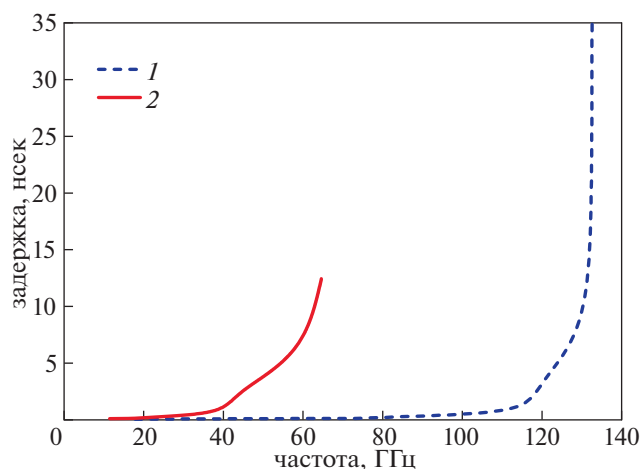


Рис. 10. Величины задержек в распространении сигнала от излучающего до приемного рупора для основного режима работы ТРТ. 1 – рефлектометр на обыкновенной волне; 2 – рефлектометр на нижней отсечке необыкновенной волны.

**Таблица 1.** Ожидаемые параметры рефлектометрии для измерения профиля электронной плотности для установки TRT

| Параметр | Диапазон   | Разрешение            |           | Точность  |           |
|----------|--|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
|          |  | пространств.          | временное | положение | плотность |
| $L(n_e)$ | $(4 \times 10^{18*}) 8 \times 10^{18} - 3,5 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ | до 50 точек на радиус | 1 мс      | 1 см + 5% | 5%        |

\*С уменьшенной точностью.

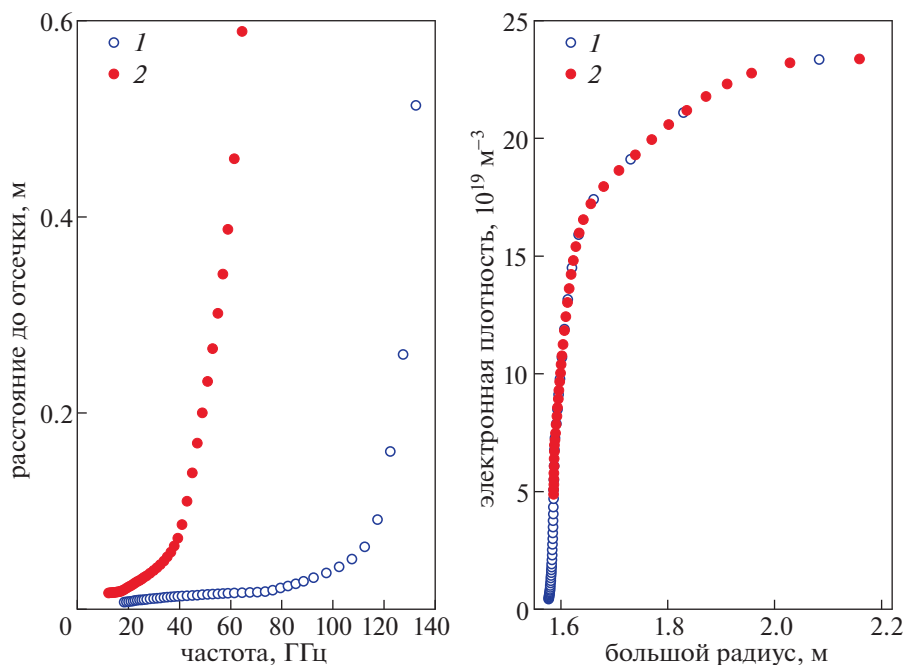
работы рефлектометра. Измерения рефлектометром представляют собой не измерения величины электронной плотности в конкретной области пространства, а *расстояние от референсной точки до точки отражения внутри плазменного шнура*. Существенным требованием при этом является монотонное возрастание частоты отсечки от периферии к центру плазменного шнура. При этом пространственное разрешение зависит не от геометрии наблюдений, а от количества временных окон, которые используются для оценки частоты доминирующих биений в сигнале приемного миксера. В экспериментах на установке Т-10 использовалось 10 независимых окон на один частотный диапазон, что дает для ТРТ около 50 положений области отсечки на профиле электронной плотности. Следует отметить, что количество окон для анализа сигнала может существенно изменяться как в меньшую сторону, так и в большую сторону вплоть до применяемого на TORESUPRA анализа с определением мгновенной частоты биений в каждой точке свипа [4]. Теоретическое временное разрешение рефлектометрической диагностики составляет 10 мкс (при работе со скважностью измерений 1/2, длине свипа 5 мкс и времени между свипами 5 мкс). Следует отметить, что при работе со скважностью 1/2 существенной проблемой становится поток данных в системе сбора, достигающий 40 ГБт/с, и полный объем собранных данных (4 ТБ за импульс длиной 100 секунд). Такой поток данных не может быть передан от АЦП на локальный диск или удаленный сервер, поэтому в настоящий момент практически значимым является режим работы со скважностью 1/20 (1 свип каждые 100 мкс), что позволяет сократить объем передаваемых данных в 10 раз, до приемлемого для современного развития электроники уровня. С учетом требования об усреднении данных отдельных свипов для подавления влияния турбулентности, достижимое временное разрешение диагностики составляет около 1 мс. Ожидаемые параметры диагностики приведены в табл. 1.

Точность измерений определяется несколькими эффектами. Прежде всего, поскольку задача восстановления профиля электронной плотности носит итерационный характер, точность измерения профиля электронной плотности зависит от

точности его восстановления в неизмеряемой части плазменного шнура. Удовлетворительная точность (около 5%) достигается только при условии монотонного уменьшения электронной плотности в неизмеряемой области, например, если вся неизмеряемая часть профиля электронной плотности лежит в области SOL. Это условие накладывает ограничение на минимальную электронную плотность на сепаратрисе, при которой возможно достигнуть удовлетворительной точности измерений рефлектометром. При использовании для инициализации рефлектометра на обыкновенной волне эта плотность соответствует частоте зондирующего излучения 26.5 ГГц и составляет  $8 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ .

Вторым фактором, влияющим на точность восстановления профиля электронной плотности, является максимальная длина зондирующего излучения. Считая, что минимальная рабочая частота рефлектометра составляет 12 ГГц, можно считать, что достижимая абсолютная точность измерения расстояния до положения отсечки составит около 1 см. Остальными факторами, влияющими на точность восстановления профиля, являются ошибки в восстановлении локального значения полного магнитного поля и электронной температуры. Эти ошибки приводят как к неверному определению положения области отсечки, так и погрешности в определении локальной плотности электронов в этой области.

Следует еще раз подчеркнуть, что, так как рефлектометрическая диагностика измеряет положение области отсечки, то радиальное разрешение этого метода существенно зависит от величины и профиля электронной плотности в конкретном плазменном режиме. На рис. 11 приведен типичный вид восстановленного расстояния до поверхности отсечки и восстановленный профиль электронной плотности. Видно, что рефлектометрическая диагностика имеет высокое пространственное разрешение в области резких градиентов электронной плотности, тогда как в области плоского профиля электронной плотности пространственное разрешение этого метода измерений снижается. Такая особенность определяет сильную сторону рефлектометрии – высокое пространственное разрешение в области положения барьеров на электронной плотности.



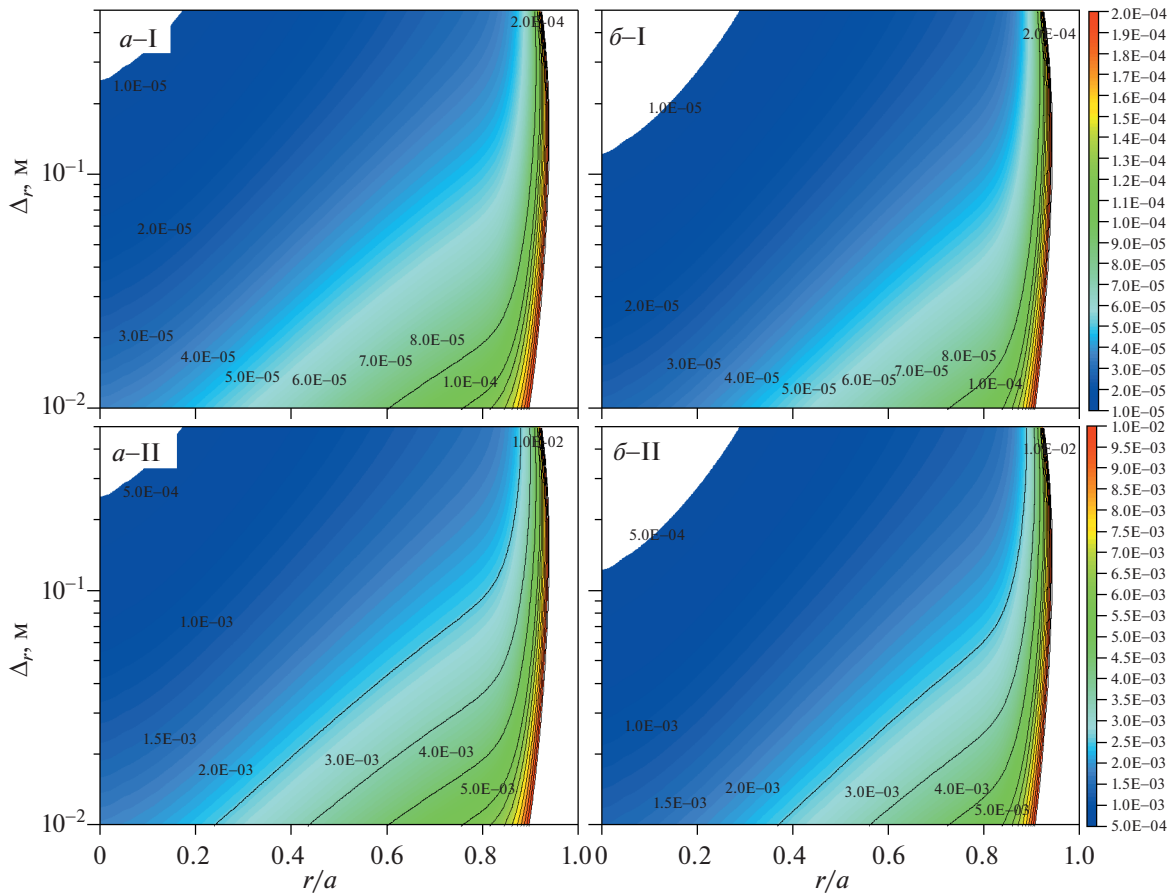
**Рис. 11.** Типичные ожидаемые результаты измерений профиля электронной плотности с помощью рефлектометра при восстановлении профиля. 1 – рефлектометр на обыкновенной волне; 2 – рефлектометр на нижней отсечке необыкновенной волны. а) – расстояние от референсного отражения до поверхности отсечки, б) – восстановленный профиль электронной плотности.

Детальный анализ достижимых параметров рефлектометрической диагностики и точности измерения в различных режимах выходит за рамки данной обзорной работы и требует детальной проработки конструкции и широкого набора предполагаемых режимов работы установки.

Применение рефлектометра как диагностической системы для исследования флуктуаций плазмы основано на анализе вариации амплитуды и фазы отраженного сигнала, определяемых флуктуациями диэлектрической проницаемости плазмы в области отражения. Следует отметить, что при использовании для зондирования необыкновенной волны флуктуации диэлектрической проницаемости могут быть связаны как с флуктуациями электронной плотности, так и флуктуациями полного магнитного поля. Анализ только данных рефлектометра, вообще говоря, не позволяет разделить информацию о флуктуациях полного магнитного поля и электронной плотности в области отражения. Поэтому для интерпретации рефлектометрических измерений параметров флуктуаций плазмы при использовании для зондирования необыкновенной волны требуются теоретические модели, описывающие свойства возмущений плазмы, либо данных других диагностик.

Ограничения, накладываемые на измерения с помощью рефлектометра параметров флуктуаций электронной плотности, связано с необходимостью работы в режиме “слабой турбулентности”, когда возмущения фазы отраженного

сигнала не превышают 1 радиан [12]. При превышении данного уровня возмущений фазы утрачивается линейная связь между величиной флуктуаций отраженного сигнала рефлектометра и диэлектрической проницаемости плазмы в области отражения, что существенно затрудняет интерпретацию данных диагностики. Минимальное возмущение, надежно регистрируемое рефлектометром, определяется как шумом СВЧ-генераторов, так и работой квадратурного детектора и составляет около 1 градуса (0.02 рад). Следует отметить, что наличие двумерных эффектов делает более информативным не возмущения фазы отраженной волны, а возмущение полного сигнала  $E_{\text{rms}}/|E|$  [24]. Максимальное временное разрешение определяется промежуточной частотой гетеродина и частотой опроса АЦП. В рефлектометре установки Т-10 промежуточная частота составляла 20 МГц при частоте опроса 2 МГц, что позволяло проводить измерения в полосе до 0.6 МГц. С учетом наличия быстрых частиц и возбуждаемых ими альфвеновских мод в плазме ТРТ представляется целесообразным увеличить промежуточную частоту до 50 МГц, а частоту АЦП до 10 МГц, что позволит регистрировать возмущение в частотном диапазоне до 2 МГц. Корректная оценка пространственного разрешения диагностики, понимаемого как максимальный поперечный номер регистрируемого возмущения, требует двумерного полноволнового моделирования в условиях конкретной геометрии эксперимента. Такие



**Рис. 12.** Диапазон измеряемых системой рефлектометрической диагностики относительных возмущений магнитного поля и электронной плотности для режима TRT с магнитным полем 8 Т и током плазмы 5 МА. I – минимальное возмущение, II – максимальное возмущение. а) – относительное возмущение полного магнитного поля, б) – относительное возмущение электронной плотности

оценки выходят за рамки данной работы и будут выполнены позднее в ходе дальнейшей работы над проектом системы рефлектометрической диагностики плазмы для установки TRT. Грубая оценка может быть сделана на основе опыта рефлектометров установки Т-10. Для рефлектометра Т-10 с размером антенн  $25 \times 27.5$  мм и расстоянием до поверхности отсечки от 10 до 30 см была проведена уверенная идентификация возмущений плазмы с полоидальным номером моды вплоть до 80. Предполагаемый диапазон измеряемых рефлектометром параметров флуктуаций плазмы приведен в табл. 2.

Как уже было сказано, рефлектометр, зондирующий плазму на необыкновенной волне, не позволяет разделить возмущения магнитного поля и

электронной плотности. Однако можно оценить типичный уровень возмущений, который может быть зарегистрирован рефлектометром, в предположении о наличии в флуктуациях только возмущений магнитного поля или только возмущений электронной плотности. Для этого можно воспользоваться скорректированной формулой Маццукато–Назикаяна [12, 25]. Ожидаемые минимальные и максимальные уровни флуктуаций плотности и магнитного поля для режима TRT с полем 8 Т и током плазмы 5 МА приведены на рис. 12.

Видно, что типичная относительная амплитуда возмущений магнитного поля, регистрируемая системой рефлектометрической диагностики в центральной части плазменного шнура ( $r/a < 0.85$ ), лежит в области от  $2 \times 10^{-5}$  до  $5 \times 10^{-3}$ , а амплитуда возмущений электронной плотности – от  $1 \times 10^{-5}$  до  $5 \times 10^{-3}$ . Следует отметить, что приведенные значения могут существенно меняться в зависимости от конкретного профиля электронной плотности в разряде и соотношения возмущений магнитного поля и электронной плотности во флуктуациях.

**Таблица 2.** Ожидаемые параметры рефлектометрии для измерения флуктуаций плазмы для установки TRT

| Параметр             | Диапазон | Разрешение  |             |
|----------------------|----------|-------------|-------------|
|                      |          | пространст. | временное   |
| $E_{\text{rms}}/ E $ | 0.02–1   | $m < 80$    | $f < 2$ МГц |

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ возможностей диагностики рефлектометрии для разрабатываемого токамака TRT. Проведен анализ возможности измерений с использованием различных поляризаций волны зондирующего излучения и ракурсов наблюдения. Показано, что оптимальным вариантом для реализации данной диагностики на установке TRT является выбор зондирования со стороны сильного магнитного поля и сочетания измерений на обыкновенной волне на периферии плазменного шнура и нижней отсечки необыкновенной волны в центральных частях шнура. Диапазон частот зондирующего излучения составляет от 18 до 140 ГГц на обыкновенной волне и от 12 до 90 ГГц на необыкновенной волне.

Для выбранного ракурса наблюдений проведение предварительная интеграция элементов диагностики в вакуумной камере TRT. В качестве антенн предлагается использовать пирамидальные антенны с интегрированным уголковым отражателем, размещенные за вырезом в первой стенке в плоскости магнитной оси установки. Каждый ракурс измерения требует двух антенн для реализации бистатической схемы измерений. Вакуумную часть приемно-передающего тракта предполагается изготовить из нержавеющей волноводов с внутренним медным покрытием волновода сечением  $23 \times 10$  мм. Для вывода излучения в верхний порт будут использоваться повороты оптимизированной формы, позволяющие снизить потери СВЧ-мощности на преобразование мод. В качестве вакуумного окна предлагается использование двойного окна из материала ROHACELL HF с откачкой промежуточного объема для уменьшения натекания.

В разрабатываемой системе рефлектометрической диагностики токамака TRT предлагается использовать широкую унификацию приемно-передающего оборудования и систем сложения СВЧ-излучения с оборудованием сооружаемых установок ИТЭР и Т-15МД, в том числе задающие генераторы, модули излучения и приема СВЧ-сигналов, систему сбора и обработки данных.

Для систем измерения профиля электронной плотности и флуктуаций параметров плазмы на основе рефлектометров приведены ожидаемые пространственное и временное разрешение и точность измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Silva A., Manso M.E., Cupido L., Albrecht M., Serra F., Varela P., Santos J., Vergamota S., Eusébio F., Fernandes J., Grossmann T., Kallenbach A., Kurzan B., Loureiro C., Meneses L., Nunes I., Silva F., Suttrop W.* and the ASDEX Upgrade Team // *Rev. Sci. Instrum.* 1996. V. 67 (12). P. 4138.
2. *Zeng L., Wang G., Doyle E.J., Rhodes T.L., Peebles W.A. and Peng Q.* // *Nucl. Fusion.* 2006. V. 46. S677.
3. *Meneses L., Cupido L., Sirinelli A., Manso M.E. and JET EFDA contributors* // *Rev. Sci. Instrum.* 2008. V. 79(10). 10F108.
4. *Clairat F., Bottureau C., Chareau J.M., Sabot R.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2003. V. 74. № 3. P. 1481.
5. *Shelukhin D.A., Vershkov V.A., Subbotin G.F., Sarychev D.V., Petrov A.A., Petrov V.G., Sokolov M.M. and Igonkina G.B.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2018. V. 89. 094708. <https://doi.org/10.1063/1.5039151>
6. *Simonet F.* // *Review of Scientific Instruments.* 1985. V. 56. 664.
7. *Costley A.E., Cripwell P., Pretince R., Sips A.C.C.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1990. V. 61. № 10. P. 2823.
8. *Леонов В.М., Коновалов С.В., Жоголев В.Е., Кавин А.А., Красильников А.В., Куянов А.Ю., Лукаш В.Э., Минеев А.Б., Хайрутдинов Р.Р.* // *Физика плазмы.* 2021. V. 47 № 11. С. 986.
9. *Heald M.A., Wharton C.B.* “Plasma diagnostics with microwaves”, New York—London—Sydney, John Wiley & Sons Inc, 1998.
10. *Mazzucato E.* // *Phys. Fluids*, B 4, (1992) 3460—3461.
11. *Bottolier-Curtet H. and Ichtchenko G.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1987. V. 58. P. 539.
12. *Mazzucato E., Nazikian R.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1995. V. 66. № 2. P. 1237.
13. *Вершков В.А., Солдатов С.В., Шелухин Д.А., Уразбаев А.О.* // *Приборы и техника эксперимента.* 2004. № 2. С. 54.
14. *Vershkov V.A., Andreev V.F., Borschegovskiy A.A., Chistyakov V.V.* // *Nuclear Fusion.* 2011. V. 51 № 9, 094019.
15. *Сивухин Д.В.* *Общий курс физики, Оптика, Т. IV, М.: Наука, 1980, 752 с.*
16. ГОСТ 20900-2014. Трубы волноводные медные и латунные прямоугольные. Технические условия.
17. *Doane J.L.* // *Microwave Theory and Techniques* 1984. V. 32. № 10, P. 1362.
18. *Katsenelenbaum B.Z., Mercader Del Rio L., Pereyaslavets M., Sorolla Ayza M., Thumm M.* “Theory of non-uniform waveguides, the cross-section method (Electromagnetic Waves Series)”, 1998.
19. *Novokshenov A., Nemov A., Shelukhin D., Lukyanov V., Gorbunov A., Vershkov V.* // *Fusion Engineering and Design* Volume 168, July 2021, 112406. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112406>
20. *Shelukhin D.A., Vershkov V.A., Gorbunov A.V., Lukyanov V.V., Petrov V.G., Sarychev D.V., Subbotin G.F.* // *Proc. of 14th International Reflectometry Workshop, Lausanne, Switzerland, 22–24 May 2019*
21. ROHACELL® HF. Technical Information. Evonik Resource Efficiency GmbH | February 2017.
22. *Cherkez D., Spitsyn A., Shelukhin D., Vershkov V.* // *Proc. 12th Intern. Conf. Tritium Science and Technology* April 22–26, 2019 Busan, Korea
23. *Belousov V.I., Vershkov V.A., Denisov G.G., Khozin M.A. and Shelukhin D.A.* // *Technical Physics Letters.* 2017. V. 43. № 11. P. 1037.
24. *Lin Y., Nazikian R., Irbi J.H., Marmor E.S.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2001. V. 43. № 1. P. L1-L8.
25. *Shelukhin D.A., Soldatov S.V., Vershkov V.A., and Urazbaev A.O.* // *Plasma Physics Reports.* 2006. V. 32. P. 707.