

## ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РЕФРАКТОМЕТРИИ TRT

© 2022 г. В. А. Вершков<sup>а</sup>, В. Г. Петров<sup>а, \*</sup>, Г. Ф. Субботин<sup>а</sup>, Д. А. Шелухин<sup>а</sup>,  
А. Ю. Афонин<sup>а</sup>, К. Ю. Афонин<sup>б</sup>

<sup>а</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>б</sup> ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, Москва, Россия

\*e-mail: vpetrov1952@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.05.2022 г.

После доработки 06.06.2022 г.

Принята к публикации 06.06.2022 г.

Рассмотрены и проанализированы схемы применения рефрактометрии для измерений средней плотности плазмы на установке TRT (токамак реакторных технологий), которая проектируется в настоящее время. Предложены различные схемы реализации рефрактометрии в TRT с учетом известных на данный момент параметров плазмы в различных сценариях работы установки, проведен анализ их работы в условиях TRT. Исследовано влияние различных эффектов на точность определения интегральной плотности плазмы с помощью рефрактометрии в TRT. На основе проведенного анализа, проведена оптимизация количества частотных каналов, используемых в рефрактометрии, предложен вариант размещения элементов диагностики рефрактометрии на установке, проведены оценки параметров системы диагностики: точности определения интегральной плотности плазмы, временного разрешения, минимальной и максимальной измеримых плотностей плазмы, исследована возможность применения системы диагностики в онлайн-режиме.

*Ключевые слова:* электронная плотность плазмы, высокотемпературные эффекты в плазме, показатель преломления, рефрактометрия плазмы

DOI: 10.31857/S0367292122700159

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время установка TRT (токамак реакторных технологий) проходит стадию концептуального проектирования, многие параметры установки еще не “заморожены”, но тем не менее диапазон изменения параметров плазмы уже ясен, и можно начинать разработку основных диагностических подсистем, по крайней мере тех, которые должны функционировать на начальной стадии работы установки TRT. Одной из таких диагностических подсистем является подсистема рефрактометрии плазмы TRT, вопросам разработки и проектирования которой и посвящена настоящая работа.

В табл. 1 приведены основные параметры установки и плазмы TRT [1, 2].

Отметим основные особенности установки, которые влияют на выбор той или иной схемы работы рефрактометрии TRT, на ее параметры: это достаточно большая плотность плазмы, равная или превышающая плотность плазмы в токамаке ИТЭР, сильное магнитное поле, достаточно высокая электронная температура, большая удельная мощность, выделяемая на сепаратрисе и на

первой стенке, высокие удельные нейтронные нагрузки, сравнимые с таковыми в ИТЭР [3], и т.п. Следует также отметить, что в TRT предполагается использовать мощные (до 40 МВт) системы дополнительного нагрева: гиротроны на частотах 170–230 ГГц, мощностью порядка 1 МВт каждый, систему ионно-циклотронного нагрева на частотах 60–80 МГц, с генераторами мегаваттного уровня мощности, а также систему нейтральной инжекции с энергией пучка ~500 кэВ, что предполагает наличие высокого уровня электромагнитных помех на установке.

Несомненно, что все эти особенности установки TRT должны учитываться и при разработке подсистемы рефрактометрии TRT.

### 2. ДИАГНОСТИКА РЕФРАКТОМЕТРИИ TRT. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В нашем случае задача разработки системы рефрактометрической диагностики на стадии ее концептуального проектирования сводится к предварительному определению рабочего диапазона зондирующих частот, количества необходи-

Таблица 1. Основные параметры TRT [1, 2]

Параметр	Значение
Большой радиус плазмы $R_0$ , м	2.15
Малый радиус $a$ , м	0.57
Вытянутость ( $k_{sep}$ )	1.8
Треугольность ( $\delta_{sep}$ )	0.3
Конфигурация плазмы	SN (опция DN)
Магнитное поле на оси $B_{t0}$ , Тл	8
Гофрировка $\delta_{ripple}$ , %	0.5
Ток плазмы $I_{pl}$ , МА	4...5
Средняя плотность электронов $\langle n_e \rangle$ , $10^{20} \text{ м}^{-3}$	До 2
Температура плазмы $T$ , кэВ	6–8
Длительность разряда $T_{discharge}$ , с	$100 / < 10^{11}$
Энергетическое время жизни плазмы ( $\tau_E$ ), с	0.3
Отношение мощности, выносимой на сепаратрису, к большому радиусу ( $P_{sep}/R$ ), МВт/м	$14/16^{1)}$
Объем/поверхность плазмы $V_{pl}/S_{pl}$ , $\text{м}^3/\text{м}^2$	$25/70$
Ширина диверторного слоя на экваторе $\lambda_{qmidplane}$ , мм	1.5
Зазор плазма–стенка $\Delta_{Sep-FW}$ [2], мм	50 in/170 out
Запас устойчивости $q_{95}$	3.3
Макс. выход нейтронов $Y_n$ , $10^{18} \text{ н/с (МВт/м}^2)$	$0.5-1/\text{до } 15^{1)}$ (0.4)
Отношение термоядерной мощности к мощности нагрева $Q$	$0.01-0.02 / > 1^{1)}$
Пиковая нагрузка на дивертор (без газовой мишени) $Q_{Div. no rad}$ , МВт/м <sup>2</sup>	30–40

<sup>1)</sup> TRT с плазмой D + малая добавка T/D–T плазма.

мых зондирующих частот, к разработке оптической и электронной схемы диагностики, к оценке потерь сигнала на различных участках тракта, в том числе и в плазме, к исследованию влияния различных эффектов на точность определения средней плотности плазмы (высокотемпературные эффекты [4, 5], вертикальное смещение плазмы, рефракция, излучение самой плазмы и поглощение в плазме [6], потери сигнала в тракте и в плазме, взаимное преобразование X–O–X мод в плазме, ошибки измерения магнитного поля, электронной температуры и т.п.). Также необходимо в рамках данной работы оценить ожидаемый уровень соотношения сигнал/шум (SNR), определить зависимость точности определения средней плотности плазмы от количества частотных каналов. И в заключение, необходимо провести предварительную интеграцию системы диагностики на установке TRT, предложить и обосновать выбор антенной и волноводной систем рефрактометрии, СВЧ-приемной и передающей подсистем.

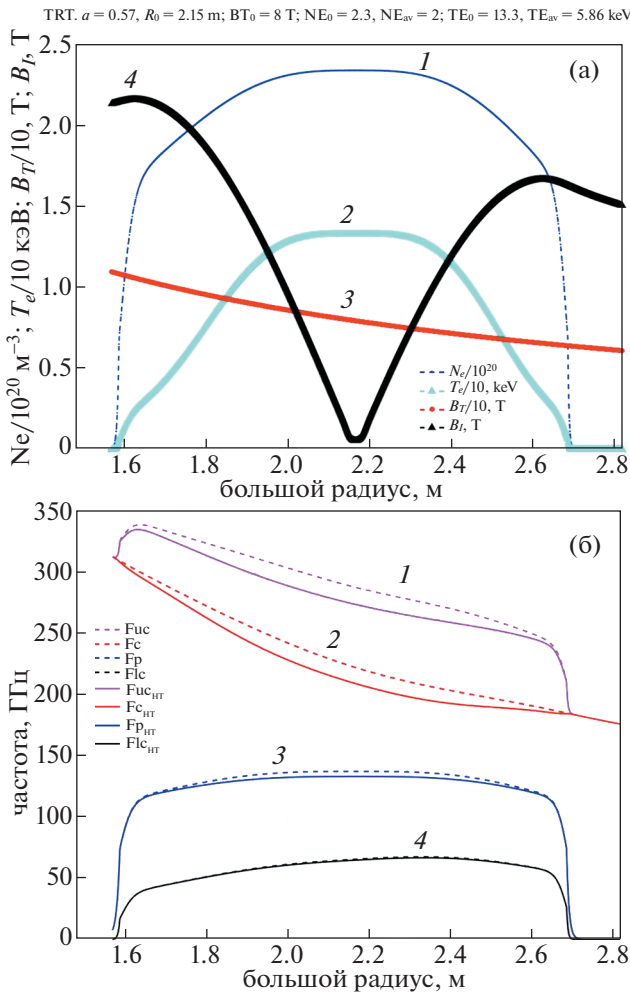
### 2.1. Выбор рабочих частот в рефрактометрии

Для начала, необходимо определить диапазон рабочих частот для рефрактометрии.

На рис. 1 представлены радиальные профили основных параметров TRT, определяющих диапазон возможных рабочих частот рефрактометрии (вверху), на том же рисунке внизу представлены характеристические частоты плазмы TRT в рассматриваемом сценарии (сценарий № 1).

Из приведенных графиков видно, что окна прозрачности плазмы TRT располагаются в диапазонах от 67 до 182 ГГц для необыкновенной волны и от 134 до 182 ГГц для обыкновенной волны.

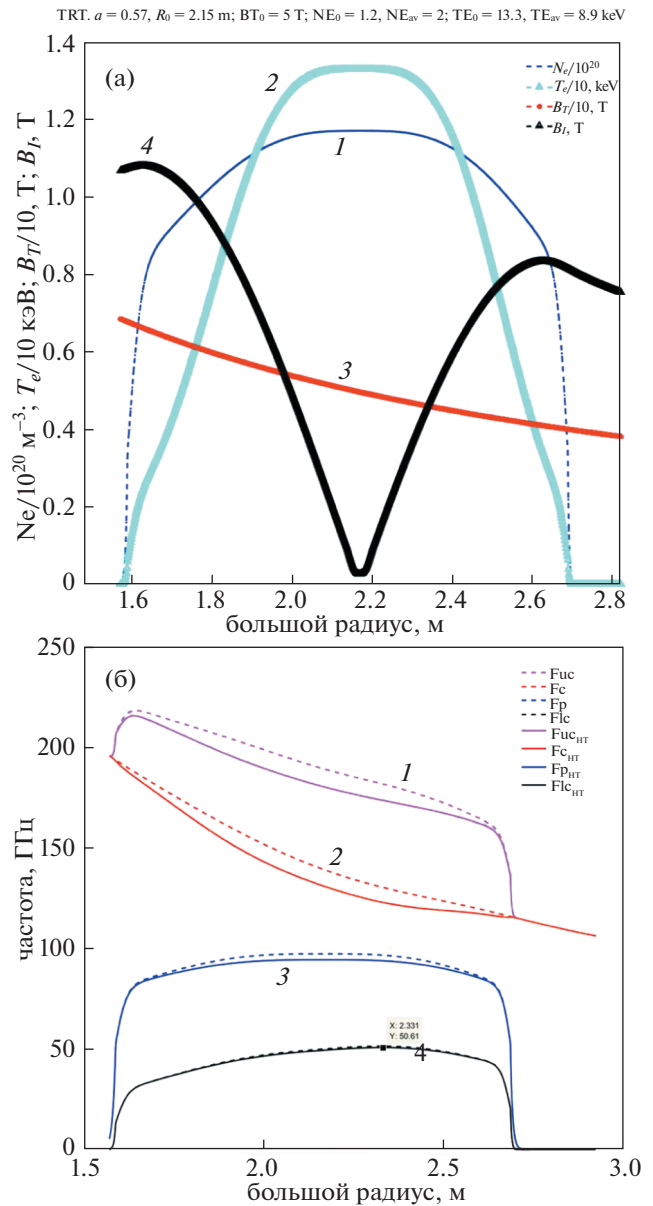
При выборе рабочих частот рефрактометрии мы должны учитывать, что диагностика должна работать не только на стационарной стадии, и не только в рассматриваемом сценарии № 1, но и на стадии запуска установки в работу, когда тороидальное магнитное поле будет меньше (сценарий № 2); соответственно и характеристические частоты плазмы изменятся, что видно из рис. 2, на котором для иллюстрации показаны профили основных физических параметров плазмы и установки для такой фазы, а также характеристические частоты плазмы TRT. Частоты рассчитаны для режима с магнитным полем 5 Тл и со средней электронной плотностью  $N_{e_{av}} = 1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Профили электронной плотности и температуры при этом предполагались такими же, что в сценарии № 1.



**Рис. 1.** Радиальные профили основных параметров TRT. Сценарий № 1: 1 – электронная плотность плазмы  $N_e$ , 2 – электронная температура  $T_e$ , 3 – тороидальное магнитное поле  $B_T$ , 4 – полоидальное магнитное поле  $B_I$  (а); характеристические частоты плазмы TRT в этом сценарии (б): 1 – верхняя частота отсечки на необыкновенной волне, 2 – частота ЭЦР, 3 – плазменная частота, 4 – нижняя частота отсечки на необыкновенной волне, штриховыми линиями показаны частоты при  $T_e = 0$ , сплошными линиями – частоты при учете высокотемпературных эффектов (НТ).

Видно, что в этом режиме окна прозрачности плазмы TRT будут расположены в частотных диапазонах от 51 до 113 ГГц для необыкновенной волны и от 95 до 113 ГГц для обыкновенной волны (возможное поглощение плазмы на частотах ниже циклотронной пока не учитываем).

С учетом всего вышесказанного, выбор рабочих частот рефрактометрии предлагается выбрать следующие частотные диапазоны: V – 50–75 (WR-15), W – 75–110 (WR-10), D – 110–170 (WR-6) ГГц на необыкновенной волне и 75–110 (WR-10), 110–170 (WR-6) ГГц на обыкновенной волне. Естественно, что при этом частоты меньше 95 и меньше 134 ГГц на обыкновенной волне



**Рис. 2.** Радиальные профили основных параметров TRT в режиме пониженного магнитного поля 5 Тл (а): 1 – электронная плотность плазмы  $N_e$ , 2 – электронная температура  $T_e$ , 3 – тороидальное магнитное поле  $B_T$ , 4 – полоидальное магнитное поле  $B_I$ ; характеристические частоты плазмы TRT в этом сценарии (б), 1 – верхняя частота отсечки на необыкновенной волне, 2 – частота ЭЦР, 3 – плазменная частота, 4 – нижняя частота отсечки на необыкновенной волне, штриховыми линиями показаны частоты при  $T_e = 0$ , сплошными линиями – частоты при учете высокотемпературных эффектов (НТ).

будут использоваться только в режимах низкой плотности соответствующих сценариев (с пониженным полем 5 Тл и с высоким полем 8 Тл), в которых плазма будет прозрачна.

Второй вариант выбора рабочих частот – диапазоны E (60–90 ГГц, WR-12), F (90–140 ГГц,

WR-8) ГГц на необыкновенной волне и диапазоны F (90–140 ГГц, WR-8), G (140–220 ГГц, WR-5) на обыкновенной волне.

На данный момент, первый вариант выбора волноводных диапазонов для рефрактометрии представляется более предпочтительным, поскольку он лучше согласуется с окном прозрачности плазмы, к тому же диапазон WR-6 предпочтительнее диапазона WR-5 с точки зрения коммерческой доступности СВЧ-компонент и выходной мощности активных элементов. Если же исключить диапазон WR-5 (140–220 ГГц) из второго варианта, ограничившись зондированием в диапазоне F (90–140 ГГц) на обыкновенной волне, то в этом варианте будут доступны только режимы со средней плотностью  $N_{e_{av}}$  не выше  $1.6 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  (точнее, с максимальной плотностью не выше  $1.9 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ), и точность определения средней плотности будет составлять несколько процентов в области ее максимальных значений. Окончательный выбор волноводных диапазонов будет сделан на более позднем этапе разработки, с учетом данных о параметрах плазмы для других возможных сценариев разряда и после детального анализа выходных параметров СВЧ-компонент, имеющихся в коммерческом доступе на тот момент.

Первый вариант мы рассматриваем как базовый, и в дальнейшем более подробно будем анализировать именно этот вариант. При таком выборе рабочих частот, система диагностики будет способна измерять среднюю плотность плазмы во всех сценариях работы установки<sup>1</sup>.

При сужении полосы рабочих частот рефрактометрии соответственно сузится и диапазон измерений плотности плазмы, например, если ограничиться диапазоном 90–140 ГГц (WR-8) на обыкновенной волне.

Отметим также, что возможен выбор рабочих частот рефрактометрии на необыкновенной волне в частотных диапазонах 50–75 (WR-15), 75–110 ГГц (WR-10). В этом случае несколько снизится точность измерений средней плотности плазмы в режимах с ее низкой плотностью, пределы измерения средней плотности плазмы при этом не изменятся: не менее  $(0.02\text{--}2) \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , система диагностики в этом случае будет проще в проектировании и изготовлении, соответственно, понизится также ее стоимость (стоимость СВЧ-компонент с более высокими несущими частотами существенно выше стоимости аналогичных компонент для более низкочастотных диапазонов).

Следует также заметить, что при зондировании на обыкновенной волне результаты измерений не будут зависеть от магнитного поля, что весьма положительно скажется на скорости обра-

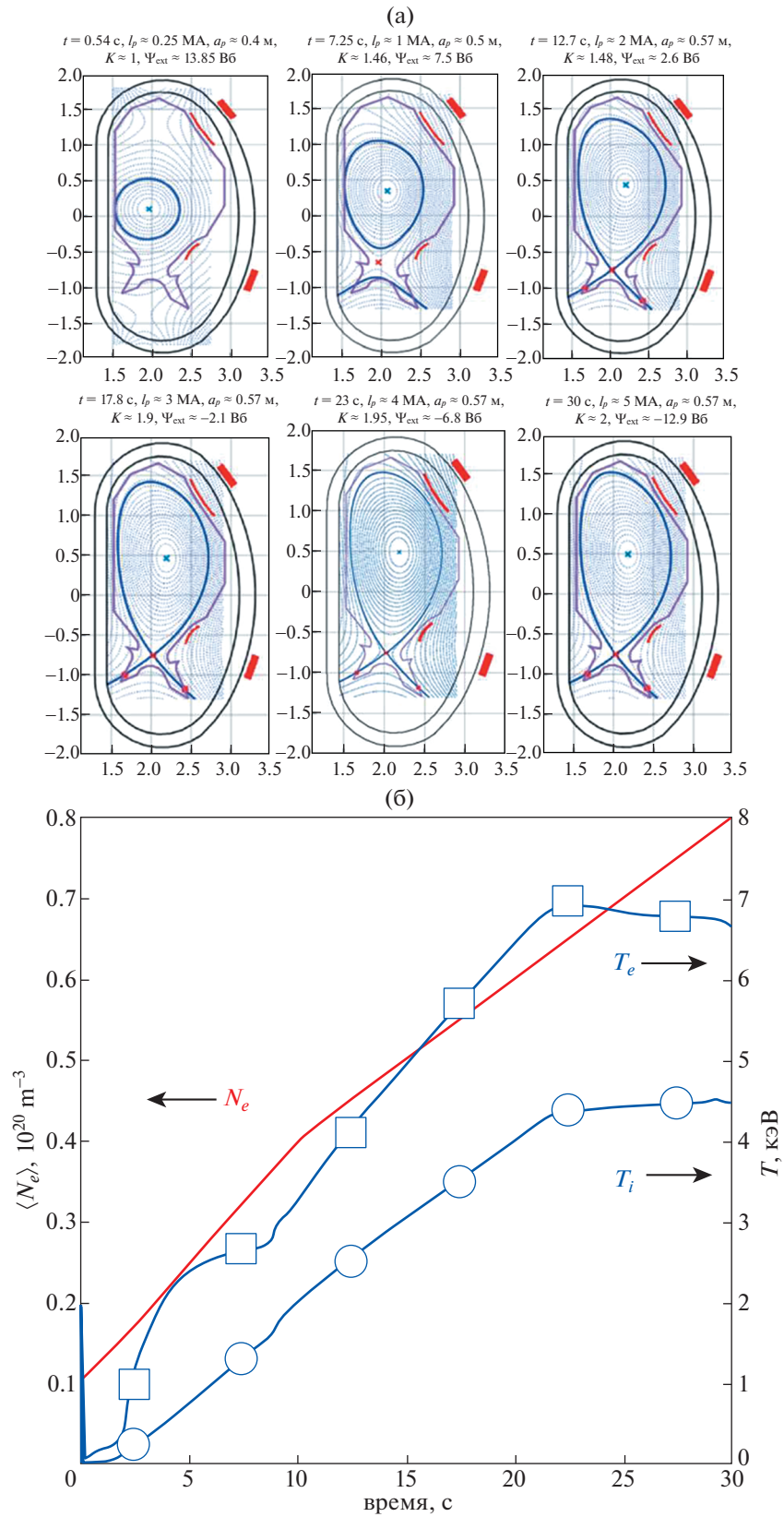
ботки данных измерений, и, соответственно, на временном лаге онлайн-измерений плотности с помощью рефрактометрии. Однако для решения о возможности проведения таких измерений на обыкновенной волне необходимо проведение оценок поглощения и излучения плазмы, что выходит за пределы данной работы, такие оценки будут проведены на следующей стадии работ.

В процессе разработки системы рефрактометрической диагностики в TRT также необходимо провести анализ работы этой системы на этапе пробоя плазмы [7].

На рис. 3а показана конфигурация плазмы в моменты ввода тока плазмы  $I_p$  до 5 МА (фиолетовая линия – лимитер). Плато тока плазмы ( $I_p \approx 5 \text{ МА}$ ) начинается в момент времени  $t = 30 \text{ с}$ . На рис. 3б показана эволюция средних по объему плазмы величин электронной и ионной температур и концентрации электронов в процессе ввода тока [7]. Антенны диагностической системы будут располагаться со стороны слабого магнитного поля, (и, при наличии такой возможности, также на стороне сильного магнитного поля) в экваториальной плоскости плазменного шнура (на уровне  $z = 0.5$ ), зондирование должно проводиться по направлению градиента плотности плазмы для минимизации эффектов рефракции. Из рис. 3 видно, что на стадии пробоя рефрактометрия не “увидит” плазму, плазма появляется в зоне видимости системы диагностики на момент времени  $t = 7.25 \text{ с}$ . Из этого следует, что рефрактометрическая диагностика должна работать в “бессбойном” режиме, т.е. необходимо проводить непосредственные измерения времени задержки, или проводить измерения времени задержки посредством измерений фазового набега на частоте АМ, или на разностной частоте, причем измеряемые фазовые набеги не должны превышать величину  $2\pi$  [8].

Энергетически более выгодными (по сравнению с импульсными измерениями) являются именно измерения фазового набега на разностной частоте (дифференциальная рефрактометрия [8]), или же применение метода амплитудной модуляции (АМ), как это предлагается в ИТЭР. Кроме того, очевидно, что для определения средней плотности плазмы в условиях TRT, по аналогии с проектом диагностики рефрактометрии в ИТЭР, будет необходимо многочастотное зондирование [9] чтобы исключить зависимость результатов измерений от профиля электронной плотности. На данном этапе работ делать окончательный вывод о преимуществах выбора АМ-схемы или схемы ДР (дифференциальной рефрактометрии) преждевременно, это будет сделано на более поздней стадии работ. Здесь же можно только отметить, что АМ-схема будет проще и дешевле, а схема ДР позволяет в принципе измерять не только среднюю плотность плазмы, но и про-

<sup>1</sup> Более подробно этот вопрос будет затронут далее.



**Рис. 3.** Эволюция формы плазмы в течение подъема тока плазмы  $I_p$  до величины 5 МА (фиолетовая линия – лимитер) (а); эволюция средних по объему плазмы величин электронной и ионной температур и концентрации электронов в процессе ввода тока (б) [7].

водить измерения флуктуаций плотности плазмы, при достаточном уровне соотношения сигнал/шум, но более затратно.

## 2.2. Расчеты ожидаемого времени задержки (фазового набега) в системе рефрактометрической диагностики TRT

Далее, для определенности, все предварительные оценки будут проводиться для зондирующих частот  $f_{ix} = 50, 75, 100, 110, 140, 170$  ГГц на необыкновенной волне и частот  $f_{io} = 75, 100, 110, 140, 170$  ГГц на обыкновенной волне.

Проведем оценки ожидаемого фазового набега (временной задержки) микроволнового сигнала в плазме TRT для рефрактометра [10, 11]

$$\Delta\tau(f) = \frac{\delta\Phi(f)}{\delta f \cdot 2\pi} - \frac{l}{c} = \frac{1}{c} \int_0^l \left( \mu(x, f) - 1 \right) + f \frac{\delta\mu(x, f)}{\delta f} dx, \quad (1)$$

где  $\Delta\tau(f)$  – временная задержка,  $f$  – несущая частота зондирующего сигнала,  $\mu(x, f)$  – коэффициент преломления,  $c$  – скорость света,  $x$  – горизонтальная координата, вдоль которой происходит зондирование плазмы.

На рис. 4 для примера представлены результаты расчетов для частот из области зондирования на обыкновенной волне для сценария с максимальной электронной плотностью (с магнитным полем 8 Тл) – зависимость фазового набега/времени задержки сигнала от средней плотности плазмы по хорде зондирования для разных частот. В качестве иллюстрации приведены зависимости для частот диапазонов окон прозрачности для сценариев с максимальной плотностью  $N_{e_{av}} = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  (170, 140 ГГц) и  $N_{e_{av}} = (1.2, 1, 0.57) \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  (110, 100 и 75 ГГц соответственно). Зондирование предполагалось в горизонтальной плоскости симметрии плазменного шнура, вдоль градиента электронной плотности. Расчеты проведены для одного прохода сигнала через плазму, высокотемпературные эффекты не учитывались. Видно, что эта зависимость не линейна, особенно для частот близких к частотам отсечки.

Предполагая, что минимальный измеримый фазовый набег в условиях TRT будет около  $1^\circ$ , легко установить, что зондирование на частоте 75 ГГц в условиях TRT позволит измерять минимальную среднюю плотность, не превышающую  $N_{e_{av}} = 1 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , а на частоте 100 ГГц, – не превышающую  $N_{e_{av}} = 1.7 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , т.е. динамический диапазон рефрактометрии будет более 100 как в сценарии № 1, так и в сценарии № 2.

## 2.3. Чувствительность методики к профилю электронной плотности

Посмотрим, насколько чувствительна рефрактометрическая диагностика к профилю электронной плотности. Для этого представим профиль электронной плотности параболой вида  $N_e(\rho) = N_e(0)(1 - \rho^2)^\alpha$ , где  $\rho = r/a$ , нормированный малый радиус плазмы,  $\alpha$  – показатель параболы. На рис. 5а представлены различные профили электронной плотности, а также соответствующие им зависимости набега фазы от средней плотности плазмы, при зондировании на обыкновенной волне на частотах 170, 140 и 75 ГГц (рис. 5б–г соответственно).

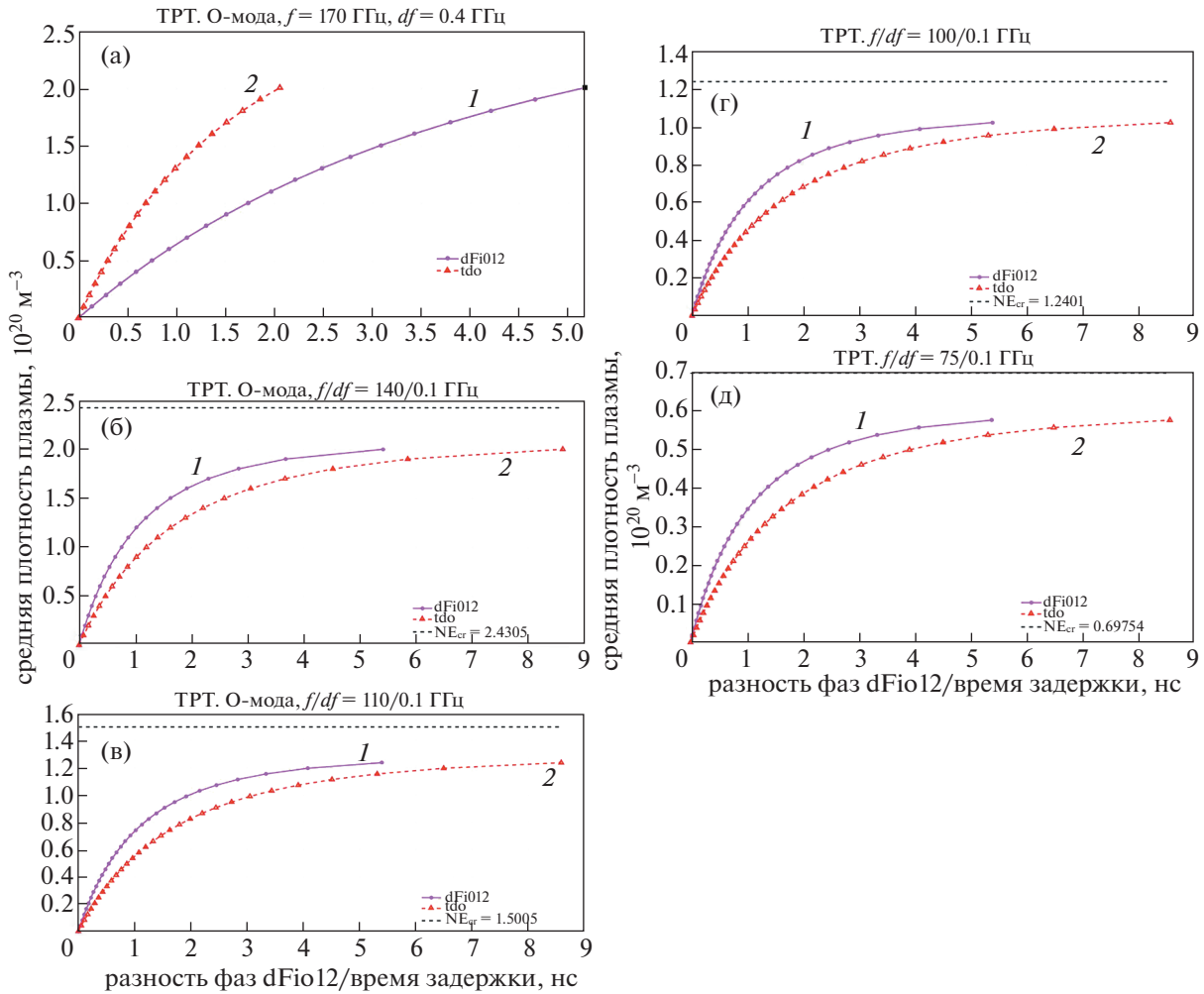
Из рисунка видно, что в случае более плоских профилей, чем профиль в заданном сценарии, зависимость измеряемого набега фазы от  $\alpha$  более слабая, чем в случае более острых профилей. При этом (если профиль электронной плотности более плоский, чем в заданном сценарии) ошибка в определении средней плотности плазмы не превысит  $\pm 3.5\%$  независимо от  $\alpha$ , или не превысит  $\pm 0.6\%$  независимо  $\alpha$ , если средняя плотность плазмы не превышает  $1.0 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  (предполагается, что средняя плотность плазмы определяется из данных только одного частотного канала 170 ГГц).

Если не ограничиваться рассмотрением только плоских профилей, тогда ошибка в определении средней плотности плазмы не превысит  $\pm 4\%$  независимо от  $\alpha$ , если средняя плотность плазмы не превышает  $1.0 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  (при определении средней плотности плазмы из данных только одного частотного канала 170 ГГц).

Проведем аналогичные оценки зависимости фазового набега от средней плотности плазмы для зондирования плазмы на необыкновенной волне для разных профилей плотности плазмы.

Видно, что для сохранения чувствительности фазовых измерений необходимо вместе с изменением зондирующей частоты изменять также и разностную частоту частотного канала, это также справедливо для зондирования на обыкновенной волне (см. рис. 5).

При зондировании на необыкновенной волне только на частоте 140 ГГц результаты измерений будут практически не зависимы от параметра  $\alpha$ , если этот параметр меняется от 0.1 до 1 и средняя плотность плазмы не превышает  $1.55 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , ошибки в измерении этой плотности будут в пределах  $\pm 2.0\%$ ; если же предположить, что параметр  $\alpha$  меняется в пределах 0.1–1.5, то ошибки в измерении средней плотности плазмы будут в пределах  $\pm 3.5\%$  при условии что сама величина средней плотности плазмы не будет превышать  $1.3 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .



**Рис. 4.** Зависимость фазового набега (1) и времени задержки сигнала (2) от средней плотности плазмы по хорде при зондировании плазмы на обыкновенной волне: зондирование на частотах 170 (а), 140 (б), 110 (в), 100 (г) и 75 ГГц (д). Для четырех нижних частот на графиках указана также критическая плотность (штриховой линией), при которой происходит отражение зондирующего луча.

**2.4. Определение оптимальной разностной частоты в зависимости от зондирующей частоты**

Чтобы получить оценку сверху на разность частот, находим зависимость фазы несущего сигнала после прохождения через плазму от частоты сигнала согласно (1), а затем находим необходимую минимальную разность частот, чтобы набег фазы  $\Delta\Phi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1$  не превышал  $2\pi$ , т.е.

$$df_{\max} = 2\pi(d\varphi/df). \quad (2)$$

На рис. 7а приведены зависимости предельного значения разности фаз при зондировании на обыкновенной волне и при зондировании на необыкновенной волне (рис. 7б), при которых измерения будут однозначными (разность фаз меньше  $2\pi$ ).

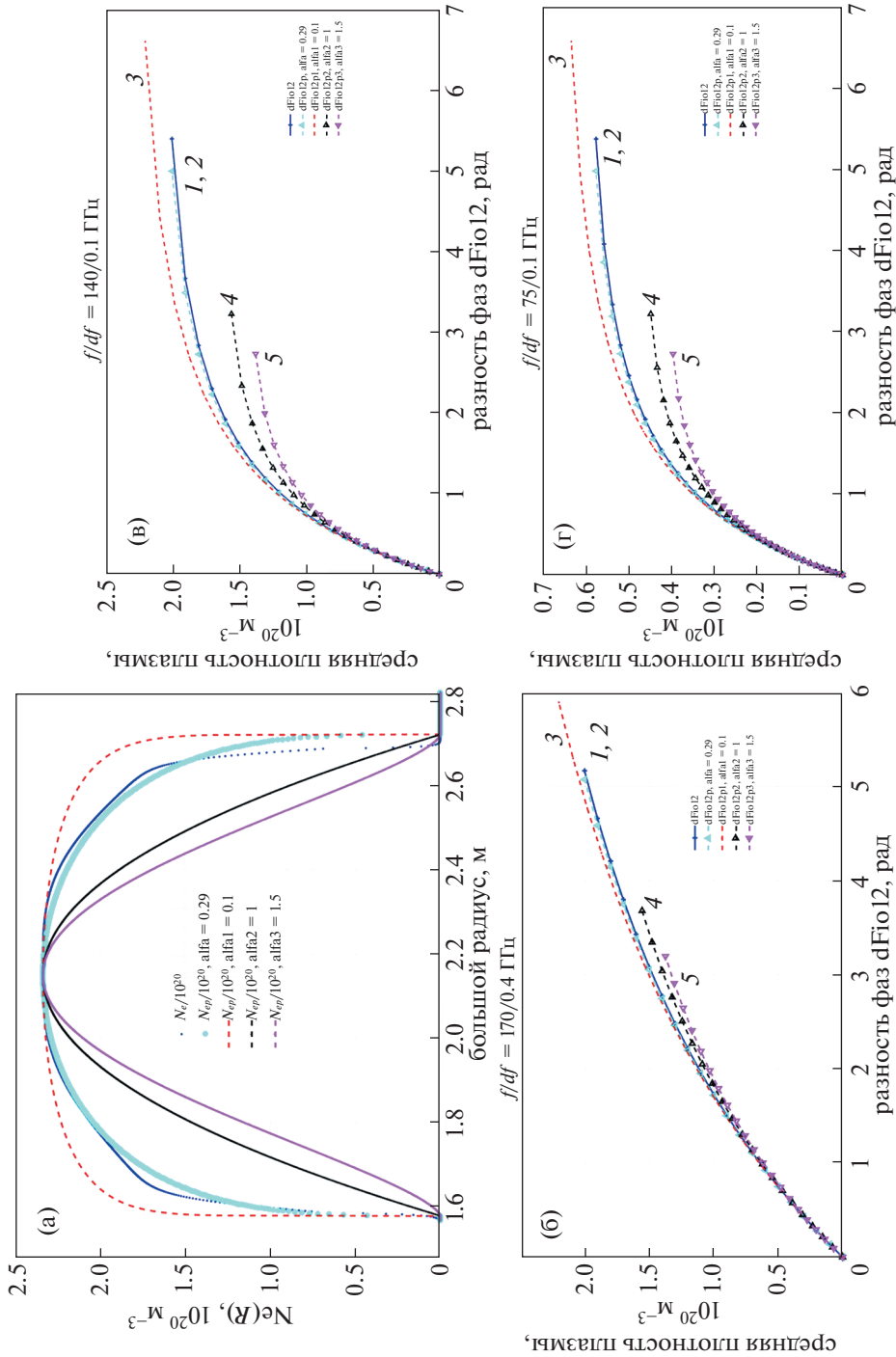
Видно, что в интересующей нас области частот набег фазы  $\Delta\Phi$  не превышает  $2\pi$ , если разностная частота биения зондирующего сигнала не превы-

шает предельную частоту  $df_{\max} = 50\text{--}500 \text{ МГц}$  при зондировании на обыкновенной волне и  $300\text{--}800 \text{ МГц}$  при зондировании на необыкновенной волне, в зависимости от несущей частоты зондирующего излучения.

С уменьшением разностной частоты уменьшается измеряемая фаза сигнала биений, и как следствие, соотношение сигнал/шум, поэтому разностную частоту целесообразно принимать близкой к максимальной ( $2\pi$ ), как это было сделано при проведении расчетов в предыдущем разделе.

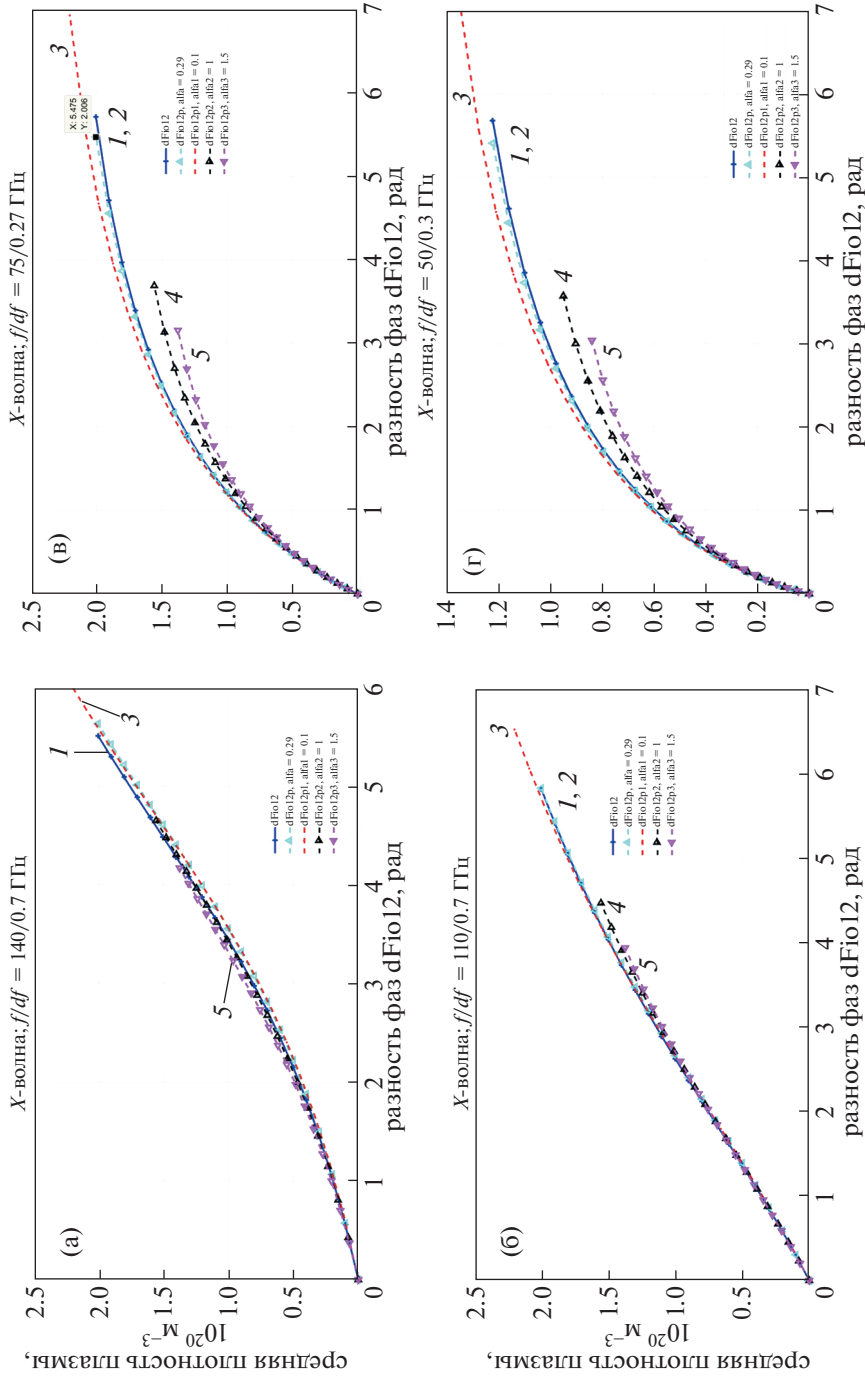
Для схемы с АМ-модуляцией, проведенный анализ тоже применим, если учесть в этом случае, что разностная частота равна удвоенной частоте АМ-модуляции, т.е. в случае использования схемы с АМ-модуляцией частота модуляции должна быть не более  $df_{\max}/2$ .

Поскольку разностная частота (частота АМ-модуляции) будет находиться в диапазоне

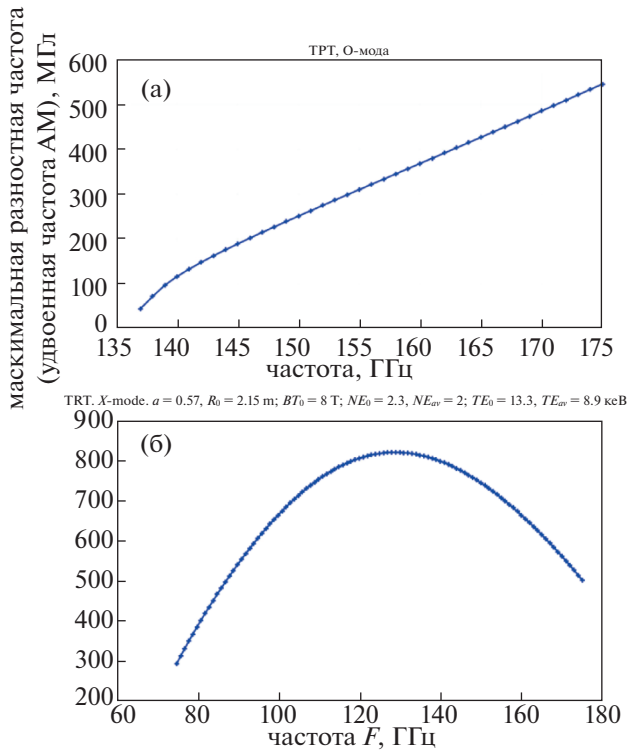


**Рис. 5.** Профили электронной плотности (а), соответствующие им зависимости набега фазы от средней плотности плазмы (б–г).  $N_e$  – профиль электронной плотности в рассматриваемом сценарии,  $dF_{io12}$  – соответствующая ей зависимость набега фазы от средней плотности плазмы;  $N_{epi}$  – профиль электронной плотности с показателем параболы  $\alpha = 0.29$ , для которой средняя плотность плазмы совпадает со средней плотностью набега фазы в заданном сценарии,  $dF_{io12p}$  – соответствующая ей зависимость набега фазы от средней плотности плазмы;  $N_{epi}$  – модельные профили электронной плотности с разными показателями параболы  $\alpha = 0.1, 1, 1.5$ ,  $dF_{io12pi}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – соответствующие им зависимости набега фазы от средней плотности плазмы; при зондировании на обыкновенной волне на частотах 170 (б), 140 (в), 75 ГГц (г).





**Рис. 6.** Зависимость набега фазы на необыкновенной волне от средней плотности плазмы:  $dF_{ie12}$  – зависимость набега фазы от средней плотности плазмы в заданном сценарии (1);  $dF_{ie12p}$  (2) – зависимость набега фазы от средней плотности плазмы для квазипараболического профиля плотности с  $\alpha = 0.29$  (показатель параболы со средней плотностью плазмы, равной средней плотности плазмы в заданном сценарии);  $dF_{ie12pi}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – зависимости набега фазы от средней плотности плазмы для квазипараболических профилей с разными показателями параболы  $\alpha = 0.1, 1, 1.5$  (3, 4 и 5 соответственно). При зондировании на необыкновенной волне на частоте 140 ГГц, разностная частота 0.7 ГГц (а); на частоте 110 ГГц, разностная частота 0.3 ГГц (б); на частоте 75 ГГц, разностная частота 0.27 ГГц (в); на частоте 50 ГГц, разностная частота 0.3 ГГц (г).



**Рис. 7.** Верхний предел для разностной частоты дифференциального рефрактометра (половины частоты АМ) в зависимости от несущей частоты зондирующего излучения: при зондировании на обыкновенной волне (а), на необыкновенной волне (б) для сценария № 1.

сотен МГц, очевидно, что полоса частот приемного канала может быть порядка МГц, что позволит обеспечить временное разрешение сигнала на уровне мкс. Даже с учетом возможного усреднения данных и времени, необходимого для онлайн-обработки и определения интегральной плотности, временное разрешение онлайн определения интегральной плотности плазмы для рефрактометрической диагностики будет порядка 1–5 мс, как это показывает опыт разработки подобной системы диагностики в ИТЭР.

### 2.5. Определение минимальной измеримой средней плотности плазмы для рефрактометрической диагностики и динамического диапазона прибора

Как показывает детальный анализ (см. также разд. 2.2), зондирование на обыкновенной волне на частоте 75 ГГц в условиях TRT позволит измерять минимальную среднюю плотность плазмы<sup>2</sup>, не превышающую  $N_{e_{av}} = 1 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , на частоте 100 ГГц – не превышающую  $N_{e_{av}} = 1.8 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , на частоте 110 ГГц – не превышающую  $N_{e_{av}} = 0.6 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , на частоте 140 ГГц – не превыша-

<sup>2</sup> Предполагаем, что минимальный измеримый фазовый набег в условиях TRT будет не хуже 1°.

ющую  $N_{e_{av}} = 3.6 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Верхний предел для измеряемой средней плотности плазмы будет при этом  $0.57 \times 10^{20}$ ,  $1 \times 10^{20}$ ,  $1.2 \times 10^{20}$ ,  $2.0 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  соответственно, т.е. многочастотное зондирование позволяет не только компенсировать влияние профиля электронной плотности на интерпретацию результатов измерений, но и обеспечивает динамический диапазон рефрактометрической диагностики более 100 как в сценарии № 1, так и в сценарии № 2.

Аналогично, зондирование на необыкновенной волне на частоте 50 ГГц в условиях TRT позволит измерять минимальную среднюю плотность плазмы, не превышающую  $N_{e_{av}} = 2.3 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , на частоте 75 ГГц – минимальную среднюю плотность плазмы, не превышающую  $N_{e_{av}} = 2.2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , а на частоте 110 ГГц – не превышающую  $N_{e_{av}} = 0.6 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Верхний предел для измеряемой средней плотности плазмы будет при этом  $1.2 \times 10^{20}$ ,  $2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ,  $2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$  соответственно, т.е. динамический диапазон рефрактометрической диагностики будет более 100 как в сценарии № 1, так и в сценарии № 2. Мы видим, что на необыкновенной волне достаточно использовать зондирующие частоты в диапазоне 50–75 и 75–110 ГГц, при этом будет обеспечен динамический диапазон измерений по плотности плазмы не менее 100 и рефрактометрический метод диагностики плазмы будет работоспособен во всех режимах работы установки.

### 2.6. Влияние ошибок измерения магнитного поля, температуры на определение средней электронной плотности

Пусть нам известны времена задержки  $\Delta\tau_{\text{exp},i} = 1, \dots, N$ , полученные из измерений для некоторых частот  $F_i$ . Предположим, что известны также распределение магнитного поля  $B$ , температуры электронов  $T_e$  и нормализованного тороидального потока  $\psi(R)$ , вдоль хорды зондирования. В свою очередь, зависимость профиля плотности от  $\psi$  может быть описана в виде функции  $n_e(\psi(\alpha_j))$  с параметрами  $\alpha_j$ ,  $j = 1, \dots, M$ . Из известного распределения  $\psi(R)$ , зная  $n_e(\psi)$ , можно определить профиль плотности и среднюю плотность плазмы. И наоборот, предположив зависимость  $n_e(\psi)$ , можно вычислить времена задержки  $\Delta\tau_i$  для тех же частот  $F_i$ .

Таким образом, задача определения средней электронной плотности плазмы из измеренных экспериментально времен задержки сводится к минимизации функционала

$$RSS(\alpha_{1,\dots,M}) = \sum_i^N (\Delta\tau_i(\alpha_{1,\dots,M}) - \Delta\tau_{\text{exp},i})^2$$

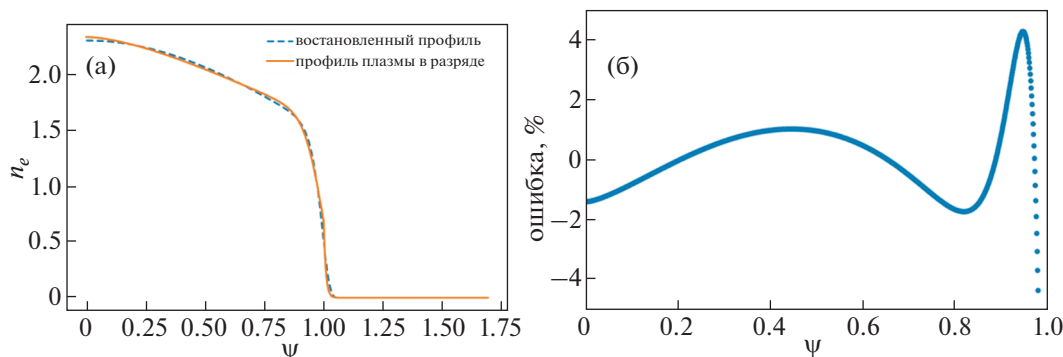


Рис. 8. Аппроксимация профиля  $n_e(\psi)$ : профиль  $n_e(\psi)$  в TRT и аппроксимированный профиль (оранжевый и синий соответственно) (а); относительная ошибка аппроксимации профиля  $n_e(\psi)$  (б).

путем подбора значений  $\alpha_j$ . Из этих значений затем восстанавливается профиль электронной плотности  $n_e(\psi)$ , и далее определяются профиль плотности  $n_e(R)$ , и средняя плотность плазмы  $\langle n_e \rangle$  [9].

В качестве примера рассмотрим основной сценарий TRT с полем 8 Тл. В качестве функции  $\psi(\alpha_j)$  выберем четырехпараметрическую функцию вида  $3 \times 10^{20} \alpha_1 \exp[-(\psi/\alpha_2)^2] \exp[-(\psi/\alpha_3)^{\alpha_4}]$ , использованную ранее для аппроксимации профилей электронной плотности на ИТЭР.

На рис. 8 приведен пример аппроксимации профиля плотности плазмы данной функцией. Представлены профиль  $n_e(\psi)$  в TRT и аппроксимированный профиль (оранжевый и синий соответственно) на левом графике. Справа показана относительная ошибка аппроксимации профиля  $n_e(\psi)$ , она меньше 2% в центральной части шнура и достигает 4% на периферии.

Поскольку для оценки интегральной плотности плазмы необходимы начальные значения коэффициентов  $\alpha_j$ , от которых также зависит точность полученной оценки, данный алгоритм предполагает использование коэффициентов с предыдущих моментов измерения плотности плазмы; за неимением временной эволюции плазменного шнура, возьмем функцию, полученную на рис. 8 и уменьшим все коэффициенты  $\alpha_j$  на 10–50%. В табл. 2 представлены полученные результаты, показывающие, как зависит относительная ошибка определения интегральной электронной плотности от числа зондирующих частот. Видно, что при использовании трех или четырех частот относительная ошибка измерения интегральной плотности намного меньше ошибки аппроксимации профиля плазмы 4% даже при значительных отличиях коэффициентов  $\alpha_j$  от оптимальных значений.

Из этих оценок можно сделать вывод, что для стабильно точной работы системы диагностики требуется использование 3–4 частот одновременно; в то же время, при небольшой скорости изменения профиля плотности плазмы, – например,

при работе в квазистационарном режиме, когда параметры  $\alpha_j$  изменяются слабо с момента предыдущего измерения (1–5 мс) – использование 1–2 частот дает удовлетворительную точность определения интегральной плотности плазмы.

Таким образом, на квазистационарной стадии разряда, можно ожидать вполне удовлетворительной точности определения средней электронной плотности даже при использовании одной, или двух зондирующих частот, что, несомненно, должно улучшить быстродействие онлайн-измерений. Подобный анализ будет продолжен в будущем, алгоритм усовершенствован.

### 2.7. Влияние рефракции зондирующего луча на сигнал

Проведем оценки влияния рефракции зондирующего луча на траектории лучей в приближении геометрической оптики, при этом поглощение луча в плазме не учитываем, предполагая его малым в диапазоне рабочих частот.

Для оценки максимального смещения зондирующего луча для упрощения расчетов обычно используют простую формулу [12]  $\sin \Theta_0 = n_{\max}/n_{\text{reflect}}$ , где  $\Theta_0$  – максимальный угол отклонения зондирующего луча,  $n_{\max}$ ,  $n_{\text{reflect}}$  – максимальная электронная плотность плазмы по хорде зондирования и электронная плотность, при которой происходит отражение для зондирующей частоты (критическая плотность), соответственно. Однако следует иметь ввиду, что это оценка максимально возможного отклонения зондирующего пучка при параболическом распределении плотности плазмы (для круглых токамаков) и такое отклонение наблюдается при существенном расстройстве центра плазмы или при неустойчивости удержания плазмы в плоскости, перпендикулярной хорде зондирования, к тому же эта оценка справедлива при условии  $n_{\max} \ll n_{\text{reflect}}$ , что в нашем случае, вообще говоря, не выполняется. Поэтому проведем более точные оценки, и опреде-

**Таблица 2.** Зависимость относительной ошибки определения интегральной электронной плотности от количества используемых частот и точности выбора начальных коэффициентов

Количество частот/процент изменения $\alpha_j$	10%	20%	30%	40%	50%
	Относительные ошибки определения интегральной электронной плотности				
4	0.9	0.7	0.2	0.2	0.1
3	0.9	0.3	0.2	0.4	9.8
2	0.9	2.4	3.6	11.9	12.1
1	1.7	3.1	8.3	12.8	15.6

лим угол рефракции  $\Theta$ , используя уравнение эйконала [13–15]

$$\Theta_{o,e}(f, x) = \int_l \frac{1}{\mu_{o,e}} \frac{\partial \mu_{o,e}}{\partial n}(f, x, z) dl,$$

где  $\mu_{o,e}$  – показатель преломления плазмы на обыкновенной ( $o$ ) и необыкновенной ( $e$ ) волнах соответственно;  $x$  – координата по направлению большого радиуса (по горизонтали),  $z$  – координата по вертикали. Производная под знаком интеграла берется по направлению нормали  $n$ , перпендикулярному к траектории луча  $l$ . Интеграл по  $dl$  вычисляется вдоль траектории луча  $l$ .

На рис. 9 в качестве иллюстрации представлены результаты расчетов для обыкновенной волны с частотой 160 ГГц при зондировании со стороны слабого магнитного поля в экваториальной плоскости вдоль магнитной оси ( $z = 0.5$  м) и при вертикальном смещении плазменного шнура на  $\pm 5$  см ( $z = 0.55$  м и  $z = 0.45$  м). Показаны зависимости от большого радиуса: показателя преломления плазмы (рис. 9а); изменения направления луча (приращения  $\Theta$ ) после прохождения лучом ячейки размером  $1 \times 1$  см в плазме (рис. 9б); угла рефракции луча (рис. 9в); траектории лучей в плазме; также на нижнем графике показана зависимость набега фазы в плазме от вертикального положения зондирующего луча (рис. 9г). Направление луча на входе в плазму горизонтальное, параллельно большому радиусу токамака  $R$ . Расчеты проведены для сценария с высоким магнитным полем 8 Тл. Показаны случаи, когда центр плазменного шнура находится на оси зондирующего луча ( $z = 0.5$  м), и когда имеется вертикальное смещение  $\pm 5$  см плазменного шнура относительно зондирующего канала.

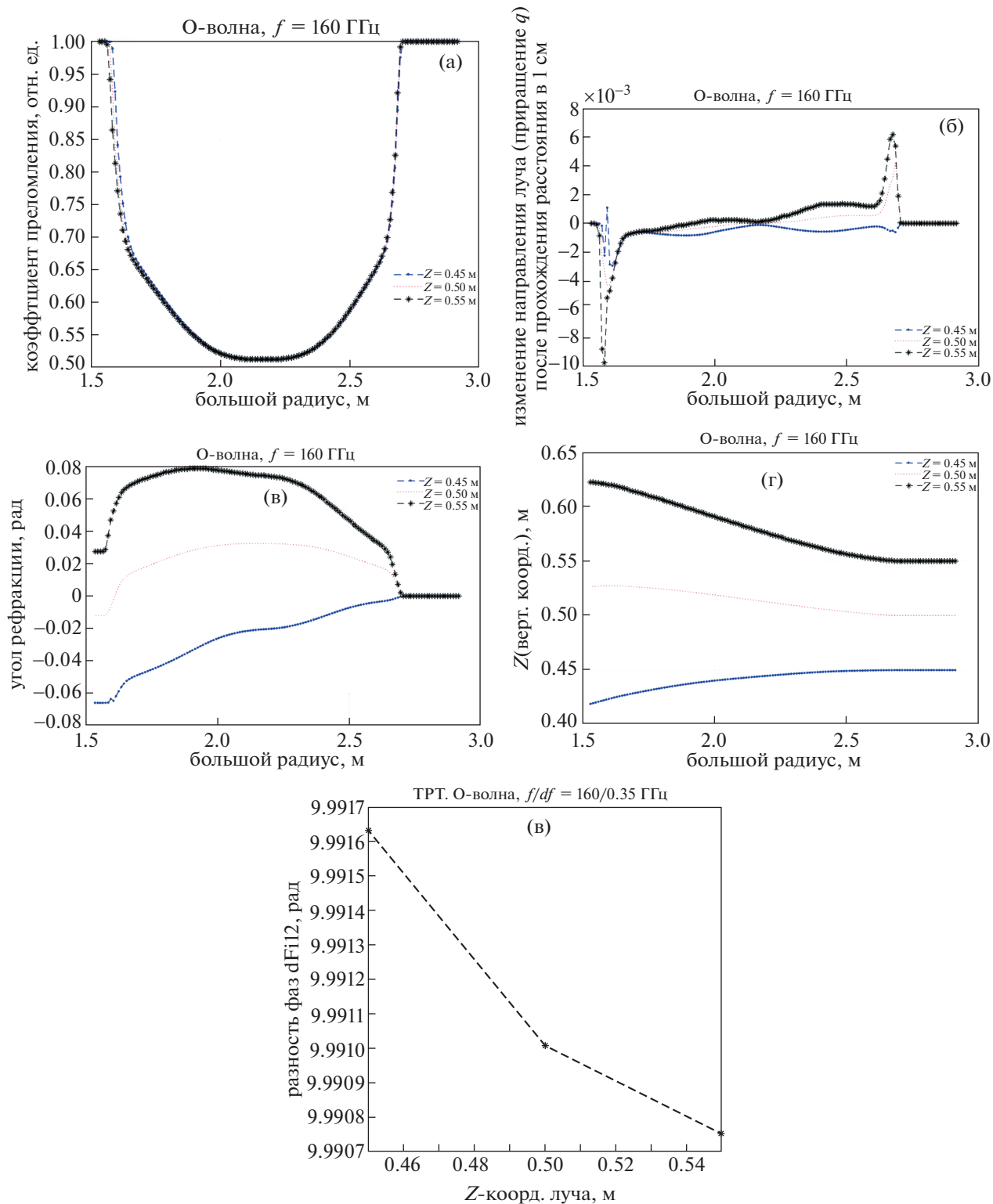
Из приведенных графиков видно, что смещение луча на  $\pm 5$  см от оси плазменного шнура приводит к незначительному изменению набега фазы, не превышающему сотых долей градуса. Очевидно, что в нашем случае такие изменения фазы находятся за пределами измерений. Соответственно, можно утверждать, что изменение вертикального положения плазменного шнура в этих пределах несущественно для рефрактометрии, и приводит только к уменьшению уровня сигнала

на детекторе примерно на 3 дБ. Проведение более точных оценок на этой стадии нецелесообразно, поскольку конфигурация электромагнитной системы TRT еще не заморожена и будет меняться.

В табл. 3 представлены результаты расчетов. Расчеты проводились для частоты 160 ГГц, апертура передающей и приемной антенн  $4 \times 6$  см (высота к ширине), передающая и приемная антенны расположены на радиусах 2.91 и 1.53 м соответственно. Видно, что при вертикальном смещении плазмы в пределах от  $-9$  до  $+5$  см мощность сигнала на приемной антенне уменьшится примерно в 2 раза, т.е. на 3 дБ. Более точные оценки будут проведены на более поздней стадии, когда будут более точно определены различные сценарии разряда в TRT и параметры плазмы в этих сценариях, и заморожена конфигурация электромагнитной системы TRT. Тогда же будет проведен анализ для зондирования на необыкновенной волне.

### 2.8. Оценки ослабления сигнала в плазме и в волноводном тракте, соотношение сигнал/шум в рефрактометрии

Оценки минимальной измеримой средней плотности, проведенные ранее, очевидно, будут справедливы только в том случае, если соотношение сигнал/шум в рефрактометрии будет достаточно высоким. В свою очередь, это соотношение сильно зависит от уровня потерь в измерительном тракте, начиная от передающей антенны и до квадратурного фазового детектора, измеряющего фазовый набег. Полный анализ потерь возможен только после разработки всех компонент рефрактометрии. Поэтому в этом разделе проведены оценки потерь в плазме и в волноводном тракте, и оценки общих потерь в предположении, что схемотехника рефрактометрии TRT аналогична таковой в ИТЭР – будут использованы приемники и излучатели СВЧ-сигнала, аналогичные ИТЭРу, т.е. генераторы, управляемые напряжением (ГУН) в качестве источников СВЧ-излучения в диапазоне частот от 8 до 20 ГГц (или синтезаторы частот примерно с такой же выходной мощностью) и активные умножители частоты для получения зондирующего излучения требуемого частотного диапазона.



**Рис. 9.** Влияние рефракции при экваториальном зондировании на обыкновенной волне с частотой 160 ГГц: показатель преломления плазмы (а); изменение направления луча (приращение  $\theta$ ) после прохождения расстояния в 1 см по горизонтали (б); угол рефракции луча в зависимости от большого радиуса (в); траектории лучей в плазме (г). Показана зависимость набегу фазы в плазме от вертикального положения зондирующего луча (д). Расчеты проведены для сценария с высоким магнитным полем 8 Тл. Показаны случаи, когда плазма находится на оси зондирующего луча ( $z = 0.5$  м), и когда имеется вертикальное смещение плазменного шнура на  $\pm 5$  см ( $z = 0.45$  м и  $z = 0.55$  м).

**Таблица 3.** Влияние рефракции на частоте 160 ГГц, обыкновенная волна

Смещение плазмы по вертикали, см	Угол рефракции зондирующего луча на выходе из плазмы, рад	Смещение луча из-за рефракции на входе в приемную антенну, см	Расходимость луча из-за дифракции, рад	Полуширина луча на приемной антенне с учетом дифракции, см
-10	-0.12	-8.8	0.09375	8.52
-9	-0.11	-7.7		
-5	-0.066	-3.1		
0	-0.012	2.6		
5	0.028	7.2		

Для оценки потери сигнала в плазме, предположим, что рефракция луча отсутствует, приемная антенна расположена со стороны сильного магнитного поля, длина хорды зондирования — 1.4 м. Грубую оценку потерь в плазме (без учета поглощения) в рефрактометрии можно провести, используя результаты расчетов, проведенных в работе [16]. Указанные расчеты не учитывают особенности работы антенн в ближней зоне, но рефрактометрия работает в дальней зоне, и мы можем эти результаты использовать для первоначальных оценок. В нашем случае (работа на просвет) мы должны ориентироваться на предельные значения связи антенн для максимальных частот рефрактометрии (поскольку рабочие частоты в рефрактометрии начинаются там, где рефрактометрия приближается к отсечке, эффективное расстояние между приемной и передающей антеннами в рефрактометрии примерно такое же, что и в рефлектометрии, с учетом двойного прохода луча в рефлектометрии и одного прохода — в рефрактометрии), т.е. для обыкновенной волны это будет  $-16$  дБ, а для необыкновенной волны — тоже около  $-16$  дБ (рис. 5 из [16]). Учитывая, что в этой работе апертура антенн принималась равной  $40 \times 40$  мм, а в рефрактометрии она предполагается чуть больше —  $40 \times 60$  мм, приведенную выше оценку потерь в  $-16$  дБ можно принять как консервативную (для сведения, в ИТЭР эти потери оцениваются в 37 дБ в максимуме).

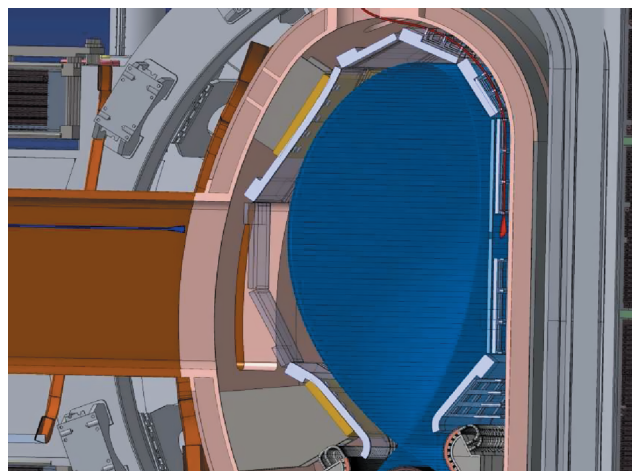
Для оценки потерь в волноводной системе, можно воспользоваться оценками, проведенными для установки ИТЭР [17, 18], полагая, что они будут в TRT в любом случае не больше, чем в ИТЭР, где они составляют 13 дБ в самих волноводах и 13 дБ в объединителях-разветвителях частотных каналов и в блоке приема-передатчиков, т.е. в сумме не более 26 дБ. С учетом всего сказанного, суммарные потери в рефрактометрии TRT будут около 42 дБ против ожидаемых в ИТЭР 76 дБ. Соответственно, больших проблем с соотношением сигнал/шум в рефрактометрии TRT не ожидается при использовании аналогичных компонент в диагностике TRT и при однопроходном зондировании на просвет.

### 3. ИНТЕГРАЦИЯ РЕФРАКТОМЕТРИИ В TRT

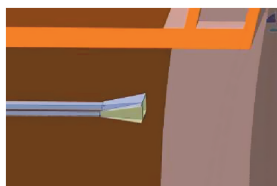
В этом разделе будут кратко рассмотрены вопросы интеграции диагностики на установке TRT. Рабочий диапазон зондирующих частот рефрактометрической диагностики в TRT близок к диапазону частот рефлектометрии, поэтому многие элементы рефрактометрии будут аналогичны таковым в рефлектометрии, в частности, антенно-волноводная система, приемно-передающая часть, система сбора данных. Вопросы выбора, оптимизации параметров этих элементов и их интеграции достаточно подробно описаны в работе [16]. Из проведенного анализа следует, что для рефрактометрии в TRT оптимальным на данный момент является выбор однопроходной схемы зондирования как энергетически более выгодной по сравнению с двухпроходной (с отражением от внутренней стенки), антенны со стороны сильного магнитного поля можно выбрать аналогичные антеннам рефлектометрии, в то время как со стороны слабого магнитного поля можно использовать более простые рупорные антенны. Размеры апертуры антенн тоже будут близки к таковым в рефлектометрии, но для лучшего согласования приемной и передающей антенн с учетом тороидальной геометрии плазмы их целесообразно делать прямоугольными, поэтому апертуру антенн предлагается выбрать  $40 \times 60$  мм (В  $\times$  Ш). Так как предполагается одновременное зондирование на обыкновенной и необыкновенной волнах, будут использоваться 4 антенны, 2 для каждой моды, с HFS (со стороны сильного магнитного поля) и LFS (со стороны слабого магнитного поля). Поскольку диапазон частот зондирующего излучения близок с требуемым в ИТЭР, можно применить волноводы с типоразмером, используемым на ИТЭР ( $20 \times 12$  мм, стенка 1 мм). Вариант интеграции рефрактометрии в ВК (вакуумной камере) TRT представлен на рисунке 10. На рис. 10а показан общий вид в ВК, на рис. 10б — вид на LFS, рис. 10в — на HFS.

Также возможно применение стандартного волновода  $23 \times 10$  мм, стенка 1 мм, в котором, как показано в работе [16], потери (на неоднородностях линии) на преобразование СВЧ-излучения в

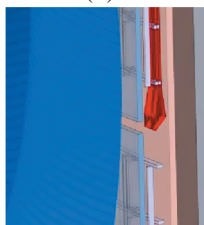
(а)



(б)



(в)



**Рис. 10.** Вариант интеграции рефрактометрии в ВК TRT: общий вид в вакуумной камере (ВК) (а); вид на антенны и волноводы с LFS (б), с HFS (в).

высшие волноводные моды будут меньше. Что же касается приемно-передающей части (генераторы излучения, детекторы, миксеры и т.п.), то она будет в основном аналогична таковой в ИТЭР, т.е. предлагается использовать генераторы, управляемые напряжением (ГУН) в качестве источников СВЧ-излучения в диапазоне частот от 8 до 20 ГГц и активные умножители частоты для получения зондирующего излучения требуемого частотного диапазона. Поскольку в рефрактометрии нет необходимости быстрого свипирования по частоте, возможно также использование и других источников (синтезаторы частот примерно с такой же выходной мощностью, ЖИГ-генераторы на резонаторах на основе железиттриевого граната, и т.п.). Окончательный выбор будет сделан позднее, на следующих этапах работы. Вся активная аппаратура рефрактометрии, как и в ИТЭР, должна располагаться на удалении от зала с токамаком, за пределами защиты, поэтому протяженность волноводных линий будет значительной, но пока мы предполагаем, что она будет не более чем в ИТЭР, просто в силу других масштабов установки TRT.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ различных вариантов реализации проекта рефрактометрической диагностики для токамака TRT. Выделены основные особенности установки, которые влияют на выбор параметров рефрактометрии TRT: это достаточно большая плотность плазмы, равная или превышающая плотность плазмы в токамаке ИТЭР, сильное магнитное поле, достаточно высокая электронная температура, большая удельная мощность, выделяемая на сепаратрисе и на первой стенке, высокие удельные нейтронные нагрузки, сравнимые с таковыми в ИТЭР.

Рассмотрены и проанализированы возможности зондирования на обыкновенной и необыкновенной волнах. На основе предварительного анализа, предложен и рассмотрен более подробно вариант реализации рефрактометрии в TRT с одновременным зондированием на необыкновенной волне в диапазонах  $V - 50-75$  (WR-15),  $W - 75-110$  (WR-10),  $D - 110-170$  (WR-6) ГГц и на обыкновенной волне в диапазонах  $75-110$  (WR-10),  $110-170$  (WR-6) ГГц.

После проведенного анализа сделан предварительный вывод, что для рассмотренных сценариев TRT (8 Тл/5 МА и 5 Тл/4 МА) достаточно применять зондирование в диапазонах  $V - 50-75$  (WR-15),  $W - 75-110$  (WR-10) ГГц на необыкновенной волне и в диапазонах  $75-110$  (WR-10),  $D - 110-170$  (WR-6) ГГц на обыкновенной волне (после проведения анализа возможных потерь из-за поглощения в плазме при работе вблизи отсечки). Такой выбор частот позволит обеспечить динамический диапазон измерений по плотности плазмы не менее 100 и диагностика будет работоспособна во всех режимах работы установки. Поскольку для сценария с пониженным полем 5 Тл подробных 3D-профилей во время подготовки статьи не имелось, при анализе были использованы 3D-профили для сценария с полем 8 Тл с масштабированием.

Окончательный выбор волноводных диапазонов будет сделан на более позднем этапе разработки, с учетом данных о параметрах плазмы для других возможных сценариев разряда и после детального анализа выходных параметров СВЧ-компонент, имеющихся в коммерческом доступе на момент анализа.

Следует отметить, что при зондировании на обыкновенной волне результаты измерений не будут зависеть от магнитного поля, что весьма положительно скажется на скорости обработки данных измерений, и, соответственно, на временном лаге онлайн-измерений плотности плазмы с помощью рефрактометрии, поэтому вариант одновременного зондирования на обыкновенной волне и на необыкновенной волнах рассматривается как желательный, но вопрос о потерях в плазме на

обыкновенной волне требует дальнейшего исследования.

Временное разрешение онлайн-измерений электронной плотности в рефрактометрии TRT будет не хуже, чем в ИТЭР, т.е. не хуже 1–5 мс, по консервативным оценкам (при использовании нейронных сетей). Более точные оценки будут проведены в дальнейшем.

Показано, что в рассмотренной конфигурации, на начальной стадии разряда диагностика в экваториальном порту начинает “видеть” плазму только после 7 с разряда. Поэтому обязательным является требование к “бессбойности” диагностики, что в дифференциальной рефрактометрии и в АМ-рефрактометрии достигается измерением фазовых набегов в диапазоне от 0 до 360° (эквивалентно измерению времени задержки сигнала в плазме). Зондирование плазмы должно проводиться по направлению градиента плотности плазмы для минимизации эффектов рефракции, однако и при вертикальном перемещении плазменного шнура диагностика работоспособна, уменьшается только соотношение сигнал/шум. Основной анализ проведен без учета влияния рефракции. Более подробно этот и другие эффекты будут исследованы на более поздних стадиях разработки, когда будет заморожена электромагнитная система установки и представлены более подробные сведения о 3D-профилях основных параметров плазмы (электронная плотность, температура, магнитное поле).

Предварительный анализ показал, что на квазистационарной стадии разряда, можно ожидать вполне удовлетворительной точности определения средней электронной плотности (1–2%) даже при использовании одной или двух частот для зондирования плазмы, что, несомненно, должно улучшить быстродействие онлайн измерений средней плотности в рефрактометрии TRT. Этот анализ будет продолжен.

Очень кратко рассмотрены вопросы интеграции рефрактометрии в TRT. Предполагается, что она будет аналогична интеграции в токамаке ИТЭР, с тем отличием, что приемные антенны будут отдельные, а не совмещенные с рефлектометрией, как это предполагается в ИТЭР. Также предполагается располагать по 2 антенны с каждой стороны (HFS, LFS), отдельно для зондирования обыкновенной волной и необыкновенной. Расположение и интеграция антенно-волноводной системы со стороны HFS будут аналогичны предложенной для рефлектометрии, с LFS стороны — простые рупорные антенны, волноводы предполагается использовать  $23 \times 10$  мм, как и в рефлектометрии TRT.

Вопросы, и проблемы, связанные с нейтронными и радиационными нагрузками на элементы диагностики в данной работе, не рассматрива-

лись. Это будет сделано на следующих этапах, когда будут проведены более точные оценки нейтронных и радиационных потоков в вакуумной камере TRT.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 970.
2. Мазуль И.В., Гиниятулин Р.Н., Кавин А.А., Литуновский Н.В., Маханьков А.Н., Пискарев П.Ю., Танчук В.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1103.
3. Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кашук Ю.А., Родионов Р.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1170.
4. Mazzucato E. // Phys. Fluids B: Plasma Phys. 1992. V. 4. P. 3460. <https://doi.org/10.1063/1.860354>
5. Афонин К.Ю., Петров В.Г. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 299.
6. Минашин П.В., Кукушкин А.Б. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. С. 14.
7. Бондарчук Э.Н., Кавин А.А., Минеев А.Б., Коновалов С.В., Лукаш В.Э., Хайрутдинов Р.Р. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 1059.
8. Петров В.Г., Петров А.А., Мальшев А.Ю., Марков В.К., Бабарыкин А.В. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 346.
9. Petrov A.A., Petrov V.G. // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. P. 1465. <https://doi.org/10.1063/1.1530389>
10. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1960.
11. Петров А.А., Петров В.Г., Мальшев А.Ю., Марков В.К., Бабарыкин А.В. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 4. С. 346.
12. Shmoys J. // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. P. 689.
13. Солимено С., Крозиньяни Б., Ди Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптического излучения. М.: Мир, 1989. С. 70.
14. Петров В.Г. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 340.
15. Петров В.Г., Афонин А.Ю., Афонин К.Ю. // XLVIII Междунар. (Звенигородская) конф. по физике плазмы и УТС, 15–19 марта 2021 г. Тез. докл. Э-2-8.
16. Шелухин Д.А., Субботин Г.Ф., Вершков В.А., Владимиров И.А. // Физика плазмы. 2022. Т. 48, № 11. С.
17. Вершков В.А., Петров В.Г., Скопинец Д.А., Субботин Г.Ф., Шелухин Д.А., Афонин А.Ю., Афонин К.Ю. // XLVI Междунар. (Звенигородская) конф. по физике плазмы и УТС, 18–22 марта 2019 г. Тез. докл. Э-21.
18. Shelukhin D. Diagnostic Power Budget and Signal-to-Noise Assessment. <https://user.iter.org/default.aspx?uid=29YXLS>.