

К 100-ЛЕТИЮ  
Б.В. СЕСТРОРЕЦКОГО

УДК 621.396

ПРИМЕНЕНИЕ 2D КОДА “Tamic”, ОСНОВАННОГО  
НА МЕТОДЕ ИМПЕДАНСНОГО АНАЛОГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ПРОСТРАНСТВА СЕСТРОРЕЦКОГО, ДЛЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ  
ПЛАЗМЫ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ ТОКАМАК

© 2023 г. В. А. Вершков<sup>a, b</sup>, Д. А. Шелухин<sup>a, b</sup>, М. Ю. Исаев<sup>a</sup>, К. Н. Климов<sup>c, \*</sup>

<sup>a</sup> Научно-исследовательский центр “Курчатовский институт”,  
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Российская Федерация

<sup>b</sup> Автономная некоммерческая организация Координационный центр “Управляемый термоядерный синтез –  
международные проекты” (УТС-Центр),  
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Российская Федерация

<sup>c</sup> Национальный исследовательский университет “Московский авиационный институт”,  
Волоколамское шос., 4, Москва, 125993 Российская Федерация

\*E-mail: const0@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2023 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 25.04.2023 г.

Рассмотрены применения двумерного полноволнового электромагнитного кода “Tamic Analyser”, разработанного группой Б.В. Сестрорецкого для исследования предельных возможностей диагностики рефлектометрия в плазме токамака. Показано, что путем сравнения экспериментальных данных рефлектометрии с расчетами по этому коду оказывается возможным определить структуру флуктуаций плотности в токамаке, однако экспериментальные радиальные корреляционные длины могут оказаться значительно завышенными. Моделирование с помощью кода “Tamic Analyser” позволило определить предельный уровень флуктуаций плотности, при котором возможно измерение профиля плотности плазмы и наблюдении альфвеновских флуктуаций в строящемся Международном экспериментальном термоядерном реакторе типа токамак (ИТЭР). Рассмотрены возможные способы увеличения быстродействия и счетного поля кода.

DOI: 10.31857/S0033849423080144, EDN: ZKNTOG

## ВВЕДЕНИЕ

Установки токамак являются плазменными ловушками, в которых тороидальный шнур горячей плазмы удерживается с помощью магнитных полей. Они создаются комбинацией внешнего сильного тороидального магнитного поля и поля протекающего по плазме тока [1]. Концепция токамака была предложена и активно развивалась в СССР начиная с 50-х годов. В начале 70-х исследования на таких установках стали проводиться во многих странах мира и токамак стал основным кандидатом для построения термоядерного реактора. С этой целью в настоящее время во Франции сооружается Международный экспериментальный термоядерный реактор (ИТЭР) типа токамак [2]. Основной задачей для достижения реакторных параметров является улучшение термоизоляции плазмы. С этой целью в исследованиях параметров плазмы и их флуктуаций применяется множество диагностик. Важнейшее место среди них занимают методы диагностики плазмы с помощью зондиро-

вания сверхвысокочастотными (СВЧ) волнами. Однако для разработки диагностик и интерпретации их результатов необходимо решать полноволновую задачу распространения электромагнитной волны в неоднородной плазме с сильным магнитным полем сложной конфигурации. Такой код был создан на основе метода импедансного аналога электромагнитного пространства, предложенного Б.В. Сестрорецким в начале 70-х годов XX в. [3, 4]. В данном методе используются две эквивалентные модели уравнений Максвелла в виде электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами. Для анализа в частотной области большее использование получила модель в виде сосредоточенных элементов, а во временной области – в виде цепей с распределенными параметрами. Отметим, что объемные модели вместе с их эквивалентными схемами были предложены в работах Б.В. Сестрорецкого ранее других, в том числе зарубежных авторов [5]. Характерной чертой работы отечественной научной

школы под руководством Б.В. Сестрорецкого является не просто предложение метода, а и почти одновременная программная реализация в виде соответствующего кода [6–16].

Поскольку в токамаке ввиду наличия сильного тороидального магнитного поля характеристики плазмы однородны в тороидальном направлении, то для описания распространения СВЧ-волн достаточно ограничиться двумерным кодом. Использование двумерного кода определяется также ограничениями времени расчетов для волн миллиметрового диапазона в плазме с размерами до 2 м (в ИТЭР) с учетом необходимости многократных расчетов на меняющемся во времени поле плотности плазмы.

### 1. ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ “TAMIC RtH ANALYZER” И “TAMIC RtX ANALYZER”

Программный комплекс Tamic Rt-H v5.0p (Professional) реализует двухпараметрический алгоритм анализа рассеяния электромагнитных волн  $H$ -поляризации от неоднородных плазменных сред, построенный на основе метода импедансного аналога электромагнитного пространства Сестрорецкого [17–22].

Указанный программный комплекс состоит из пяти программ.

1. *Tamic Rt-H Analyzer (Professional)* – счетное ядро, осуществляет ввод данных из файла входного задания, расчет, вывод в файл геометрии устройства, распределения полей, сигналов на выходах устройства и формирует матрицу рассеяния; программа реализована для двух моделей точности: 1) Float одинарная (вещественное число занимает 4 байта) и 2) Double двойная (вещественное число – 8 байт). Использование модели Float позволяет уменьшить время вычислений на 40% и уменьшить используемую память в два раза по сравнению с Double, а использование двойной точности позволяет расширить динамический диапазон вычислений [17–22].

2. *Tamic RtH Output Field Viewer* – программа для просмотра геометрии устройства и распределения интенсивности электрического поля в нестационарном режиме; позволяет синхронизировать расчет и просмотр полей, просмотр амплитудного и фазового распределения электрического поля для стационарного режима.

3. *Tamic RtH Output Signal Viewer* – программа для просмотра сигналов, амплитуд и фаз падающих и отраженных волн на входах устройства.

4. *Tamic SH -matrix Output Characteristics Viewer* – программа просмотра файлов  $S$ -матриц устройства.

5. *Tamic Directional Pattern Viewer* – программа просмотра диаграмм направленности.

Разделение процессов вычисления и визуализации данных, а также предложенное решение взаимодействия через файлы данных программ

пакета позволяет таким образом распределять вычислительные ресурсы, чтобы программы выполнялись на различных компьютерах, объединенных в локальную сеть. Это важно для повышения эффективности и гибкости организации вычислительного процесса, поскольку, например, процедура прорисовки распределения полей требует приблизительно на порядок больше оперативной памяти и числа арифметических операций, чем, собственно, сам процесс вычисления значений полей и отраженных сигналов на входах устройства.

Входными данными является геометрия анализируемого устройства, которая описывается в файле задания (\*.tpl). Файл задания дается программе Tamic Rt-H Analyzer, а она по результатам расчета выдает результаты анализа в виде файлов семи типов: файл анализируемой геометрии (\*.tt), файл распределения интенсивности полей в текущий момент времени (\*.tf), файл распределения амплитуды электрического поля для заданной частоты (\*.AMP), файл распределения фазы электрического поля для заданной частоты (\*.FAZ), файл сигналов на входах устройства (\*.t), файл  $S$ -матрицы устройства (\*.s), файл с диаграммой направленности исследуемой геометрии (\*.dat). Для обработки результатов можно пользоваться предложенными в пакете программными приложениями-просмотрщиками (Viewer), либо другими внешними средствами. Подобное разделение позволяет повысить гибкость системы анализа заданной геометрии и минимизировать требования к ресурсам компьютера при проведении расчета.

Управление режимами работы счетного ядра возможны как из файла входного задания, так и с помощью систем меню и “горячих” клавиш.

Входной язык, реализованный в программе Tamic Rt-H Analyzer, позволяет описывать достаточно широкий класс планарных геометрий с произвольным законом распределения диэлектрической проницаемости и различными граничными условиями.

В программе Planar Rt-H Analyzer расход памяти составляет четыре вещественных числа на один узел сетки. Количество арифметических операций в один временной такт для одного узла сетки составляет четыре сложения, два умножения и одно вычитание вещественных чисел.

Теоретически данный алгоритм требует 25 процессорных тактов для одного узла сетки [17–22], однако реально получается почти в два раза больше, что связано с более низкими рабочими частотами шины данных и сверхоперативной (кэш) памяти. Например, если тактовая частота процессора составляет 433 МГц, то частота шины данных (по которой идет обмен данными между оперативной памятью и процессором) составляет 100 МГц, а

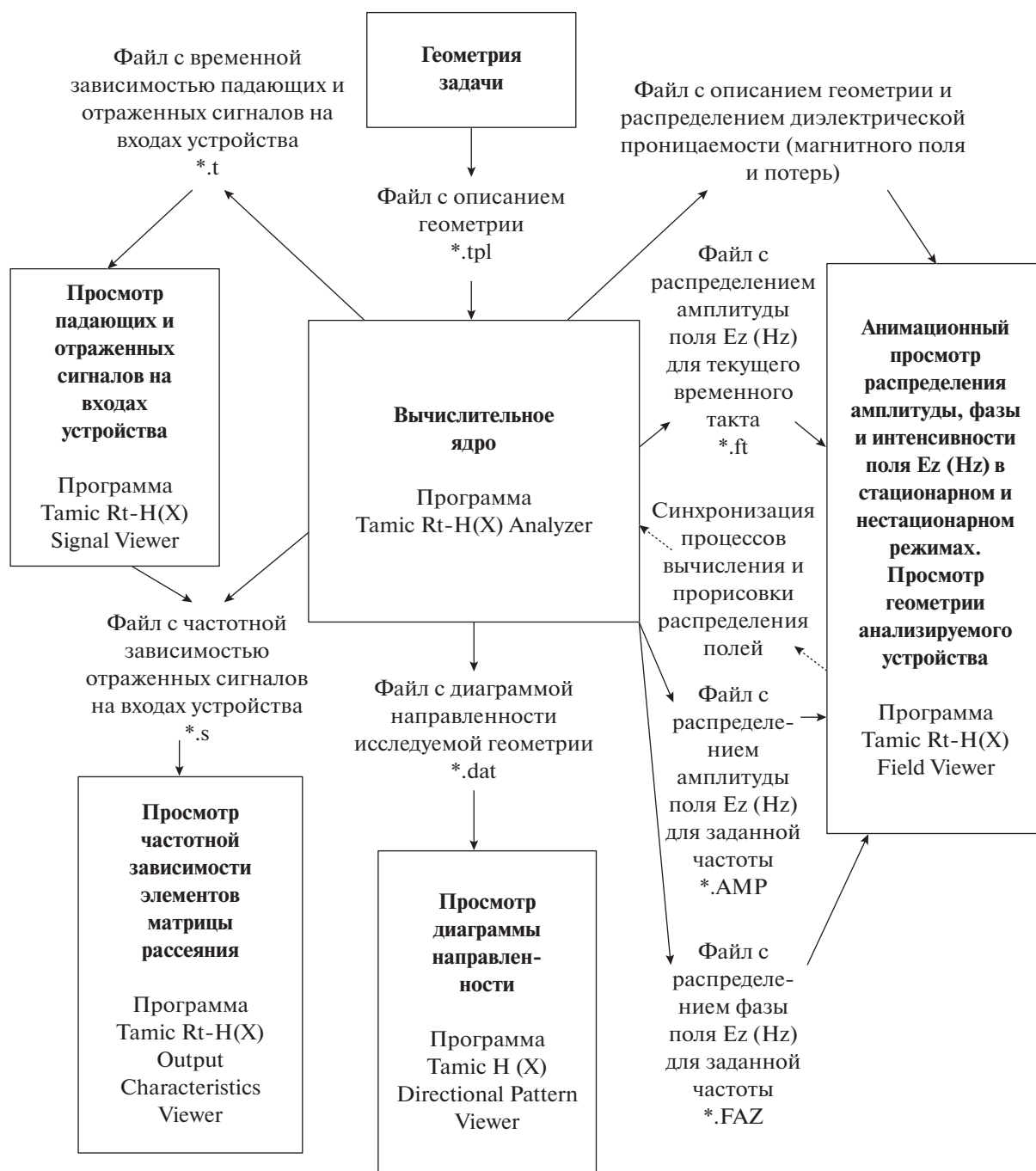


Рис. 1. Схема организации взаимодействия между программами в комплексах Tamic Rt-H и Tamic Rt-X.

частота работы кэш-памяти второго уровня (основной объем кэш-памяти) – 217 МГц.

Программа Planar Rt-H Analyzer реализована в двух моделях:

1) одинарная точность – вещественные числа занимают 4 байта (мантисса имеет 7 цифр, порядок от –38 до +38);

2) двойная точность – вещественные числа занимают 8 байт (мантисса имеет 15 цифр, порядок от –308 до +308).

Основные параметры счетного ядра программы следующие [15–20]: 16 байт памяти на один узел сетки, 48 тактов процессора на узел при одинарной точности; 32 байт на узел и 78 тактов процессора на узел при двойной точности анализа.

Как видно из табл. 1, программа Planar Rt-H Analyzer с одинарной точностью позволяет на персональном компьютере с оперативной памятью 2 Гб анализировать геометрию, состоящую из 100 млн узлов с неоднородным диэлектрическим

**Таблица 1.** Требования программ Planar Rt-H analyzer (float и double) и Planar Rt-X analyzer (float и double) к памяти и скорости вычислений для задач большого объема

Программа	Для одного элементарного объема требуется		100λ × 100λ Δ = λ/20 4 × 10 <sup>6</sup> узлов 2 × 10 <sup>4</sup> тактов	300λ × 300λ Δ = λ/20 3.6 × 10 <sup>7</sup> узлов 6 × 10 <sup>4</sup> тактов	500λ × 500λ Δ = λ/20 10 <sup>8</sup> узлов 10 <sup>5</sup> тактов
	байт	тактов процессора	память, Мб; время	память, Мб; время	память, Мб; время
<b>Planar Rt-H Analyzer</b>					
Planar Rt-H Analyzer (float)	16	48	61; 46 мин (Pent.IV-1.4)	549; 21 ч (Pent.IV-1.4)	1'526; 95 ч (Pent.IV-1.4)
Planar Rt-H Analyzer (double)	32	78	122; 1.2 ч (Pent.IV-1.4)	1'098; 34 ч (Pent.IV-1.4)	–
<b>Planar Rt-X Analyzer</b>					
Planar Rt-X Analyzer (float)	48	153	179; 64 мин (Pent.IV-3.2)	1'610; 29 ч (Pent.IV-3.2)	4'471; 132 ч (Pent.IV-3.2)
Planar Rt-X Analyzer (double)	96	252	358; 1.8 ч (Pent.IV-3.2)	3'219; 47 ч (Pent.IV-3.2)	–

Примечание. Для Planar Rt-H Analyzer (float и double) – процессор Pent.IV – с тактовой частотой 1.4 ГГц, для Planar Rt-X Analyzer (float и double) – процессор Pent.IV – с тактовой частотой 3.2 ГГц.

заполнением. Время выполнения задачи дано для компьютера с тактовой частотой 1.4 ГГц для семи проходов вдоль исследуемой геометрии плоской волной.

В отличие от программного комплекса *Tamic Rt-H*, программный комплекс *Tamic Rt-X v2.0p (Professional)* реализует четырехпараметрический алгоритм анализа рассеяния электромагнитных волн для *E*-поляризации от неоднородной подмагниченной плазмы [23–26].

В программном комплексе *Tamic Rt-X*, как и в пакете *Tamic Rt-H*, реализовано разделение процессов вычисления и визуализации данных.

Схемы организации взаимодействия между программами в комплексах *Tamic Rt-H* и *Tamic Rt-X* аналогичны и приведены на рис. 2.

В программе *Planar Rt-X Analyzer* расход памяти составляет 12 вещественных чисел на один узел сетки [23–26]. Количество арифметических операций в один временной такт для одного узла сетки составляет: двенадцать сложений, девять умножений и одно вычитание вещественных чисел. Теоретически данный алгоритм требует 75 процессорных тактов для одного узла сетки, однако реально получается (как и для *Planar Rt-H Analyzer*) почти в два раза больше [23–26].

Программа *Planar Rt-X Analyzer* также реализована в двух моделях – с одинарной и двойной точностями.

Основные параметры счётного ядра *Planar Rt-X* следующие: 48 байт памяти на один узел сетки, 153 тактов процессора на узел при одинарной точности; 96 байт на узел и 252 тактов процессора на узел при двойной точности анализа.

Как видно из табл. 1, программа *Planar Rt-X Analyzer* с одинарной точностью позволяет на персональном компьютере с оперативной памятью 2 Гб анализировать геометрию, состоящую из 36 млн узлов с неоднородным диэлектрическим заполнением (включая участки с потерями) и произвольным распределением магнитного поля [23–26]. Время выполнения задачи дано для компьютера с тактовой частотой 3.2 ГГц для семи проходов вдоль исследуемой геометрии плоской волной.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ В ТОКАМАКЕ T-10

Исследования на установках токамак показали, что полученные параметры термоизоляция значительно превышает значения, предсказанные на основе теории, учитывающей только столкнове-

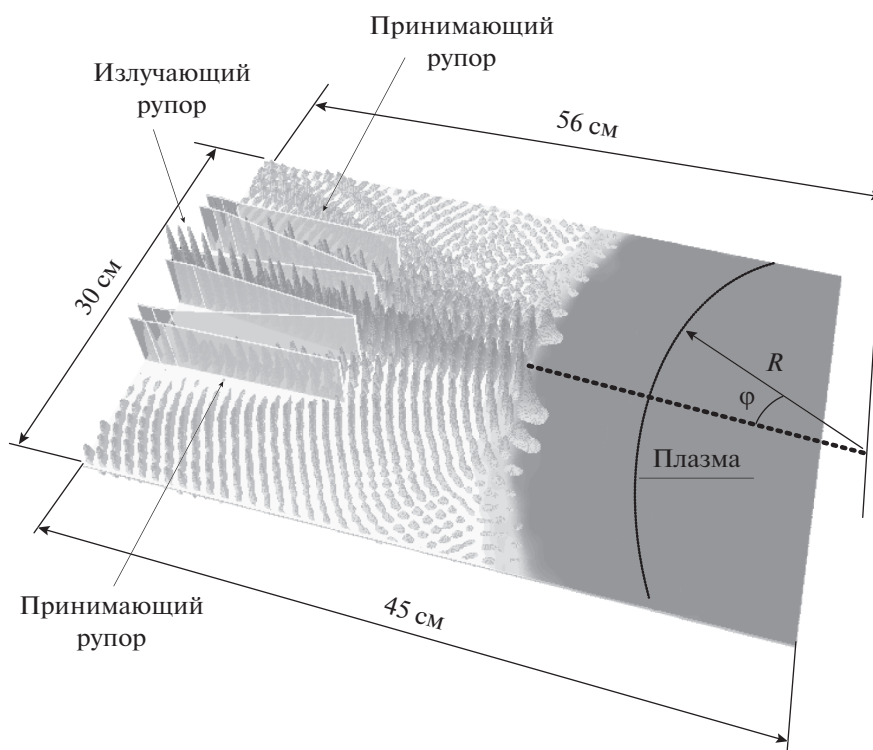


Рис. 2. Схема расчета отражения электромагнитной волны по коду "Tamic Rt-N analyzer".

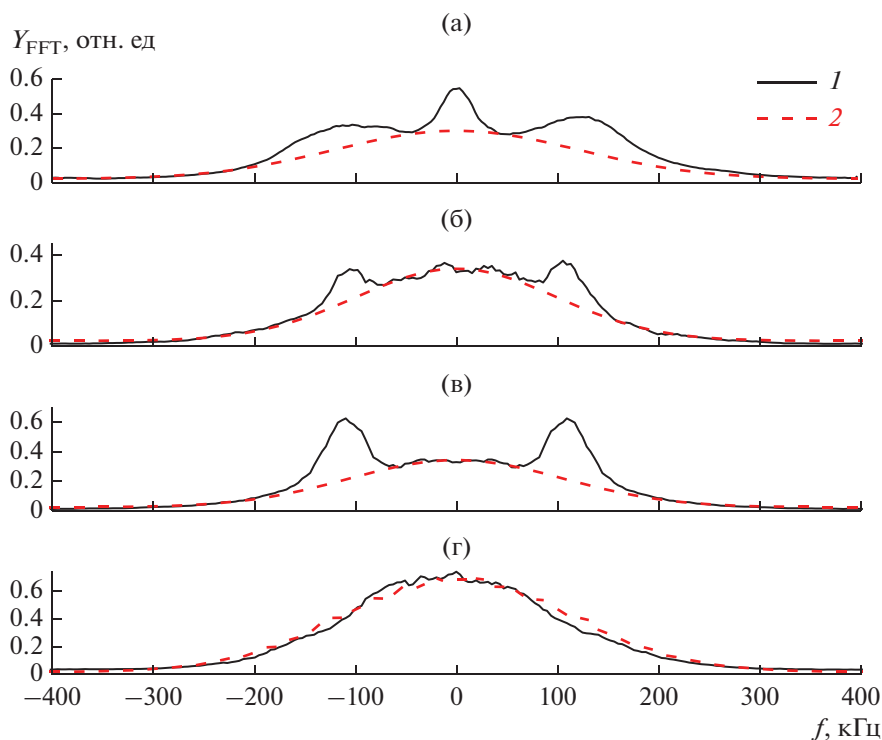
ния частиц. Ухудшение термоизоляции возникает из-за развития неустойчивостей плазмы, проявляющихся в турбулентных флуктуациях плотности. В связи с этим изучение характеристик этих флуктуаций является важнейшей задачей исследований с целью улучшения термоизоляции плазмы.

Эксперименты показали, что отраженная от плазмы СВЧ-волна несет информацию о флуктуациях плотности. Однако флуктуации амплитуды и фазы отраженной волны связаны не только с локальными перемещениями критического отражающего слоя, но и с набегом фазы на флуктуациях по пути распространения волны. Кроме того, результирующая амплитуда и фаза отраженной волны определяются в результате интерференции отраженных волн от некоторого пятна, определяющегося диаграммой направленности антенн. Для реальных флуктуаций плотности размер флуктуаций или сравним, или меньше этой области. В этом случае флуктуации отраженного сигнала будут результатом интерференции отражений от нескольких возмущений.

Для правильной интерпретации эксперимента необходим учет эффекта многократного отражения от металлической стенки камеры токамака. Большой проблемой является также ограничение максимального уровня амплитуды флуктуаций плотности, при которых возможны эффективные рефлектометрические измерения. Дело в том, что по мере увеличения амплитуды флуктуаций плот-

ности плазмы растет уровень флуктуаций фазы отраженного сигнала. Однако, когда величина флуктуаций фазы достигает  $2\pi$ , теряется однозначность ее интерпретации. При этом форма спектров отраженного сигнала значительно искажается. Все эти обстоятельства приводят к тому, что полученные в эксперименте характеристики флуктуаций амплитуды и фазы отраженной волны могут значительно отличаться от соответствующих свойств локальных флуктуаций плотности в точке отражения. Поэтому интерпретация рефлектометрических измерений может быть получена только после учета перечисленных эффектов. Реализовать это можно только с применением полноволновых кодов отражения электромагнитной волны от плазмы. Причем такие расчеты должны полностью воспроизводить геометрию эксперимента (положение и размер антенн, положение отражающей стенки токамака). Поскольку в токамаке имеется сильное магнитное тороидальное поле, то флуктуации плотности должны быть сильно вытянуты вдоль магнитно-силовых линий. Поэтому для моделирования отражения волны от плазмы возможно использовать двумерный код.

Расчеты по распространению обыкновенной электромагнитной волны проводили с помощью двухмерного кода "Tamic RTN Analyzer", описанный в первой части. Этот код позволяет динамически рассчитывать распространение электромагнитного излучения в среде с переменной диэлек-

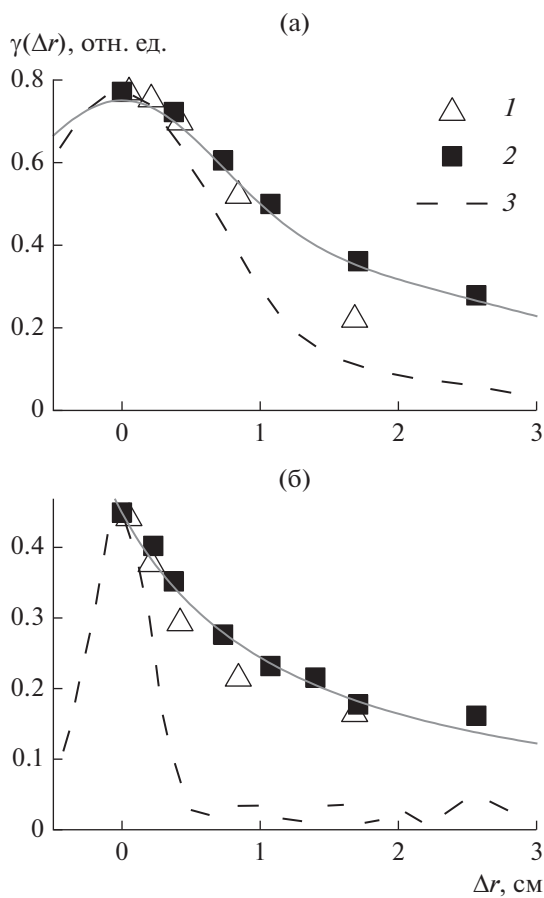


**Рис. 3.** Сравнение экспериментального (а) и модельного (б) спектров флуктуаций отраженной волны, измеряемых рефлектометрией; в – спектр локальных флуктуаций плотности в модели; г – экспериментальный и модельный спектры только для ВВ-флуктуаций; 1 – суммарный спектр, 2 – широкополосная компонента ВВ.

трической проницаемостью меньше единицы, какой и является плазма с любой заданной топологией. В этом коде полностью воспроизводится геометрия излучающих и приемных рупорных антенн и геометрия стенки токамака. Поскольку код рассчитывает динамическую картину распространения волны, то с его помощью можно однозначно разделить эффект первого и последующих отражений от стенки камеры. Необходимое для расчетов пространственное и временное распределение флуктуирующей части плотности были заданы специальной моделью. Причем необходимые параметры этой модели находили из наилучшего совпадения результатов расчета и эксперимента. Поскольку времена изменения флуктуаций (1...10 мкс) много больше времени распространения волны (1...10 нс), то каждый расчет проводили на фиксированном пространственном распределении плотности, соответствующем каждому дискретному моменту времени оцифрования. Для T-10 частота оцифрования была 800 кГц. Для анализа спектрального состава турбулентности с достаточной статистикой расчеты проводились для 1024 или 4096 моментов времени. На рис. 2 приведена геометрия поля расчета и распределение амплитуды электрического поля волны в некоторый момент времени. Хорошо видно возмущение границы области отражения от поверхности критической плотности.

На рис. 3 дано сравнение экспериментального спектра и моделированного по коду Tamic PTH Analyzer, полученное в [27].

Экспериментальный спектр, показанный на рис. 3а, состоит из трех компонент: флуктуации с широким диапазоном частот (Broad Band); КвазиКогерентные (КК) максимумы на 120 кГц и низкочастотные колебания в области до 50 кГц. Было проведено два цикла моделирования. В первом модельный фон состоял из однополярных гауссовых возмущений плотности, имитирующих Broad Band. На рис. 3г видно практически полное совпадение модельного и экспериментального спектров. Во втором расчете в флуктуирующий фон были добавлены квазипериодические возмущения для моделирования КК-возмущений. На рис. 3б показан спектр флуктуаций отраженного сигнала в моделировании (сплошная линия). Видно, что модель и в этом случае, как и на рис. 3г, качественно описывает экспериментальный спектр. На рис. 3в также приведен спектр локальных значений флуктуаций плотности в точке отражения. Хорошо видно, что на спектре флуктуаций отраженного сигнала максимумы, соответствующие КК-флуктуациям имеют значительно меньший контраст по сравнению со спектром локальных флуктуаций. Это происходит из-за эффекта усреднения отраженного сигнала по области отражения.



**Рис. 4.** Сравнение экспериментальных (1) и модельных (2) радиальных кросс-корреляционных функций для КК- (а) и ВВ-флуктуаций (б); 3 – локальные флуктуации плотности.

Таким образом, проведенное моделирование позволило оценить влияние диаграммы направленности антенн на эффективность регистрации различного вида флуктуаций плотности.

Моделирование также дает возможность оценить вклад от нелокального набора фазы отраженного сигнала вдоль пути распространения в полный набег фазы. Было проведено два цикла моделирования [27]. В первом на линейно растущий фон основной плотности плазмы накладывался флуктуирующий фон однополярных гауссовых возмущений с радиальной полушириной в 0.46 см. Расчет отраженной волны был проведен на нескольких частотах зондирующих обыкновенных СВЧ-волн (вектор  $E$ -волны параллелен магнитному полю), что позволяло моделировать флуктуации отраженной волны на разных радиусах плазмы.

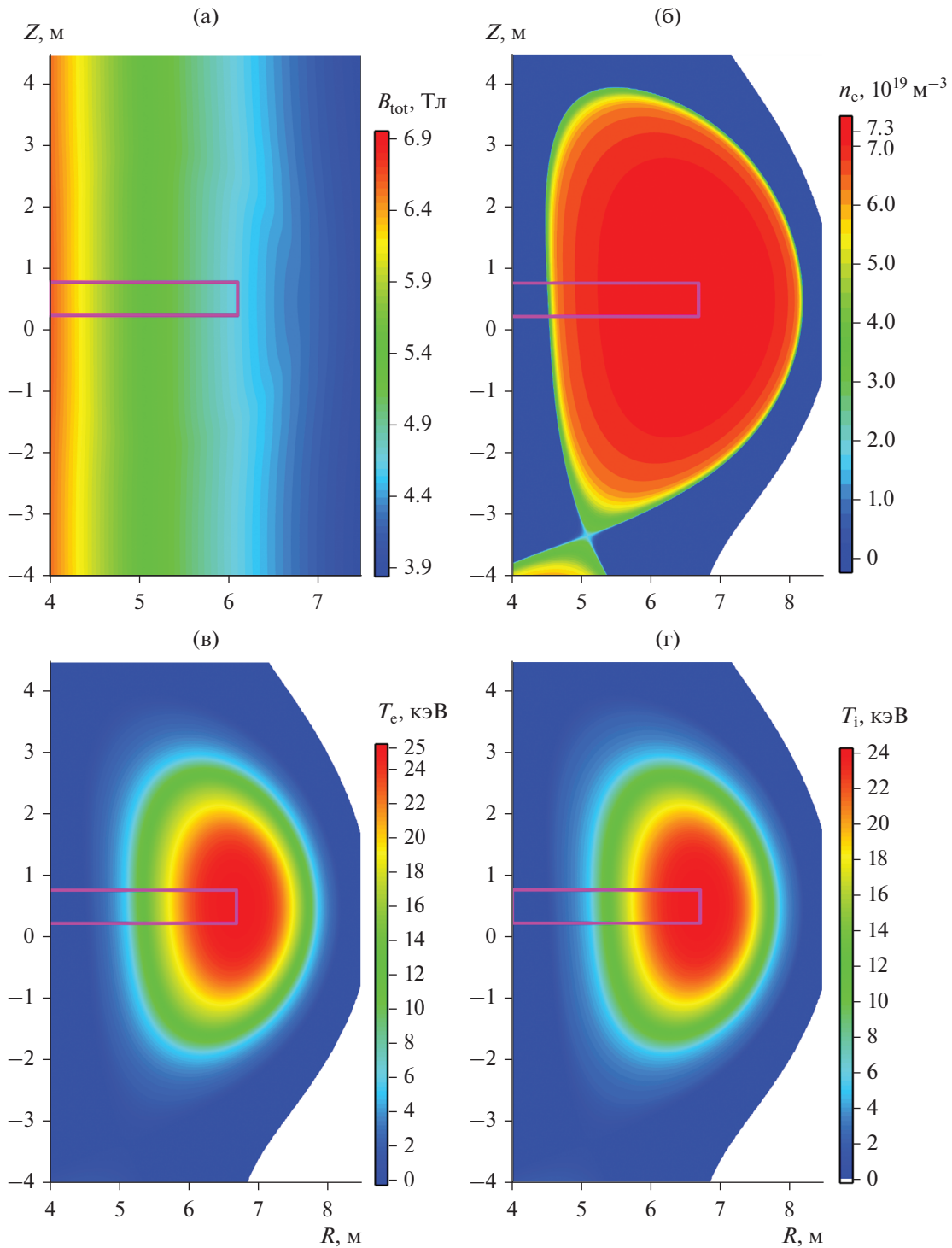
На рис. 4б показаны кросс-корреляции сигналов флуктуаций отраженных волн для флуктуаций ВВ с широким спектром на различных расстояниях. Видно, что в эксперименте спад когерентности при увеличении расстояния происходит значительно

медленнее, чем спад когерентности локальных флуктуаций плотности. Это связано с большим вкладом в сигнал флуктуаций, расположенных перед отражающим слоем в случае однополярных возмущений, что подтверждается результатами моделирования (треугольники). Видно хорошее соответствие модели и эксперимента. Таким образом, рефлектометрические измерения радиальных корреляционных длин флуктуаций могут значительно завышать ее величину из-за неизбежного интегрирования набег фазы по пути распространения волны, и это необходимо учитывать в экспериментах.

На рис. 4а приведены результаты моделирования для случая КК-возмущений. Они имели по радиусу полуширину 1.4 см. Видно, что и в этом случае экспериментальный спад когерентности сигналов рефлектометра с расстоянием между отражающими поверхностями происходит медленней, чем для локальных возмущений. Однако различие не столь велико, как для широкополосных флуктуаций. Это может быть связано с тем, что полуширина КК флуктуации в три раза больше, чем у ВВ. Модель в этом случае также показывает уширение кросс-корреляционной функции, но несколько в меньшей степени, чем в эксперименте.

### 3. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО УРОВНЯ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПЛОТНОСТИ В ИТЭР

Рефлектометрическая диагностика позволяет не только исследовать характеристики турбулентности, но и измерять профили плотности плазмы по малому радиусу тора токамака. Это возможно благодаря тому, что критические частоты отражения СВЧ-волн зависят от плотности плазмы. Поэтому, изменяя частоту излучаемого сигнала, можно зондировать различные плотности и, следовательно, разные радиусы плазмы. Однако наличие турбулентных флуктуаций плотности в плазме не только приводит к ухудшению термоизоляции плазмы, но и значительно ухудшает качество отраженного сигнала. Это происходит, когда вариация фазы отраженного сигнала от турбулентной плазмы становится больше  $2\pi$ . В этом случае возникают проблемы с определением фазы отраженной волны. Поэтому при разработке рефлектометрической диагностики для определения профиля плотности в установке ИТЭР возникла задача оценки влияния флуктуаций плотности на характеристики отраженного сигнала. С помощью экстраполяции характеристик флуктуаций, полученных на действующих установках меньшего размера, удалось оценить возможные уровни и размеры флуктуаций плотности в токамаке ИТЭР. В этой связи возникла задача оценить, насколько предполагаемые уровни турбулентности повлияют на

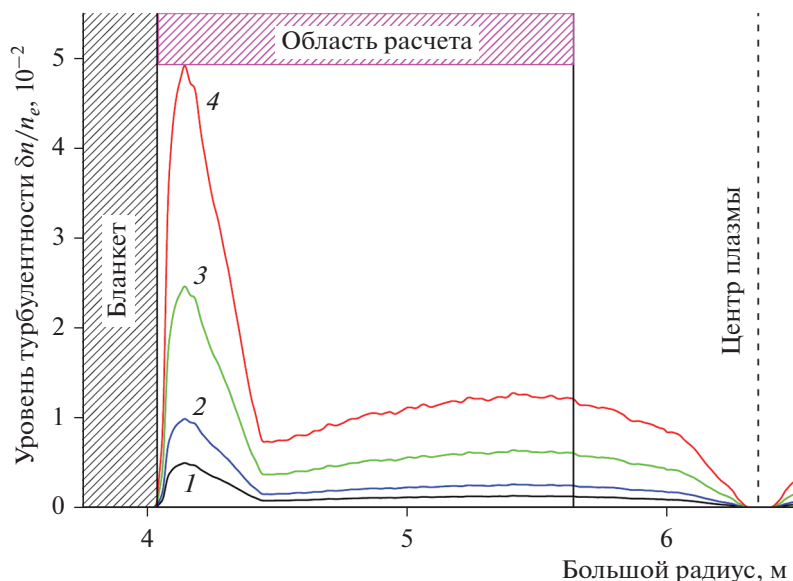


**Рис. 5.** Двумерное распределение полного магнитного поля (а), электронной плотности (б), электронной (в) и ионной (г) температур в сценарии разряда ИТЭР; прямоугольником обозначена область плазмы, использованная для расчетов.

возможность измерения профиля плотности в ИТЭР. Эта задача была решена с помощью моделирования с использованием кода “Tamic RtX Analyzer” для необыкновенной волны, на которой предполагается зондировать плазму с внут-

ренней стороны тора (со стороны сильного магнитного поля). На рис. 5 показаны расчетные распределения магнитного поля, плотности и температур ионов и электронов в тороидальном сечении плазменного шнура.





**Рис. 6.** Радиальное распределение уровня широкополосной турбулентности в ИТЭР, использованное при моделировании; средний относительный уровень турбулентности во внутренних областях плазмы соответствует 0.1% (1), 0.2% (2), 0.5% (3) и 1% (4).

Наиболее неблагоприятным режимом ИТЭР для диагностики является режим с плоским профилем плотности, поэтому расчеты были проведены именно для него. Расчет турбулентных полей проводили по методике, изложенной в разд. 2. Так как основной вклад во флуктуации электронной плотности вносит мелкомасштабная турбулентность, то при расчетах полей учитывались только широкополосные флуктуации. Моделирование было проведено для четырех уровней турбулентности. Распределения уровня турбулентности по радиусу ИТЭР приведены на рис. 6. Уровни относительных флуктуаций плотности в области радиусов  $r/a < 0.85$  составляли 0.1, 0.2, 0.5 и 1%.

Полные размеры счетного поля составляли  $1788 \times 560$  мм ( $4470 \times 1400$  узлов сетки) и требовали порядка 1.88 Гб оперативной памяти, что практически является предельным для существующей 32-битной версии кода TAMIC RtX Analyzer.

Так как основным методом измерения профиля предполагается анализ частоты биений принятого сигнала при быстром сканировании частоты излучающего генератора, то этот метод измерения был реализован и при моделировании. Поскольку код не допускает прямого изменения частоты, то оно достигалось использованием фазовой модуляции излучаемого сигнала, подобранной таким образом, чтобы обеспечить необходимое изменение частоты.

Было проведено моделирование отражения волн для диапазона частот Ku (10...18 ГГц), K (18...26 ГГц) и Ka (26...40 ГГц). Для уменьшения времени счета длительность скана частоты была

уменьшена в 5...10 раз по сравнению с используемой в существующих в настоящий момент рефлектометрах и составляла 1 мкс. Так как это время существенно превышает время распространения сигнала в системе от излучателя до отражающего слоя и обратно (около 50 нс), то результаты моделирования позволяют адекватно описать отражение сигнала в ИТЭР. Для приближения условий при моделировании к реальным измерениям при каждом уровне турбулентности были проведены расчеты на 10 статистически независимых турбулентных полях, а результаты измерений были усреднены. Для учета дифракционной расходимости волны в эксперименте по третьей координате (в тороидальном направлении) в каждой ячейке расчетной сетки было введено эквивалентное затухание. Расчет для одного уровня турбулентности требовал около 50 ч расчетного времени на рабочей станции с процессором Intel Pentium Xenon с тактовой частотой 2.4 ГГц.

На рис. 7 представлены усредненные по 10 сканам зависимости частоты биений от времени в ходе сканирования. Показаны результаты без турбулентности и с несколькими возрастающими ее уровнями. По результатам расчетов можно сделать два вывода.

Первый — при среднем уровне турбулентности в центральной части шнура менее 0.2% пик на частоте биений виден, что в принципе позволит проводить измерения профиля плотности во всем шнуре. При уровне турбулентности в центре около 0.5% (2.5% на периферии) проведение измерений возможно только на краю плазменного шнура, в

области  $r/a > 0.85$ . При уровне турбулентности в центре 1% (5% на периферии) проведение измерений невозможно.

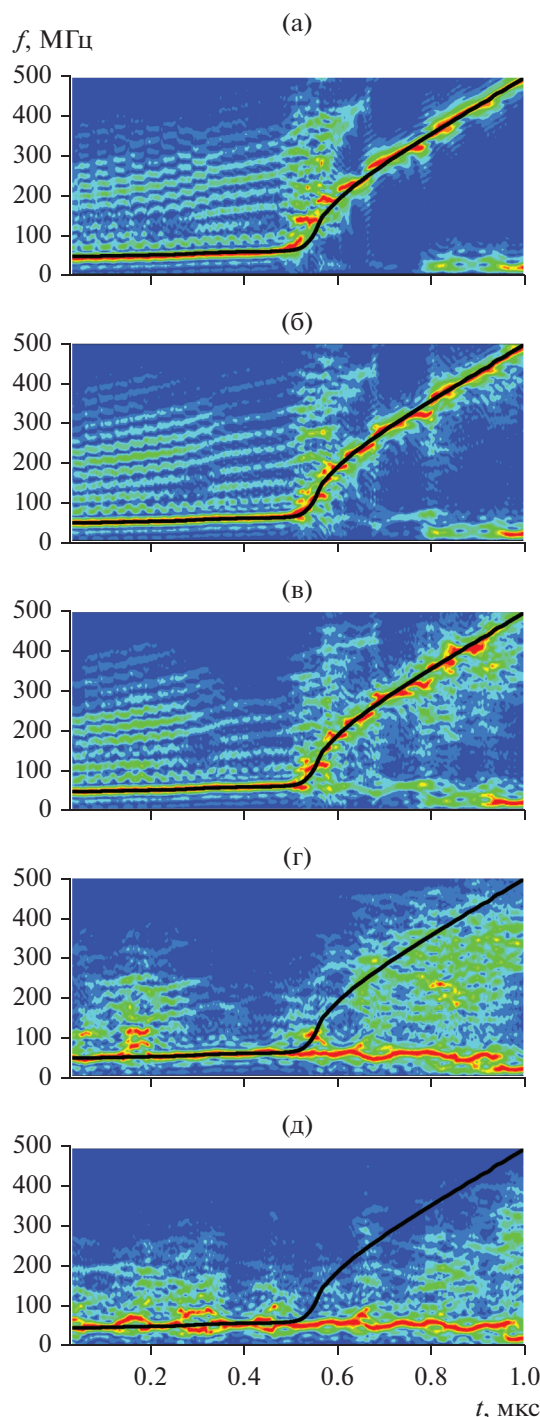
Второй – если проведение измерений возможно, то частота полученных биений близка к частоте биений, полученных в приближении одномерной геометрической оптики. Таким образом, если проведение измерений оказывается возможным, то амплитуда турбулентности не оказывает существенного влияния на результаты измерений, как это предсказывается рядом теоретических моделей.

#### 4. РАСЧЕТЫ ОТКЛИКА РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ АЛЬФВЕНОВСКИХ МОД В ИТЭР

Исследование условий возникновения и влияния тороидальных альфвеновских собственных мод (Toroidal Alfvén Eigen Modes, TAE) [28] на параметры термоядерной плазмы является одним из важных аспектов экспериментальной программы сооружаемого термоядерного реактора ИТЭР. Возникновение TAE-мод может приводит к увеличенным потерям быстрых частиц и существенно влиять на баланс энергии в термоядерной плазме [29]. Одним из инструментов для экспериментального исследования характеристик возмущений в центральной части является диагностика рефлектометрии со стороны сильного магнитного поля (High magnetic Field Side, HFS) [30]. Так как область наблюдения находится на стороне сильного магнитного поля, а диагностика чувствительна к возмущениям как электронной плотности, так и локального магнитного поля, то следует уделить особое внимание моделированию отклика диагностики на возмущения, связанные с TAE-модами в ИТЭР. Основная проблема, из-за которой было необходимо проведение двумерных полноволновых расчетов, состояла в определении пространственного разрешения по полоидальному углу при заданной геометрии антенн.

Для решения данной задачи были выполнены расчеты характеристик TAE-мод в базовых сценариях ИТЭР, включая временную и пространственную зависимости профилей возмущенной TAE-модой электронной плотности и магнитного поля. Расчеты пространственной структуры и временной эволюции характерных TAE-мод проведены с размерами пространственной сетки и временным шагом, позволяющим моделировать отражение СВЧ волны от плазмы со стороны сильного магнитного поля.

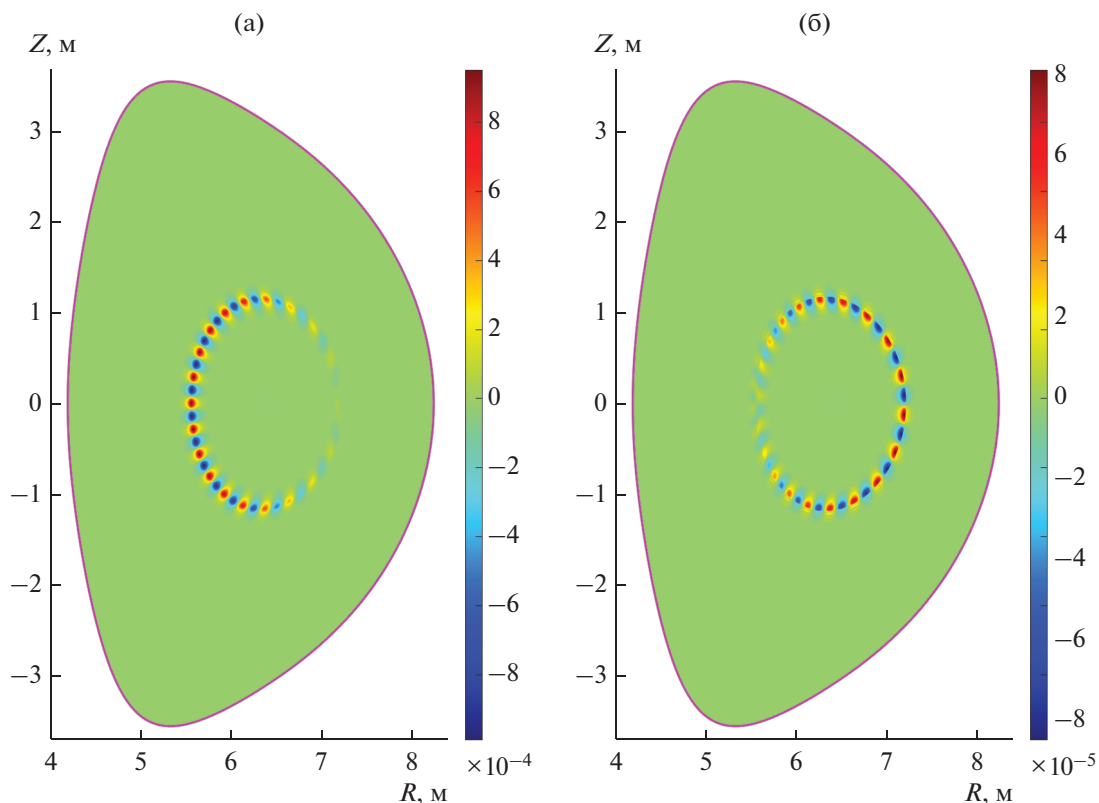
Результаты интерполяции электронной плотности, полученные с помощью кодов KINX/VENUS [32], возмущенной баллонной TAE модой с полоидальным индексом  $m = 20$  в момент времени  $t = 0$  приведены на рис. 8а. Максимальная ампли-



**Рис. 7.** Зависимости частоты биений от времени при  $\delta n/n = 0$  (а), 0.1 (б), 0.2 (в), 0.5 (г) и 1% (д); сплошной кривой показан ход во времени частоты биений, полученной в рамках модели одномерной геометрической оптики.

туда возмущения нормированной плотности плазмы  $\delta n/n \approx 8 \times 10^{-5}$ .

Результаты интерполяции магнитного поля, возмущенного баллонной TAE-модой с полои-



**Рис. 8.** Сечение плазмы ИТЭР с линиями уровня электронной плотности (а) и уровня магнитного поля (б), возмущенной баллонной ТАЕ-модой с полоидальным индексом  $m = 20$ .

дальным индексом  $m = 20$  в момент времени  $t = 0$ , приведены на рис. 8б. Максимальная амплитуда возмущения магнитного поля равна  $\delta B/B = 10^{-3}$ .

Моделирование работы диагностики HFS рефлектометрии проводили путем расчета распространения электромагнитной волны на возмущенном поле электронной плотности и магнитного поля с использованием двумерного полноволнового кода TAMIC RтX Analyzer. При генерации файлов задания для кода использовали невозмущенные распределения электронной плотности и магнитного поля, а также рассчитанные двумерные распределения возмущений.

На рис. 9 представлено распределение частоты нижней отсечки для необыкновенной волны для основного индуктивного сценария ИТЭР. Моделирование распространения электромагнитной волны было проведено в области от 4.0792 до 6.6112 м в радиальном направлении и от 0.2780 до 0.7780 м — в вертикальном направлении.

Поскольку возмущение вращается в полоидальном направлении и является периодическим, то для определения отклика отраженной волны достаточно создать двумерные поля возмущений для нескольких моментов в течение одного периода возмущения. Для всех рассчитанных полей

возмущений плотности  $n$  и магнитного поля  $B$  были подготовлены двумерные файлы диэлектрической проницаемости для кода TAMIC RтX analyzer. Расчет показал, что задача требует около 1.7 Гб оперативной памяти при постановке задачи (1.1 Гб при проведении расчета). Время счета для достижения стационарного распределения поля в счетной области составляет около 6 ч для процессора Inter Core i7 860 с тактовой частотой 2.8 ГГц. На рис. 10а и 10б представлены результаты расчетов: на рис. 10б величина относительного возмущения отраженного сигнала в зависимости от радиуса отражения и на рис. 10а радиальное распределение локального возмущения диэлектрической проницаемости, заложенное в модель. Видно, что радиальная локализация и ширина отклика рефлектометрии практически совпадает с локальным возмущением в модели. Для оценки зависимости чувствительности рефлектометрической диагностики ИТЭР к возмущениям с различным полоидальным номером  $m$  были проведены расчеты с вариацией числа  $m$ . На рис. 11 показаны результаты таких расчетов. Видно, что диагностика рефлектометрии при данной конфигурации антенн может регистрировать возмущения для ТАЕ-мод с полоидальными числами до  $m = 30$  без уменьшения чувствительности.

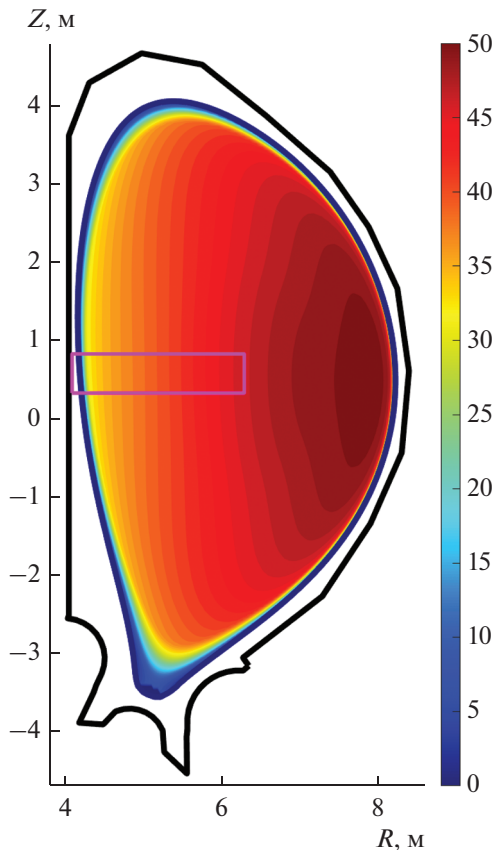


Рис. 9. Распределения поверхностей с одинаковой частоты нижней отсечки необыкновенной волны для основного индуктивного сценария ИТЭР; прямоугольником выделена расчетная область кода TAMIC RtX Analyzer.

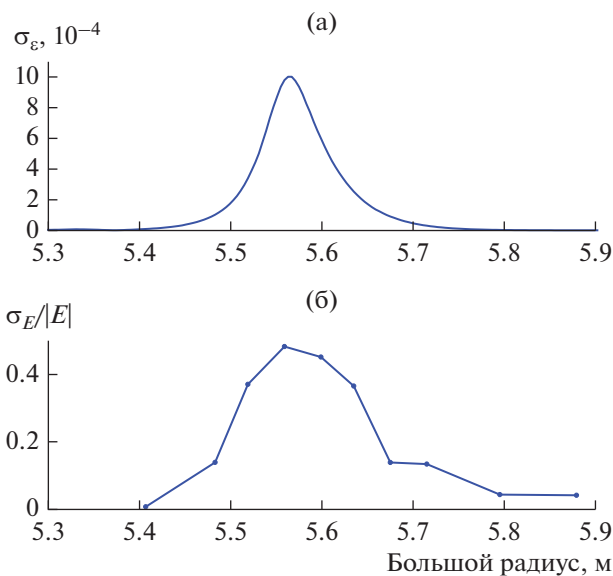


Рис. 10. Радиальные распределения возмущения ГАЕ-моды: а – локальное возмущение диэлектрической проницаемости; б – относительное возмущение сигнала отраженной волны.

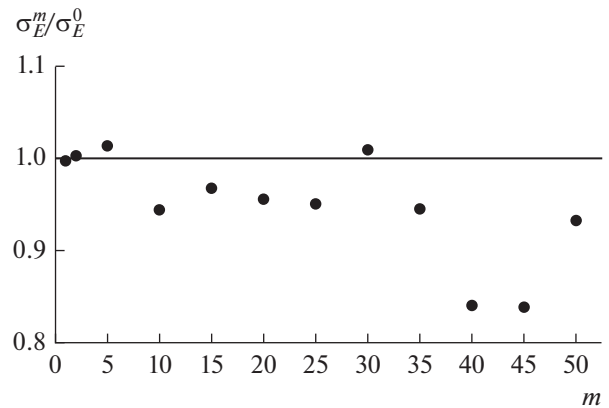


Рис. 11. Зависимость чувствительности рефлектометрической диагностики ИТЭР от полоидального номера  $m$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программные комплексы Tamic Rt-H и Tamic Rt-X являются примером программного обеспечения, разработанного в Российской Федерации на основе метода импедансного аналога электромагнитного пространства отечественной научной школы Б.В. Сестрорецкого. Дальнейшее развитие данного программного продукта должно включать такие этапы, как создание 64-битной версии программных комплексов для увеличения предельных размеров анализируемых областей и адаптации алгоритмов и исходных текстов для использования параллельных и векторных вычислений с целью увеличения скорости расчетов, интегрировать в составы программных комплексов счетные ядра, в которых используются квазистатические и геометрические приближения [31]. Причем данное развитие программных комплексов необходимо осуществлять с учетом развития цифровой электроники.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирнов С.В. Физические процессы в плазме токамака. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 393.
2. Aymar R., Barabaschi P., Shimomura Y. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. V. 44. P. 519.
3. Сестрорецкий Б.В. // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1976. Вып. 2. С. 113.
4. Сестрорецкий Б.В. // Межвуз. сб. науч. трудов "Машинное проектирование устройств и систем СВЧ". М.: МИРЭА, 1977. С. 127.
5. Сестрорецкий Б.В. // Вопр. Радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1983. Вып. 5. С. 56.

6. *Середов В.М.* // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1983. Вып. 5. С. 34.
7. *Сестрорецкий Б.В., Тищенко В.А.* // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1987. Вып. 11. С. 29.
8. *Сестрорецкий Б.В., Кустов В.Ю.* // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1988. Вып. 2. С. 3.
9. *Сестрорецкий Б.В., Кустов В.Ю., Шлепнев Ю.О.* // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1988. Вып. 12. С. 26.
10. *Кустов В.Ю.* Импедансная интерпретация метода конечных элементов для электродинамического анализа планарных волноводных устройств. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МФТИ, 1988. 210 с.
11. *Сестрорецкий Б.В., Зиновьев А.В.* // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1988. Вып.12. С. 43.
12. *Шлепнев Ю.О.* Применение метода прямых для математического моделирования планарных элементов интегральных схем СВЧ. Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск. НЭИС, 1990. 194 с.
13. *Сестрорецкий Б.В., Карцев И.Ю.* // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 1991. Вып. 1. С. 18.
14. *Карцев И.Ю.* Метод импедансно-сеточной функции Грина для решения двумерных задач дифракции. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1991. 138 с.
15. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В., Вершков В.А. и др.* Электродинамический анализ двумерных неоднородных сред и плазмы. М.: Макс Пресс, 2005.
16. *Климов К.Н.* Методология численного анализа во временной области двумерных импедансно-сеточных моделей антенных систем и электродинамических объектов большой размерности. Дис. ... док. техн. наук. М.: МИЭМ, 2007. 402 с.
17. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2001. Т. 46. № 1. С. 30.
18. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2001. Т. 46. № 3. С. 271.
19. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2001. Т. 46. № 4. С. 389.
20. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2001. Т. 46. № 6. С. 645.
21. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2001. Т. 46. № 9. С. 1048.
22. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2001. Т. 46. № 10. С. 1223.
23. *Камышев Т.В., Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2005. Т. 50. № 4. С. 415.
24. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2005. Т. 50. № 6. С. 647.
25. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2006. Т. 51. № 7. С. 773.
26. *Климов К.Н., Сестрорецкий Б.В.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 1. С. 5.
27. *Vershkov V.A., Shelukhin D.A., Soldatov S.V., Urazbaev A.O. et al.* // Nucl. Fusion. 2005. V. 45. № 10. P. S203.
28. *Pinches S.D., Champan I.T., Lauber Ph.W. et al.* // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. № 2. P. 021807.
29. *Fasoli A., Gormenzano C., Berk H.L. et al.* // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. № 6. P. S264.
30. *Вершков В.А., Шелухин Д.А., С.В. Солдатов и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 2. С. 54.
31. *Конов К.И., Климов К.Н.* // РЭ. 2022. Т. 67. № 8. С. 745.
32. *Исаев М. Ю., Медведев С.Ю., Купер Э.А.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 2. С. 1.