

## РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационния труд на тема  
**Определяне на потенциала на плазмата и ФРЕЕ в  
плазма за термоядрен синтез**  
на г-жа Ембие Юзеир Хасан-Тонева  
за получаване на образователната и научна степен *доктор*  
от проф. дфн Иван Желязков,  
член на Научното Жури по процедурата

**1. Актуалност на проблема.** Осъществяването на управляем термоядрен синтез в лабораторни условия е един от най-абсолютизирани проекти на нашето съвремие с оглед на осигуряване на нарастващите нужди от електрическа енергия от практически неизчерпаеми източници на “гориво” – изотопите на водорода деутерий и тритий. Надеждите за бързо осъществяване на този проект не се оправдаха. Основните причини са две: все още неовладяните плазмени неустойчивости и недостатъчно ефективните методи за донагриване (и удържане) на плазмата в термоядрения реактор (от тип токамак) за достигане на критичната стойност (съгласно критерия на Лоусън) на произведението концентрация на реагиращи частици×време на удържане при запалителната за конкретното гориво температура. Преодоляването на тези трудности е възможно единствено с обединените усилия на физици и инженери. Основният проблем при магнитното удържане на плазмата е загубата на частици поради възникването на плазмени неустойчивости в областта на граничния слой плазма–стена на реактора (Scrape-Off Layer, SOL), които водят до турбулизиране на плазмата и оттам пренос на частици и енергия към стените на камерата. За овладяването/контролирането на тези неустойчивости е необходимо осъществяването на подходящ режим на работа на реактора, какъвто е т.нар. Н-мод (high confinement mode). Във всеки реактор за получаване и поддържане на плазма основен проблем е диагностиката на създаваната йонизирана среда, по-конкретно надеждно определяне на концентрациите и температурите на заредените частици, както и техните функции на разпределение по енергии. Именно на диагностиката на пристенната високотемпературна плазма в токамака COMPASS в Института по физика на плазмата на Чехската Академия на Науките (ЧАН) в Прага е обект на дисертационния труд на г-жа Ембие Хасан-Тонева, чиято актуалност е извън всякакво съмнение.

**2. Съдържание и структура на дисертационния труд.** Дисертацията на Ембие Хасан-Тонева е по научната специалност *Физика на плазмата и газовия разряд* (шифър 01.03.16) от направление 4.1. *Физически науки* и отразява научните достижения на дисертанта при сондовата диагностика на пристенната плазма на токамака COMPASS при различни режими на работа, по-конкретно определяне на потенциала на плазмата и функцията на разпределение на електроните по енергия (ФРЕЕ).

Дисертационният труд се състои от Увод, 3 глави, Заключение, Справка за личните приноси на докторанта, Цитирана литература и Списък на публикациите по дисертацията. Той (дисертационният труд) съдържа 106 страници, 81 фигури (фиг. 9 в глава 1-ва е дублирана), 5 таблици и са цитирани 85 източника (в това число и интернет-страницата на Института по физика на плазмата на ЧАН за токамака COMPASS, отнасяща се до сондовия хоризонтален манипулатор за използване на възвратно-постъпателната сондова глава). Броят на публикациите,

върху които е написан дисертационният труд, е 7: две публикувани статии в списания с импакт фактор (*Contrib. Plasma Phys.* и *Plasma Phys. Control. Fusion*), трета статия, приета за публикуване в *J. Instrumentation.*, и 4 доклада от конференции, публикувани в пълен текст. Всички публикации са в съавторство, като в две от съвместните работи Ембие Хасан е пръв автор, в една е на второ място, в една на трето място, в две на четвърто място и в една – на шесто място; това ми позволява да заключа, че дисертантът е бил равностоен съавтор в съвместните публикации. Докладите от конференции са публикувани в материалите (Proceedings-ите) на редица международни научни форуми: 18th International Summer School on Vacuum, Electron, and Ion Technologies 2013 (1 публикация), 19th International Summer School on Vacuum, Electron, and Ion Technologies 2015 (1 публикация) и 7th International Workshop & Summer School on Plasma Physics 2016 (2 публикации).

В Увода е направен кратък исторически преглед на проблема за UTC, в който са включени основните реакции на синтез между деутерий и тритий и деутерий–деутерий, както и сеченията им като функция на енергията на деутериевите и тритиевите ядра. Условиата за осъществяване на синтез съгласно критерия на Лоусън са представени в таблица 1. Най-важна според мен е фиг. 4, на която е показано полоидалното D-образно сечение на термоядрен реактор от тип токамак със съответните основни повърхности, линии, слоеве, пресечната точка на сепаратрисата, както и контактните точки, в които сепаратрисата се допира до дайвертора. В Увода е формулирана целта на дисертацията и са изброени задачите, които следва да бъдат решени.

Първата глава е посветена на конструкцията и параметрите на токамака COMPASS, както и съпоставянето му с други сходни устройства. В това отношение са полезни фиг. 1.3 и таблица 1.1. Фигура 1.4 допълва (с повече подробности) фиг. 4 от Увода. Най-съществената част на тази глава се отнася за основните режими на горене на разряда: L- и H-мод, както и гранично локализираните модове (ELM) с подробно описание на техните цикли, класификации и еволюция. Оставам с впечатление, че докторантът е вникнал в същността на процесите – това особено важи за допълнителното нагряване на плазмата чрез инжектори на неутрални водородни/деутериеви снопове, чиито основни параметри са дадени в таблица 1.2. Особено внимание е обърнато на системата за контролиране на ELM модовете чрез резонансно-магнитни пертурбации, която е обект на изследванията на дисертанта. В края на главата са представени диагностичните устройства на токамака COMPASS, а именно: дайвертоната сондова система, сондовия хоризонтален манипулатор, т.нар. Wall-rip сонда за измерване потенциала на плазмата, както и измервателната сондова система. Този важен обзор е написан въз основа на 27 цитирани източници, което показва добрата информираност на докторанта по текущата сондова диагностика на термоядрена плазма.

Ако Уводът и Първата глава имат до известна степен описателен/илюстративен характер, същинският фундамент на сондовата диагностика на плазма в магнитно поле е подробно изложен във Втората глава на дисертационния труд. Веднага бих искал да отбележа, че сондовата диагностика на йонизирана среда, потопена в постоянно магнитно поле, не е тривиална както теоретичната, така и хардуерна задача. Наша национална гордост е, че именно екипът на доц. д-р Цвятко Попов, в чийто състав по време на докторантурата си г-жа Ембие Хасан-Тонева е била член, се справя с решаването на тази задача по възможно най-добрия начин. Самият факт, че Цвятковата диагностика се използва в редица термоядрени устройства, в това число и токамака COMPASS, потвърждава тази констатация. В главата под-

робно, с вникване в детайлите на различните варианти на този тип диагностика, включително кинетичния модел на електронния сондов ток в нелокално приближение и влиянието на магнитното поле върху сондовата характеристика, са представени две конвенционални техники (в три- и четири-параметрично приближение), като акцентът е върху метода на първата производна (МПП), който е основният диагностичен метод, използван от докторанта при експерименталните изследвания в токамака COMPASS. Като илюстрации са представени ампер-волтни характеристики за определяне на ФРЕЕ в дайверторната област на разряда на две сонди от 39-овия комплекс (сонди съответно с номера 12 и 15). В първия случай експерименталната функция на разпределение може да се апроксимира като права линия в полу-логаритмичен мащаб, което означава Максвелова ФРЕЕ с температура  $T_e = 8.5 \text{ eV}$  и концентрация на електроните (определена от условието за нормировка)  $n_e = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . Във втория случай са регистрирани две групи от електрони: нискоенергетични с електронна температура  $4 \text{ eV}$  и концентрация  $1.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  и високоенергетични с температура  $12 \text{ eV}$  и концентрация  $9.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  – типичен случай на би-Максуелова ФРЕЕ. Любопитно е да се отбележи, че и в двата случая потенциалът на плазмата е един и същ:  $U_{pl} = 45 \text{ V}$ . Тези данни са взети от публикация А1 от Списъка на публикациите по дисертацията.

Глава 3-та е основната глава в дисертационния труд на Ембие Хасан – в нея се съдържат проведени сондови измервания и интерпретация на получените данни от 5 самостоятелни експеримента при различни условия за създаване на плазмата. Първият е определяне на ФРЕЕ във водородна плазма по време на горене на разряда в L-мод при тороидално магнитно поле  $B_{tor} = 1.15 \text{ T}$  и средна концентрация на електроните  $\langle n_e \rangle = 6.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  за разряд #9009 (публикация А3). Изследвано е влиянието на плазмения ток върху параметрите на плазмата близо до дайвертора. Установено е, че при ток  $100 \text{ kA}$  ФРЕЕ е Максвелова с температури в интервала  $5\text{--}9 \text{ eV}$ . При нарастване на плазмения ток ФРЕЕ се променя, а именно появява се би-Максуелово разпределение около външната контактна точка на сепаратрисата с дайвертора. При по-високи стойности на  $I_{pl}$  би-Максуеловата ФРЕЕ се отмества към вътрешната част на дайвертора (фиг. 3.4). Полоидалното разпределение на концентрацията на електроните при различни стойности на  $I_{pl}$  ( $=100, 130, 150, 167$  и  $209 \text{ kA}$ ) е представено на фиг. 3.5(б). Заключение от анализа на данните е, че докато при  $I_{pl} = 100 \text{ kA}$  ФРЕЕ е Максвелова с температури в интервала  $5\text{--}9 \text{ eV}$ , при  $I_{pl}$  над  $210 \text{ kA}$  (разряд #9008, фиг. 3.7) ФРЕЕ около контактните точки може да бъде апроксимирана като би-Максуелово разпределение с ниско-енергетична група ( $4\text{--}5 \text{ eV}$ ) и високо-енергетична група ( $10\text{--}20 \text{ eV}$ ) електрони. При този експеримент е направено сравнение на получените параметри на плазмата с използването на две техники: конвенционалната 3-параметрична и МПП при  $I_{pl} = 130 \text{ kA}$  (фиг. 3.6). Установено е, че определената  $T_e$  чрез конвенционалната техника съответства на температурата на високо-енергетичната група от електрони в случая на би-Максуелова ФРЕЕ. Що се отнася до разпределението на плазмения потенциал, двете техники дават сходни резултати.

Вторият експеримент е фокусиран върху получаването на ФРЕЕ (а от нея и параметрите на термоядрената плазма) при допълнително нагряване на плазмата с инжектиране на неутрални атоми (NBI). Измерванията са проведени в деутериева плазма в режим на L-мод при D-образна форма на плазмата при  $I_{pl} = 180 \text{ kA}$  с промяна на средната концентрация на електроните в интервала от  $2.0 \times 10^{13}$  до  $8.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  (публикация А4). Сондовите характеристики са снети и обработени преди и по време на допълнителното нагряване с NBI при ток на снопа  $I_{beam} = 6 \text{ A}$

(фиг. 3.11). Установено е, че при увеличаване на  $\langle n_e \rangle$  стойността на плазмения потенциал намалява: от 70 eV при  $\langle n_e \rangle = 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  до 30 eV при  $\langle n_e \rangle = 8.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . При  $\langle n_e \rangle = 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  ФРЕЕ е би-Максуелова, която при  $\langle n_e \rangle = 6.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  в областта на силно магнитно поле и в областта между контактните точки се оказва Максвелова, а в областта на ниско магнитно поле е отново би-Максуелова. При по-силен снопов ток  $I_{\text{beam}} = 10 \text{ A}$ , на фиг. 3.13 са изобразени полоидалните разпределения на потенциала на изолираната сонда, плазмения потенциал, плътността на йонния ток на насищане за две стойности на  $\langle n_e \rangle$ , съответно равни на  $2.0 \times 10^{13}$  и на  $8.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , както и електронната температура при двете стойности на  $\langle n_e \rangle$ , преди и по време на NBI. Може да се каже, че допълнителното нагриване в дайверторната област на токамака при ниски стойности на тока на неутралния сноп ( $I_{\text{beam}} = 6$  и  $8 \text{ A}$ ) е незначително и се изразява с леко повишаване на плазмените параметри. Забележимо донагриване на електроните се наблюдава при  $I_{\text{beam}} = 10 \text{ A}$ , изразено с по-високи стойности на  $\langle n_e \rangle$ . От там се променя и видът на ФРЕЕ от Максвелова в би-Максуелова при  $\langle n_e \rangle = 8.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . При  $\langle n_e \rangle = 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , във вътрешната част на дайвертора и между контактните точки стойностите на  $\langle n_e \rangle$  намаляват, докато във външната част на дайвертора те почти не се променят преди и по време на NBI.

Третият експеримент се отнася за сондови измервания на параметрите на плазмата при прилагане на магнитно-резонансни пертурбации, чрез които може да се контролират гранично локализираните модове. Смекчаването на тези модове е необходимо условие за стабилно горене на магнитно-удържаната плазма. Последните достижения за подтискането на гранично локализираните модове може да се видят в редица статии, публикувани в *Nucl. Energy*, в които се дискутират различни модификации на метода на магнитно-резонансните пертурбации. Малко ме смущава обстоятелството, че в дисертационния труд на Ембие Хасан този метод се използва в режим на L-мод вместо на H-мод, но както се споменава в началото на раздел 3.3, подробно изследване на магнитно-резонансните пертурбации върху параметрите на плазмата на чехския токамак не са правени, което оправдава провеждането на експериментите при режим на L-мод в деутериева плазма с  $B_{\text{tor}} = 1.15 \text{ T}$  при стойности на  $I_{\text{pl}}$  от 170 до 230 kA при  $\langle n_e \rangle = 5.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  (публикация A5). По време на провежданите експерименти са използвани три режима на работа на дайверторните Ленгмюрови сонди, а именно: директно измерване на потенциала на изолираната сонда  $U_{\text{pl}}$ , на йонния ток на насищане  $I_{\text{sat}}$  (чрез прилагане на отрицателно напрежение от  $-100 \text{ V}$  или чрез прилагане на триъгълно напрежение от  $+50$  до  $-100 \text{ V}$ ) за снемане на ампер-волтните характеристики на сондата. На фигури 3.14(a) и 3.14(б) са представени двуразмерния профил на плаващия потенциал и неговия полоидален профил 50 ms след провеждане на изстрел при  $I_{\text{pl}} = 210 \text{ kA}$  и при ток от  $+3.5 \text{ kA}$  в намотките, предизвикващи магнитно-резонансните пертурбации (МРП). Поради асиметрия в профила на потенциала, по време на МРП се регистрира разцепване на профила при външната контактна точка (фиг. 3.15). Коментарите на изследванията, чиито резултати са представени на фигури 18–25, ще пропусна, но ще сумирам основните резултати, получени в този важен раздел, а именно: (i) Определената чрез МПП ФРЕЕ е би-Максуелова и не се променя под влиянието на МРП. (ii) При регистрираното разцепване на профила на плазмените параметри около външната контактна точка максимумите на високо-енергетичните електрони съответстват на минимумите на всички останали параметри. (iii) Ниско-енергетичната група от електрони от би-Максуеловото разпределение не е повлияна от прилагането на МРП (в нейния профил не е забелязано разцепване около

външната контактна точка) и има населеност близка до онази на високо-енергетичната група от електрони.

В четвъртия експеримент се сравняват плазмените параметри, получени чрез Ленгмюрови сонди (LP1 и LP2) и трите Ball-peg сонди (BPP), като работни газове са използвани водород и деутерий (публикации A2 и A6). За обработка на сигналите от Ленгмюровите сонди е използван МПП, а колекторът на дадена BPP се е поставял в такова положение, че при снемане на ампер-волтната характеристика йонният и електронният ток на насищане да са еднакви. В такъв случай потенциалът на изолираните сонди се оказва равен на плазмения потенциал. Като се предполага Максвелова ФРЕЕ, електронната температура се определя чрез разликата между  $U_{pl}$ , измерен с BPP, и потенциала на изолираната Ленгмюрова сонда, монтирани на една и съща сондова глава. Резултатите от измерванията, илюстрирани на фигури 3.29–3.31, показват, че при Максвелово разпределение електронните температури, получени от BPP и Ленгмюровата сонда, са близки по големина, докато при би-Максвелово разпределение стойностите на  $T_e$ , получени с BPP, съвпадат или са близки до температурата на високо-енергетичната електронна група.

Петият експеримент, проведен в дайверторната област на COMPASS-a при използване на NBI в режим на H-мод и при наличие на гранично локализиран модове (не е уточнено от кой тип са) при  $B_{tot} = 1.15$  T,  $I_{pl} = 220$  kA и  $\langle n_e \rangle = 5.5 \times 10^{13}$  cm<sup>-3</sup> (публикация A7), цели сравняване на МПП и конвенционалните техники при обработка на сметите ампер-волтни характеристики (фигури 3.33–3.41). Резултатите от това сравняване са представени на фиг. 3.42 и таблица 3.1. От таблицата се вижда, че МПП и 4-параметричното приближение дават сходни стойности за плазмения потенциал и йонния ток на насищане, както и за електронните температури на високо-енергетичните електрони. Разликата в концентрациите на електроните обаче е забележима. Данните от 3-параметричното приближение значително се отклоняват, давайки завишени стойности за всички параметри. Очевидно това приближение не е пригодно за диагностициране на термоядрена плазма. Тук имам един въпрос към дисертанта: “Правени ли са сравнения за получаваните с МПП плазмени параметри с други, не-сондови методи и ако отговорът е положителен, какви са разликите?”

От определените плазмени параметри е възможно да се пресметне плътността на мощността на паралелния топлинен поток в дайверторната област на токамака, както това е направено в раздел 3.6 (публикация A7). Резултатите са сумирани в таблица 3.2, от която се вижда значително отклонение на стойностите на този поток (в MW/m<sup>2</sup>), получени съответно от 3- и 4-параметричното приближения и чрез МПП, което демонстрира предимството на МПП като надежден метод за диагностика на термоядрена плазма.

Научните приноси в дисертационния труд (8 на брой) са представени в раздела ЗАКЛЮЧЕНИЕ по малко нестандартен начин (по серии експерименти) и те може да се характеризират като пробация на сондовите методи за диагностика на термоядрена плазма и обогатяване на знанията за сложните процеси на високотемпературната плазма в дайверторната област на токамака COMPASS. Тяхното (на приносите) представяне в СПИСЪКА НА ЛИЧНИТЕ ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАНТА не намирам за по-удачно.

Оставам с впечатлението, че г-жа Ембие Хасан-Тонева е физик със солидна експертиза по сондовите измервания на параметрите на термоядрена плазма, което е подкрепено и от уверението на д-р Мартин Хрон (ръководител на Департамента

Токамак в Института по физика на плазмата на ЧАН в Прага), че оценяването на плазмените потенциали и ФРЕЕ от сметите ампер–волтни характеристики и техният анализ и обсъждане са били направени от Ембие Хасан. Нещо повече, обстоятелството че тя е съавтор на три устни доклада и 10 постерни презентации на различни международни форуми, както и двукратното цитиране на публикация А1, говорят, че Ембие Хасан е разпознаваем изследовател сред плазмофизичната международна колегия.

Авторефератът отразява вярно съдържанието на дисертационния труд, но в него липсва дата и място на предзащитата, както и списък на Научното жури.

**3. Критични бележки на рецензента.** Впечатленията ми от дисертационния труд на г-жа Ембие Хасан-Тонева са много добри. Текстът не се чете с лекота поради сложната лексика, но забелязаните печатни и граматични грешки са малко. Имам някои пожелания за спазване на приетите в научната литература норми при писането на индекси. Какво имам предвид? Значителна част от индексите в дисертационния труд имат смисъл на етикети (labels) и те трябва да се пишат с прави (Roman) букви, а не с курсивни (italic) – това е правено само на изолирани места. Експоненциалната функция на Ойлер и операторът за диференциране се пишат с прави букви, съответно ‘e’ и ‘d’. Функцията ‘const’ в ур. (2.20) трябва да е с прави, а не с курсивни букви. Знакът/операторът за умножение навсякъде трябва да бъде ‘×’. Знакът за пропорционалност, използван на стр. 9, не е “~”, а ‘∝’. Разделителят между Чайлд и Ленгмюр (стр. 32) не трябва да бъде чертица, а тире (ndash), т.е. Чайлд–Ленгмюр. Знакът минус в степенните показатели не трябва да се набира със съответния знак на клавиатурата, а от Insert Symbol на Microsoft Word: напр.  $8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ .

**4. Заключение.** Като имам предвид сложния проблем (диагностициране на термоядрена плазма със сондова методика, от която се определят надеждни стойности на основните плазмени параметри: електронна температура, концентрация на частици и плазмен потенциал), с решаването на който дисертантът се е справил отлично, и научните резултати (съдържащи се в публикуваните статии и в дисертационния му труд), намерили отзвук в две цитирания, както и обстоятелството, че представената дисертация напълно удовлетворява приетите във Физическия факултет на СУ “Св. Климент Охридски” критерии за придобиване на научна степен, с удоволствие препоръчвам на уважаемите членове на Научното жури да гласуват за присъждане на образователната и научна степен **доктор** на г-жа Ембие Юзеир Хасан-Тонева.

София, март 2018 г.

Р е ц е н з е н т:

/проф. дфн Иван Желязков/