

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационния труд на тема
**Процеси в устройствата плазмен фокус и
техни практически приложения**
на г-н Станислав Христов Запрянов
за получаване на образователната и научна степен *доктор*
от проф. дфн Иван Желязков

1. Актуалност на проблема. Плазменият фокус (ПФ) в продължение на повече от четири десетилетия привлича вниманието на физици (експериментатори и теоретици) от петте континента на света. Основните конфигурации на ПФ са две: на Н. Филиппов от Курчатовския институт в Москва и на J. Mather от Los Alamos Scientific Laboratory на Калифорнийския университет в Лос Аламос, щата Ню Мексико. Двете устройства се различават по геометрията на електродите, по-точно по т.нар. анодно аспектно отношение – при ПФ на Филиппов то е много по-малко от единица, докато при този на Mather то е много по-голямо от единица. Още при своето създаване плазменият фокус е бил разглеждан като алтернатива на токамака за осъществяването на управляем термоядрен синтез – такава възможност е била широко дискутирана в средата на 70-те години на миналия век. През 90-те години на 20-я и началото на 21-я век се реактивира идеята за създаване на хибриден реактор на синтез и разпад (fusion–fission hybrid reactor), в който източникът/драйверът на неутрони да бъде плътна пинчова/плазмено-фокусна плазма (V. Zoita & S. Lungu, 2001, *NUKLEONIKA* **46**, S81). Техничко-икономически анализ за изграждането на хибриден ядрен реактор в комбинация с мощен ПФ като източник на термоядрени неутрони показва, че това е възможно при използването на плазмено-фокусни устройства с енергии десетки kJ (A. Clause et al., 2015, *J. Nucl. Energy* **78**, 10). Най-актуално от гледна точка на дисертационния труд е твърдението на Eric Lerner от Lawrenceville Plasma Physics, Inc. (Middlesex, NJ), че е възможно построяването на 5 MW-ова електроцентрала, основана на ПФ, в която като източник на енергия ще се използват продуктите от синтеза на водород и бор (E. J. Lerner et al., 2012, *Phys. Plasmas* **19**, 032704). Според Lerner прототипът на такава електроцентрала ще бъде готов в близките 12–18 месеца. От друга страна, ПФ е устройство, което намира широко приложение в много области на науката и технологиите: дефектоскопия, неутронна екография, микроелектронна литография, нанотехнологии, разработване на диагностични методи за термоядрени устройства, моделиране на процеси, протичащи в космическа плазма (сияния, черни дупки, квазари) и не на последно място – за обучението на студенти и докторанти по физика на високотемпературна плазма. Поради това актуалността на дисертационния труд на г-н Станислав Запрянов е неоспорима.

2. Съдържание на дисертационния труд. Дисертацията на г-н Станислав Запрянов е по научната специалност *Физика на плазмата и газовия разряд* (шифър 01.03.16) и отразява научните достижения на дисертанта при конструирането, диагностиката и приложението на ПФ за изследване на действието на високо енергетични плазмени и йонни потоци върху повърхостите на волфрам, молибден и неръждаема стомана, както и действието на импулсно рентгеново излъчване върху едноклетъчни водорасли и плесени. Дисертационният труд съдържа 165 страници, 101 фигури, 6 таблици и са цитирани 70 литературни източника в това число и 4 статии на дисертанта. В отделен списък са представени 5-те публикации (в съв-

торство), върху които е написан дисертационният труд. Списанията, в които са публикувани основните резултати от дисертацията, са: *Bulg. J. Phys.* (1 статия), *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* (1 статия), *Biotechnol. Biotec. Eq.* (1 статия), *Phys. Scr.* (1 статия) и *J. Phys.: Conf. Series.* (1 статия). В 4 публикации дисертантът е първи автор, което обстоятелство ми позволява да заключа, че резултатите, получени в дисертационния му труд, са преди всичко негово лично дело. Основните експериментални изследвания са докладвани на три международни конференции у нас.

Дисертационният труд се състои от 8 глави, от които последните четири са много кратки, и Библиографска справка (списък на цитираната литература). Глави 1-ва и 2-ра са включени във Въведение, в което се разглеждат различни типове пинчове и се прави исторически обзор на изследванията и устройствата, които имат отношение към възникването на плазмения фокус. Историческият преглед, отнасящ се преди всичко за различните видове инсталации за осъществяване на управляем термоядрен синтез (УТС), се чете с интерес, но смятам, че би могло да се споменат и някои от по-малогобаритните конкуренти на ITER-a – имам предвид устройствата на Tri Alpha Energy (Foothill Ranch, CA), Helion Energy (Redmond, WA), General Fusion Inc. (Burnaby, BC V3N 4T5 Canada). Инерциалният синтез също набира скорост (Hurricane et al., 2014, *Nature* **506**, 343), така че в близките години може да станем свидетели на успешно осъществен УТС. Към този исторически преглед дисертантът е включил и т.нар. “вакуумни искри,” предствляващи компактни източници на рентгеново излъчване и до голяма степен предшественици на плазмения фокус. Втората глава от Въведението е посветена на ПФ и тук веднага проличава високата ерудиция на г-н Запрянов при описание на принципите на действие, конструктивното изпълнение и развитието на разряда в двете геометрии на устройството. За мен най-голям интерес представлява базисният теоретичен модел на процесите в ПФ, който е изложен грамотно, с разбиране, но с някои недоглеждания и подвеждащи релации. Какво имам предвид? Докато в първата глава, където достатъчно подробно са описани различните пинчове въз основа на уравнения на електродинамиката, написани в SI, на стр. 39, в уравнението за движение на плазмен слой с височина z , изразът за магнитното налягане е написан в Гаусовата мерна система, както и редица уравнения по-нататък. Освен това в лявата страна на уравнението производението в скобите трябва да бъде mv , а не mr . На следващата страница, подобно уравнение съдържа грешни изрази от двете страни на знака за равенство; коректният запис (от гледна точка на еднаквост на размерностите) би трябвало да бъде $d(mv)/dt = -B^2 r^2/4$. Написаната на следващия ред формула за скоростта на светлината няма място в този контекст – тя е в сила само в SI. В случая просто трябва да се напише, че $c = 3 \times 10^{10}$ cm/s – това е стойността за скоростта на светлината във вакуум, която се използва в преводните коефициенти за преминаване от Гаусови към практични единици. Според мен дисертантът е трябвало да се погрижи да използва една мерна система в дисертационния си труд и най-удобна за целта е международната система от мерни единици. На стр. 45 уравнението за снегорина също съдържа грешки: в първия израз за магнитното налягане магнитната индукция трябва да бъде на квадрат, а вместо d/dt трябва да имаме d^2/dt^2 . Бих искал да попитам дисертанта каква повече информация се съдържа в 5-етапния снегоринен модел на Sing Lee (www.intimal.edu.my/school/fas/UFLF/, S. Lee & S. H. Saw, 2010, *Energies* **3**, 711), т.е. какво не се отчита, напр. в опростения три-етапен модел? Що се отнася до численото моделиране на ПФ, освен двуразмерните модели на В. Йорданов и М. Frignani, неотдавна се появи статия за пълна 3D симулация на плътна плазмено-фокусна плазма (В. Т. Meehan & J. H. J.

Niederhaus, 2014, *JDMS* doi: 10.1177/1548512914553144; *JDMS* е съкращение на *The Journal of Defense Modeling and Simulation Applications, Methodology, Technology*). Към текста за приложенията на ПФ и свойствата на генерираните от плазмени фокуси (с различни работни газове) неутрони, меки рентгенови лъчи, бързи йонни снопове и бързи плазмени струи, освен цитираните от дисертанта обзори, може да се добавят и двете неотдавнашни статии: М. Krishnan, 2012, *IEEE Plasma Sci.* **40**, 3189 и S. H. Saw & S. Lee, 2014, *Kathmandu Univ. J. Sci. Eng. Technol.* **10**, 42.

Същинската част на дисертационния труд на г-н Станислав Запрянов започва в глава трета, която е посветена на описанието на ПФ във Физическия факултет на Софийския университет “Св. Климент Охридски”. Дисертантът активно е участвал в изграждането на това най-голямо съоръжение за високотемпературна плазма у нас и затова бих искал да го попитам до каква степен параметрите на българския ПФ съответстват на онези, пресметнати по схемата, изложена от S. Goudarzi et al., 2014, *Int. J. Mod. Phys.: Conf. Series* **32**, 1460326, и използвана при конструирането на малък (съизмерим с нашия) ПФ SORENA-1 в Иран? Интересно е също така да се сравнят по параметри (и експлоатационни данни) сходните плазмени фокуси в две съседни на нас страни: Сърбия (V. Udovičić et al., 2014, *J. Mod. Phys.* **5**, 82) и Турция (A. Alaçakır et al., Sarayköy Nuclear Research and Training Center, fusion@taek.gov.tr).

В глава четвърта се излагат основните експерименти и резултати, получени както при тестването на самата система (публикация А5), така и при изследване действието на високоенергетични йонни и плазмени потоци върху повърхностите на конструкционни и облицовачни материали за термоядрени реактори, и при изследване влиянието на импулсно рентгеново лъчение върху живи организми. Силно впечатление ми прави детайлното описание на процедурите и инструментариума, с които са изследвани скоростите на токоплазменния слой при различни условия (публикация А1) – това обстоятелство ми дава основание да заключа, че дисертантът познава отлично възможностите на дадена измервателна конфигурация/операция, както и физичните процеси, които протичат в разряда. Изкушава ме мисълта да го попитам дали е запознат с т.нар. 7-turn “Idot” (dI/dt) coil mode на пояса на Роговски за по-точно измерване на разрядния ток в ПФ (S. Lee et al., 2011, *J. Fusion Energy* doi 10.1007/s10894-011-9456-6)? За големините на измерените скорости не се съмнявам, защото подобни скорости са регистрирани от други изследователи в устройства от подобен тип. Дисертантът прави сравнение на различни модели, които предсказват формата на токовия слой и движението му по време на втората фаза от разряда. Коя от 5-те криви, представени на фиг. 41, пасва най-добре на изучавания тук токоплазмен слой?

Интерес от практична гледна точка за облицовачните материали на термоядрени реактори са изследванията върху действието на мощни йонни потоци (при плътност 10^8 – 10^{10} W/cm² и време на взаимодействие 100–200 ns) върху горещо валцувана волфрамова ламарина и синтерован (с ориентирани зърна) волфрам. Резултатите (електромикроскопските снимки на фигури 54, 55 и 56) показват, че синтерованият волфрам би могъл да се използва като облицовачен материал. От друга страна, аналогични експерименти с лят молибден и съответните микроскопски снимки (фигури 57 и 58) дават основание на дисертанта да заключи, че молибденът показва по-високи якостни показатели от волфрама и е по-лесен за механична и термична обработка. С други думи, по-подходящ материал за облицовка, отколкото волфрама. При обстрелването на аустенитна хром-никелова неръждаема стомана с екстремно плътни плазмени и йонни потоци се оказва, че тя е достатъчно устойчива (не се напуква), но поради по-ниската й точка на топене (в сравнение с волфрама и молибдена) тя не е подходяща като вътрешен облицовачен материал (публикация А4).

Изследването на действието на рентгеновото излъчване на ПФ върху живи организми се предшества от изясняване на механизма на излъчване на лъчите, както и подробно описание на различни конструкции на ПФ, генериращи меко рентгеново излъчване. За регистрацията на самото лъчение е описано действието на три спектрографа, както и на сцинтилационния детектор, направен въз основа на ФЕУ TVP-56, производство на Philips (фигури 69 и 70). В серия от експерименти, проведени с живи организми: едноклетъчни водорасли и дрожди е изследвано влиянието на импулсно рентгеново излъчване върху оцеляемостта на дрождите и върху протичането на бързи процеси във фотосинтетичния апарат на едноклетъчните водорасли (публикация А2). Експериментите показват недвусмислено, че рентгеновото лъчение има силен ефект върху структурата и функционирането на фотосинтетичния апарат. В друга серия от експерименти е изследвано влиянието на облъчването със серии от къси рентгенови импулси върху синтеза на ендоглюконаза у плесените *Trichoderma reesei*-M7 (публикация А3). Рентгеновото лъчение е получавано от ПФ с работен газ аргон при налягане 0.8–0.9 torr и напрежение на кондензаторната батерия 18 kV. Погълнатите от спорите на плесента дози рентгеново лъчение са били в интервала 5–32000 mSv и тяхното влияние върху ензимната активност, пълния белтък и биомасата на 10-дневна култура, посята върху картофено-декстрозен агар, са показани в таблица 5 фиг. 91. Облъчването на спорова суспензия от същата култура с концентрация на спорите $5-7 \times 10^6$ CFU/ml (получени в солен разтвор) при същите условия показва (таблица 6 и фиг. 92) нарастване на ендоглюканазната активност (с 10–32%) и на пълния белтък (с 9–16%), но забележимо намаляване на сухата биомаса. Крайният резултат от тези експериментални изследвания е, че плесените *Trichoderma reesei*-M7 показват висока резистентност към действието на импулсно рентгеново излъчване, при което жизнеността на спорите остава практически непроменена дори при най-високата доза от 32 Sv.

В глава 4 се излагат и първите резултати от излъчване на неутрони от ПФ на ФзФ от деутерий–деутериева реакция при напрежения 20–22 kV и налягане на деутерия $(2-2.5) \times 10^{-3}$ torr. Първите резултати са насърчителни и отново ще попитам дисертанта дали параметрите на този ПФ са съпоставими (включително с оценъчните формули) с ПФ, конструиран в Университета в Багдат, но работещ при значително по-високо налягане (4 torr) (R. I. Morad et al., 2014, *J. Chem. Bio. Phy. Sci. Sec. C* 4, 2576).

Съдържателната част на дисертационния труд завършва с кратка глава (5-та) за различни приложения на ПФ, като неутронна радиография, неутронно определяне на рудите в минната промишленост, в микролитографията и в медицината за получаването (чрез инициирани от ПФ ядрени реакции) на краткоживущи изотопи, напр. ^{18}F и ^{15}O .

Основните приноси в дисертацията са формулирани в глава 6-та в 5 отделни параграфа. Смятам, че всички приноси са еднакво значими – те са получени благодарение на експерименталните умения (и физическа интуиция) на дисертанта при експлоатацията на съвременен плазмено-фокусното експериментално устройство от типа Mather, в създаването на което той е взимал активно участие.

Авторефератът отразява вярно съдържанието на дисертационния труд.

3. Критични бележки на рецензента. Впечатленията ми от дисертационния труд на г-н Запрянов са много добри. Текстът се чете с интерес. Забелязаните печатни, граматични и други грешки, които имат чисто технически характер, не намаляват стойността на този дисертационен труд. Бих препоръчал на дисертанта, в по-сетнешните си публикации от този вид да изостави някои остарели означения и когато ползва фигури (или таблици) от други източници, да ги цитира по подходящ начин; напр. за фигура, в края на надписа под фигурата, в скоби (репроду-

цирано/адаптирано от “автор/и, статия/книга”) – това изисква етиката в науката, а освен това улеснява читателя при четенето на авторския текст.

4. Лични впечатления на рецензента за дисертанта. Познавам г-н Станислав Запрянов още от студентските му години като дипломант на проф. дфн Александър Благоев и с интерес съм следял неговото развитие като талантлив физик-експериментатор. Нещо повече, той е един от малцината млади учени във Физическия факултет със завидна общофизична култура. Това съм забелязал при неговото участие в дискусии (или задаване на въпроси) на научни форуми. Не се съмнявам, че той ще заеме достойно място и сред международната плазмофизична колегия.

5. Заключение. Като имам предвид значимата научна стойност на получените експериментални резултати от дисертанта при изследване действието на мощни йонни и плазмени потоци, генерирани от ПФ, върху волфрам, молибден и аустенитна хром-никелова стомана, както и влиянието на мекото рентгеново лъчение върху живи организми, и не на последно място поддържането и диагностицирането на сложното експериментално устройство, убедено препоръчвам на уважаемите членове на Журито за провеждане на защитата на дисертационния труд да гласуват за присъждане на образователната и научна степен “доктор” на г-н Станислав Христов Запрянов.

София, февруари–март 2015 г.

Р е ц е н з е н т:

/проф. дфн Иван Желязков/