

СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ" ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

Станислав Христов Запрянов

ПРОЦЕСИ В УСТРОЙСТВАТА ПЛАЗМЕН ФОКУС И ТЕХНИ ПРАКТИЧЕСКИ ПРИЛОЖЕНИЯ

Научна специалност: 01.03.16 Физика на плазмата и газовия разряд

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен "доктор"

Научен ръководител:

проф. дфзн. Александър Благоев

Рецензенти:

.....

София, 2014 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита към от разширен научен семинар на катедра "Оптика и спектроскопия", присъединена към кат. "Астрономия, метеорология и геофизика" на Физическия Факултет на Софийския Университет "Св. Климент Охридски", състоял се на

Дисертантът бе редовен докторант към катедра "Оптика и спектроскопия" на Физическия Факултет на Софийския Университет "Св. Климент Охридски".

Данни за дисертационния труд:

- Брой страници 165;
- Брой фигури 101;
- Брой таблици 6;
- Брой цитирани литературни източници 70;
- Брой публикации във връзка с дисертационния труд 5.

Материали по защитата ще са на разположение в библиотеката на Физическия Факултет на Софийския Университет "Св. Климент Охридски", бул. "Джеймс Баучер" 5 и в

Глава 1. Увод. Плазменият фокус във Физическия Факултет на СУ

Дисертационният труд е написан така че да може произволен технически грамотен читател да съумее да се ориентира в историята, разпространението, значението и, до голяма степен, в съвременното състояние на изследванията, свързани с устройствата от типа плазмен фокус. Поради тази причина съдържа сравнително обстоен исторически обзор на по-важните изследвания, свързани с устройствата за термоядрен синтез и по-специално Z–пинч. Също така, наред с описанието на експериментите, проведени от самия дисертант, накратко са описани и експерименти на други автори, чиито резултати допълват мозайката от факти и заключения, превръщайки я в една сравнително цялостна картина. Работите, от които е почерпена информацията, са надлежно цитирани и посочени в библиографската справка в края. В настоящия автореферат е направено изложение единствено на резултатите от експериментите на самия дисертант под ръководството на ръководителя му.

Едни необходими, все пак, встъпителни думи, са следните: плазменият фокус е устройство със сравнително проста конструкция и същевременно с нетривиален принцип на действие. Основава се на явлението пинч, при което в разрядната камера се получава самосвиващо се плазмено образувание, поведението на което е обект на интензивни изследвания по света. Разработен е в опитите на хората да получат ядрен синтез в сравнително малоразмерно устройство, като това направление в експлоатацията му все още не е напълно изключено. Явява се интензивен импулсен източник на неутрони и Рентгенови лъчи, което в съчетание с простотата на конструкцията му предопределя разнообразните му приложения в различни области на науката и промишлеността. Плазменият фокус се е оказал удобен инструмент за изследване на множество важни явления и процеси, протичащи в плътната плазма, които трудно биха могли да бъдат наблюдавани в друго устройство или в наблюдаемата част от Природата.

Плазменият фокус в едноименната лаборатория във Физическия факултет на СУ представлява типичен представител на семейството на устройствата от този тип. Диапазонът от енергии при различните работни напрежения (капацитетът не може да се променя) е между около 2250 J и 4000 J. Определя се от простата формула за енергия в зареден капацитет CU^2

 $E = \frac{CU^2}{2}$. Капацитетът на нашето устройство е съставен от 4 кондензатора ИК-5-40

(производство на Серпуховския завод) с номинален капацитет не по-малък от 5 μ F и номинално напрежение 40 kV всеки. Така че общият капацитет е поне 20 μ F. Диапазонът от напрежения, при които се наблюдава устойчива работа и статистически малък разброс на характеристиките на разряда, наричаме работна област от напрежения и тя се простира между около 15 и 20 kV. Аналогично съществува и работна област от налягания на газовата смес в разрядната камера, намираща се между приблизителните стойности 1,3 и 1,7 mBar. Между наляганията и напреженията, при които устройството работи устойчиво съществува определена корелация, описана подробно в раздела за работната област в настоящата работа. Всеки от четирите кондензатора е свързан посредством осите на 12 високоволтови коаксиални кабела към първата плоча на вакуумен ключов разрядник и посредством ширмовките им е свързан към ширмовките на коаксиалните кабели на разрядната камера, свързани от тяхна страна с нейния корпус. Корпусът на разрядната камера е заземен съгласно изискванията за заземяване на високоволтова импулсна апаратура. Електрически с корпуса на разрядната камера съвпада и единия електрод (обикновено катод) на намиращата се вътре в нея електродна система.

Централният електрод (обикновено анод) посредством осите на 48 високоволтови коаксиални кабела е свързан към втората плоча на вакуумния ключов разрядник. Така че се формира електрически контур, който както се оказва, е и последователен колебателен RLC контур с включен в него разрядник и електродна система на ПФ. Иначе казано, нелинеен RLC контур. Употребата на толкова много коаксиални кабели е продиктувана от необходимостта да се намалят индуктивността и активното съпротивление на системата под определени критични области от стойности на тези величини, над които пинч не може да се получи поради "разливането" на електрическия разряден импулс по веригата (дисперсия, чист Фурие-ефект). Поради същата причина споменатите кондензатори имат специална конструкция, с която е постигната вътрешна индуктивност на всеки от тях, не надвишаваща 40 nH. Общата индуктивност на системата е между 120 и 200 nH. Електродната система (фиг. 22) е съставена от два електрода с изолатор между тях. Единият електрод се състои от 6 еднакви медни пръта с диаметър 8 mm и височина 180 mm, с оси еквидистантно разположени по мислена цилиндрична повърхнина с диаметър 70 mm. Другият електрод представлява куха медна тръба с външен диаметър 22 mm и ефективна височина 160 mm. Изолаторът представлява тръба от аморфен кварц с вътрешен диаметър 24 mm, външен диаметър 28 mm, ефективна височина 40 mm и гладка повърхност. Електродната система е строго симетрична и съосна с отклонение не повече от 1 mm. На върха на кухия централен електрод могат да се поставят метални тапи с различни геометрични форми и от различни метали, в зависимост от различните пространствени разпределения и добиви на твърди Рентгенови лъчи, които се желаят. Тези лъчи се получават при бомбардировката на съответната тапа с ускорените електрони от пинча.



Фиг. 1. Електродната система на ПФ във ФзФ - проектирана от Синг Ли.

Кондензаторите и разрядникът са разположени в екранираща метална кутия на колелца, като над тях, в съседно отделение на същата кутия се намира разрядната камера с електродната система. Корпусът на разрядната камера е галванично свързан с този на кутията, а той е заземен.

Подналягането (вакуумът) в разрядната камера се постига с помощта на вакуумна инсталация с ротационна форвакуумна и дифузионна високовакуумна помпи. Газовият режим на камерата се настройва с помощта на вентил за регулация на хидравличното съпротивление между камерата и входа на вакуумната инсталация, и иглен вентил за натичане на газ в камерата. Захранващият блок на нашия ПФ представлява прост високоволтов изправител с повишаващ трансформатор с регулируемо напрежение. Пускането му и зареждането на кондензаторите до желаното напрежение, както и аварийното им разреждане се осъществява ръчно.

Наскоро въпросният ПФ се сдоби и с възможност да работи на деутерий, което означава и с подходящи неутронни защити – нещо за което стана дума при описанието на неутронните експерименти.

Глава 2. Изследване магнитодинамиката на токоплазмения слой в ПФ

Тук ще изложим накратко само най-общите закономерности в поведението на плазмения токов слой, взаимодействащ със собственото си мощно магнитно поле. Колкото и различни да са конструкциите на Плазмения фокус от типове "Мадер" [4, 5], "Филипов" [1 и 2] и "Арзамас", и въпреки спецификата на движението на токовия плазмен слой във всеки от тях, общото помежду им е много и се изразява в следните наблюдаеми общи закономерности.

Първо, токовият слой се движи под действие на Лоренцовата сила и на силата, идваща от налягането на компресирания газ пред слоя. От балансът на тези сили зависи и характерът на движението. Както се оказва, у фокусите от тип "Мадер" двете сили ефективно се уравновесяват, което води до установяване на някаква равновесна скорост на придвижване на слоя в аксиалната фаза от развитието на разряда – нещо, което ние успяхме да потвърдим експериментално, както се вижда по-долу.

Второ, магнитното поле на слоя не е чисто азимутално, а вместо това, както изглежда [5], то е тороидално и има както азимутална, така и радиална и аксиална компонента.

И трето, поведението на токовия слой и движението му съществено се влияят от вида на работния газ (или смес), доколкото от това зависи масата на токовия слой, свиваемостта на газа и, съответно, характерните времена за протичане на процесите. Освен това, в някои случаи, както е наблюдавано в работа [6], при работа на някои газове е възможно формирането на вторични токови кръгове и по-сложен токов слой.

Нека първо разгледаме фактите, довели до формирането на теоретичните заключения, които ще изложим след това. Започваме с работа [7], в която е описан експериментът, който проведохме във ФзФ, за да установим как се движи токовият слой в аксиалната фаза.

Любопитството ни да проверим със собствени средства и съответни експерименти истинността на твърдението, че скоростта на движение на токоплазмения слой по време на аксиалната фаза е постоянна, беше до голяма степен удовлетворено от резултатите, показани по-долу. В самото начало на серията проведени опити направихме две намотки от "литцендрат" с по 5 навивки всяка и с диаметър около 2,5 mm, така че да се побират в едностранно затворена тънка стъклена тръбичка. Намотките бяха старателно импрегнирани и изолирани помежду си и монтирани в дъното на права стъклена тръбичка с вътрешен диаметър 4 mm. Изводите им бяха свързани през съгласуващи съпротивления и коаксиални кабели към осцилоскоп, съблюдавайки полярността на идващите сигнали да е една и съща. В резултат при изстрел бяха наблюдавани два взаимно отместени във времето отскока (пика) на сигнала. Този начален резултат беше окуражаващ с това, че се получи очакваното – при последователното преминаване на токовия слой през областите на двете намотки, разположени на разстояние 1 cm по направление на оста на електродната система, се получиха два последователни във времето сигнала, наблюдавани на съсседни канали на един и същи осцилоскоп. Тръбичката с намотките беше разположена съосно на електродната система, на равни разстояния от вътрешния и външния електроди.



Фиг. 2. Сонда, състояща се от 4 галванично разделени еквидистантни бобинки и съответния отклик (осцилограма).

На фигура 2 са показани елементи от следващ експеримент – на лявата снимка се вижда магнитна сонда, състояща се от четири галванично независими намотки, подобни на първите две, използвани при първите опити. Тези четири намотки също бяха разположени на по 1 ст една от друга последователно по права и монтирани в стъклената тръбичка. После, както и първите две (които заместиха), бяха разположени в пространството на аксиалната фаза между електродите на ПФ. Свързахме намотките през еднакви интегриращи RC-вериги към всичките четири канала на осцилоскопа и получихме сигналите, показани горе вдясно – с четири последователни отскока. На този етап все още не можехме да заключим със задоволителна сигурност от видяното, че скоростта на токоплазмения слой е постоянна по време на аксиална фаза: пиковете бяха доста "разляти" във времето, така че не можеше да се определи точно централното положение на всеки от тях – иначе казано, липсваше ни разделителна способност. Средната приблизителна стойност на скоростта на токоплазмения слой, която получихме, се оказа много близка до тази, която даде предишният опит с две намотки. Беше между 62 и 67 ст/цѕ (km/s) при същите работни параметри (налягане и напрежение).

Последва друг опит, със седем последователно свързани намотки с взаимно разстояние отново 1 см. Така от стъклената тръбичка излизаха само 2 извода, които през прост интегратор бяха свързани с един от каналите на осцилоскопа. Тръбичката беше вакуумно напълнена с минерално масло за по-добра изолация на намотките помежду им. На екрана на осцилоскопа се получи гребен от отскоци, при което обаче, не можеше да се твърди, че най-високото място на всеки от тях отговаря на точния момент на преминаване на слоя през областта на съответната намотка, тъй като откликът на всяка намотка беше частично насложен върху отклиците на съседните. Ето защо за да получим коректна оценка за разположението на всеки отскок по времевата права, моделирахме пиковете с функцията I(t,) следвайки методиката, описана в [8]:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R_{cicuit}}, U(t) = -A \frac{dB(t)}{dt}$$
 (A е ефективното сечение на всяка намотка),
$$B(t) = \mu_0 a(t) \int_0^{z_f} j_x (z - z_f, t) M \left[\frac{z_0 - z}{r(z)} \right] dz,$$
 където с *j* сме означили плътността на тока,

--/ \

предполагайки я непроменена от присъствието на сондата в слоя. Аксиалното разпределение на токовата плътност при това предположение е

 $j(z,t) = a(t)j_x(z)x$, представляващо непроменлив профил $j_x(z)$, модулиран с времезависима амплитуда a(t). И понеже профилът на плътността е неизвестен, амплитудата на тока може да бъде директно получена от сигнала от пояса на Роговски. Използваната от нас формула за еволюцията на магнитното поле в позицията на всяка бобинка B(t), е получена от Брузоне и др. в работа [9]. В нея z_f и z_0 са съответно разстоянията от върха на тръбичката на сондата до фронта на токовия слой и до съответната бобинка, както е показано на фиг. 3.



Фиг. 3. Схема на единична магнитна сонда.

Изразът за r(z) описва радиуса на "дупката", образувана от присъствието в токовия слой на стъклената тръбичка със сондите. Доколкото тръбичката е цилиндрична, тази функция е просто константа, а $M(\xi)$ има свойството:

$$M(\xi) = \frac{1}{\pi} \left[\cot^{-1}(\xi) - \frac{\xi}{1+\xi^2} \right], \quad -\infty \le \xi \le \infty, \text{ както е показал Малмберг [10]. Координатата}$$

 ξ съвпада с оста z и е в единици – радиусът на тръбичката на сондата. Така че според фигурата $\xi = (z_0 - z)/r(z)$. За полусферичен край на сондата с радиус R, както в нашия случай, имаме:

$$\boldsymbol{r}(\boldsymbol{z}) = \begin{cases} 0\\ \sqrt{2\boldsymbol{R}\boldsymbol{z} - \boldsymbol{z}^2} & \text{при} \end{cases} \begin{cases} \boldsymbol{z} \le 0\\ 0 < \boldsymbol{z} < \boldsymbol{R}\\ \boldsymbol{z} \ge \boldsymbol{R} \end{cases}$$

Като диференцираме по времето израза за еволюцията на магнитното поле и го заместим в този за еволюцията на напрежението в края на сондата, респ. на тока през нея, получаваме

следната връзка между разпределението на плътността на тока в токовия слой $j_x(z-z_f,t)$ и напрежението U(t):

$$\frac{\tilde{U(t)}}{a(t)} - \frac{\tilde{a(t)}}{a^2(t)} \int_0^t U(\tau) d\tau = \int_0^{z_f} j_x(z - z_f, t) \tilde{Mdz}, \text{ където } \tilde{a(t)} = \frac{da}{dt} \text{ и}$$
$$\tilde{U}(t) = \frac{U(t)}{\mu_0 A u} \text{ и } \tilde{M} = \frac{d}{dz} M \left[\frac{z_0 - z}{r(z)} \right].$$

Така полученият израз за напрежението в края на сондата е в сила докато амплитудата на тока е ненулева, т.е. след пробива и преди края на първия полупериод от разряда – т. е. по времето на аксиалната фаза, която ни интересува, изразът е коректен.

Така намерихме къде точно трябва да се намира всеки от максимумите, за да може при събирането на сигналите им да се получи гребен, съвпадащ със записа на осцилоскопа. Така започна да се изяснява, че скоростта на движение на слоя с голяма сигурност е постоянна – всеки следващ изстрел го потвърждаваше, а и резултатите ставаха статистически подостоверни. Освен това се убедихме, че тази сравнително постоянна (в рамките на неопределеността) скорост зависи съществено от работните параметри – налягането и напрежението в началото на процеса.



Фиг. 4. Сонда със 7 последователно свързани еквидистантни бобинки и съответният й отклик при преминаването на ТПС около нея.

Научихме и нещо ново за нашия $\Pi\Phi$ – че първият токов слой, краят на чието движение се "увенчава" с пинч, е последван от втори с обърната полярност на електродите, а той на свой ред – от трети, който е отново с изходната полярност. Наблюдавали сме най-много пет последователни токови слоя, след което процесът затихва подобно на осцилациите в колебателен контур. Пинч се наблюдава в края на движението на първия слой (както личи от особеността в сигнала на графиката на фиг. 4 – в случая двоен пинч) и по-рядко в края на

движението на втория слой, обикновено при съчетание от по-ниско налягане и по-високо напрежение спрямо оптималните. След третия полупериод пинч изобщо не сме наблюдавали. Беше установено, че вторият, третият и т.н. слоеве със знакопроменлива полярност са времево корелирани с кривата на тока, получена от пояса на Роговски и недвусмислено показваща работата на ПФ като нелинейна RLC верига със затихване и апериодични осцилации. Тези осцилации са нежелано явление – желанието на всеки, проектирал ПФ, е енергията в капацитета да се предаде на плазмата "от раз" и напълно, още през първия полупериод от развитието на разряда. На практика обаче, това трудно се постига. При което протичането на тока през плазмата е неизменно под формата на токоплазмен слой, който се движи с подчертано свръхзвукова скорост (Мах 200 е типична стойност) в разредения газ. Както стана реч, и както е лесно да се досети човек, от формата на отскока, получен от отделна намотка, поставена в областта на преминаване на слоя, може да се почерпи информация за пространственото разпределение на плътността на тока в осево направление. А от повече на брой намотки, последователно разположени на пътя му – и информация за еволюцията на това разпределение във времето. На фигура 26 е показано сравнение на сигнали от сондата със седем последователни намотки за различни условия на работа на ПФ – при по-големи напрежения и по-ниски налягания, както не е трудно да се предположи, слоят се движи по-бързо. Така например при 16 kV/1,5 mBar скоростта му е около 65 km/s, а при 17 kV/1,5 mBar и при 16 kV/1,3 mBar – около 70 km/s.



Фиг. 5. Сигнали от сондата със седем последователни намотки за различни условия на работа на ПФ.

Накрая, за да извлечем максимално подробна информация за движението на токоплазмения слой с помощта само на една сонда (в една тръбичка), приготвихме тръбичка от стъкло "Rassotherm" с външен диаметър 5 mm, задънена в единия край и извита така, че оста й винаги да сключва достатъчно голям ъгъл с токовия слой. В така направената тръбичка разположихме масив от 20 намотки, свързани както е показано на схемата долу. Всяка намотка има 20 навивки, с което постижимата разделителна способност беше увеличена значително (в сравнение с предишните намотки от по няколко навивки, чиято индуктивност е съизмерима с тази на съединителните проводници). За да намалим максимално взаимното влияние и наслагването на сигналите на последователно свързаните намотки, като същевременно използваме всичките четири канала на осцилоскопа, организирахме намотките по начина, показан на чертежа и на схемата на фиг. 6. А именно, те са 20 на брой, като с всеки канал на

осцилоскопа са свързани последователно 5 от тях, намиращи се на взаимно разстояние 4 ст. Всяка следваща от четирите 5-орки е отместена на 1 ст спрямо предната. Така е покрито разстояние от 20 ст с по една намотка на всеки сантиметър. А това разстояние е по-голямо от дължината на електродите, като по този начин може да се проследи цялата аксиална фаза в нашия ПФ. Долу вдясно се вижда блокът от интегриращи вериги.



Фиг. 6. 4-канален масив от магнитни сонди, специално създаден за изследване на аксиалното движение на ТПС по оста на електродната система.

На графиките на фиг. 7 са представени сигнали от описаната четириканална магнитна сонда с по 5 бобинки на канал. Ясно се вижда редуването във времето на отскоците, предизвикани от минаването на слоя през областите на последователните намотки. Анализирайки тези и още много други подобни сигнали, ние придобихме точна количествена представа за скоростите на токоплазмения слой в нашия ПФ при различните налягания и напрежения, като в добавък потвърдихме с голяма сигурност, че тази скорост е приблизително постоянна по време на аксиалната фаза на разряда.



Фиг. 7. Сигнали от четириканална магнитна сонда с по 5 бобинки на канал.

На всички тези графики (които де факто са и осцилограми, защото представляват изображения на записи от самия осцилоскоп) се виждат следните общи положения: Пробив (крайно ляво на всяка графика), последван от движение на слоя и двоен пинч в края на първия полуперод на тока. След това токът намалява до нула и полярността на електродите се сменя, като процесът на движение на слоя се повтаря за новата полярност, като токът тече наобратно. Въпреки това обаче, силите, които го тласкат, му действат в същата посока и той се движи като предишния, дори с почти същата скорост. Вижда се нарастването на тока в слоя по време на аксиалната фаза – всички намотки имат еднакъв брой навивки, а в края на аксиалната фаза, когато слоят се закривява, се наблюдава нарастване на отскоците. После отскоците отново намаляват поради това, че ъгълът, сключен между слоя и общата нормала на равнините на намотките започва да намалява – разрядът от аксиална фаза постепенно преминава в радиална, като слоят се деформира по известния начин.

Отново с помощта на магнитните сонди, поставени в електродната система установихме със собствен опит прочетеното в статия на Синг Ли [11] – а именно, че токовият слой всъщност

се състои от два подслоя, ако се разгледа разпределението на плътността на тока в него по направление на посоката му на движение. Това разпределение показва два близко разположени, но ясно различими максимума.



Фиг. 8 – положения на максимумите на сигналите, получени от четириканалната сонда във времето и пространството (по оста на електродната система). На различните изстрели, реализирани при различни работни условия, съответстват точки с различен цвят. Всяка точка съответства на максимума на напрежението, получено от съответната бобинка при преминаването на токовия слой около нея. Вижда се по-голямятя разхвърляност на точките в началото на процеса – непосредствено след пробива, когато токовият слой все още не е напълно формиран.



Фиг. 9 – интерполация на точките, съответстващи на всеки отделен изстрел (и означени с отделен цвят) с цел получаване на представа за средната скорост на движение на токоплазмения слой при различните реализации (условията, при които са проведени изстрелите, работният газ е азот) – например напрежение на заряд 17 kV и налягане на газа 1,7 mBar.

Експериментите, които проведохме с по-тежкия газ аргон показаха, че скоростта на токовия слой в този случай е по-ниска и целият процес е с по-голямо времетраене.

Глава 3. Изследване въздействието на високоенергичните плазмени и йонни потоци в ПФ върху повърхностите на конструкционни и вътрешни облицовъчни материали за термоядрени реактори

Във връзка с необходимостта от задоволяването на растящите енергийни потребности на света и същевременно осъзнаването на изчерпаемостта на традиционни енергийни източници като въглищата, природния газ и урановите руди, както и на ограничеността на енергийните добиви от възобновими източници като водата в реките и язовирите, вятъра и слънчевата светлина, по естествен начин възниква стремеж към усвояването на такъв обещаващ и изобилен енергоизточник като синтезът на леки ядра в по-тежки, като например на водородни в хелиеви. Традиционен подход в това направление, интензивно изучаван още от края на Втората световна война, е синтезът на деутериеви и тритиеви ядра в ядра на хелия, реализиран посредством приближаване до условията, при които в сеченията за такива реакции се наблюдават максимуми или поне разумно високи стойности. А това означава, при достатъчно големи относителни скорости на ядрата, при достатъчно чести удари помежду им (респ. достатъчна концентрация) и в продължение на достатъчно дълго време. От статистическа гл. т. това са необходимите

условия за реализиране на реакции на синтез. Така се получава, че се стремим към максимизиране на произведението от величините относителна скорост, концентрация и времетраене на процеса, което е и смисълът на критерия на Лоусон. Нещо повече, доколкото за създаването на подобни условия се изразходват значителни количества енергия, за да бъде оправдано получаването на енергия от масовия дефект при синтез, необходимо е пълната получена от процеса енергия да бъде поне равна или по-голяма от вложената. С което критерият придобива вид на неравенство, от едната страна на което стои споменатото произведение, а от другата – някаква критична стойност, константа, характерна за вида на ядрата, които ще се сливат.

Има няколко базисни подхода за доближаване до критерия на Лоусон. При първият от тях в газ с нужния изотопен състав (примерно деутерий или деутерий+тритиева смес) се пропуска силен ток, който едновременно уплътнява и нагрява по омов път получената плазма докато се реализират условия за термоядрен синтез (ТЯС). Устройства, реализиращи ТЯС са ТОКАМАК и различните видове пинч (Z-пинч, винтов пинч, θ-пинч, обратно-полеви пинч), между които са и първите, в които изобщо е бил наблюдаван синтез на леки ядра в тежки. Времето на удържане на плазмата при високи температура и плътност при тези устройства може да бъде значително, като при големи ТОКАМАК е от порядъка на минути.

Вторият подход е т. нар. инерциален синтез, при който се осъществява компресия на капсула, съдържаща сместа от реагентите. Тази компресия е многократна и изключително бързо протичаща, с което се постига едновременно високо уплътняване и адиабатно нагряване на сместа до екстремни стойности на температурата и концентрацията. За сметка на това, времето на удържане е кратко. Този подход е вдъхновен от експериментално наблюдаваните големи енергийни добиви при взривовете на водородни бомби.

И разбира се, третият подход е насоченото сблъскване на предварително ускорени до нужните енергии ядра, оформени като достатъчно добре фокусирани насрещни снопове или пък като сноп и неподвижна мишена. За целта се използват ускорители на заредени частици, но както се оказва, фокусирането на снопове от високоенергични частици с едноименен заряд до нужните за изгодно протичащ процес плътности, среща големи технически трудности. Ето защо този подход не се разглежда като енергийно изгоден.

Строят се реактори, основани на ТОКАМАК (ITER) и на инерциален синтез (NIF), локализирани съответно в Европа и в САЩ. Построяването на реакторите както от единия, така и от другия тип предизвика нужда от внедряването и довеждането до практическо съвършенство на цели класове от съвсем нови технологии, някои от които "проходиха" за пръв път при построяването на адронния колайдер в ЦЕРН. Такива са големите хелиеви свръхпроводящи магнити, полупроводникови детектори, устойчиви на мощни радиационни потоци, високотемпературни керамики с високи механични показатели в целия обхват от работни температури, безупречни и добре управляеми силови електронни захранващи устройства за магнитите, специални видове сонди, специални покрития и защити, ново поколение конструкционни материали, сред които аустенитната хром-никелова неръждаема стомана утвърди водещото си място и, разбира се, материали за облицовка на вътрешните стени на реакторите (т. нар. PFC, Plasma Facing Components, или материали за вътрешна облицовка (MBO)). И в двата базисни типа реактори, за които стана реч, към тези материали се предявяват еднотипни изисквания, свързани с безпрецедентно високите топлинни и радиационни натоварвания, на които те трябва да издържат без значително да се разпрашват и повреждат, доколкото подмяната им като консуматив е трудоемка и нецелесъобразна. Най-малко поради високата остатъчна и индуцирана (от неутронните потоци) радиоактивност в камерите на реакторите, подменянето им от хора е изключено. Дори за ITER е разработена специална роботизирана ръка, можеща да влезе през определен прозорец в камерата и да подмени определени вътрешни детайли.

Въпросните облицовъчни материали са подложени на изключително високи мощности на йонните, неутронните, плазмените и топлинно-фотонните потоци, породени в термоядрената плазма. Предвижда се ITER да бъде снабден с камера, изработена от аустенитна неръждаема стомана (като конструкционен материал), и облицована отвътре с берилиеви плочи и др. части, разделени помежду им с керамичен материал (титанов нитрид). Тези MBO ще бъдат подложени на въздействието на сравнително гореща пристенна плазма ($T_e = 10 \div 70 eV, n_e = 1 \times 10^{19} m^{-3}$), с топлинни потоци от порядъка на $0.4 \div 5 \text{ MW}/m^2$. На приблизително същите натоварвания ще бъдат подложени и някои огледала, намиращи се вътре в камерата, които се предвижда да бъдат изработени от молибден.

В дивертора на ITER електронните температури са доста по-ниски (от порядъка на единици eV, което води до много високи електронни плътности ($n_e \approx 1 \times 10^{21} m^{-3}$), а също и йонни потоци с плътности от порядъка на $10^{24} m^{-2} s^{-1}$, бомбардиращи повърхността на дивертора. Като типични диверторни материали в момента се разглеждат волфрамът (с всичките му технологични разновидности, различаващи се помежду им по начина на приготвяне, степента на легиране с други елементи и съединения и др.), графитът и въглеродно-нишковите композити (CFC, Carbon Fiber Composites, BHK) и др.

Освен на прякото въздействие на плазмата и йоните, тези материали ще бъдат подложени и на плътни потоци от бързи неутрони, които ще индуцират точкови дефекти в обемната им структура, правейки ги също така радиоактивни. Ефектът от тези повърхностни и обемни ефекти ще се трупа с времето, правейки неминуемо разрушението на материалите в даден момент. Идеята е времето, нужно на този процес да доведе материала до непригодност да бъде, разбира се, максимално удължено чрез рационалния избор на материалите.

Конструкционният материал – неръждаемата стомана, също ще бъде подложен на въздействието на интензивните потоци високоенергични неутрони (с типични енергии 14,1 и 2,45 MeV, съответстващи на реакциите D-T и D-D. От конструкционния материал се изисква да остава еластичен и в никакъв случай да не се оказва крехък в целия доста широк интервал от работни температури, при които ще работи. Окрехкостяващият ефект на неутроните, изразяващ се в предизвикване на дислокации на атоми в кристалните решетки, образуване на микромехури, пълни с водород в обема на материала, както се оказва [12], е приемливо малък, що се отнася до аустенитната неръждаема стомана (примерно марки 304, 316, 316L и др.).

Изобщо, желателно е всички MBO да запазват известна пластичност в целия работен температурен интервал. Основно изискване към материалите е да се разпрашват малко, да са по възможност от леки елементи, доколкото попадането на пари на тежки елементи в термоядрената плазма би я охладило и, също така, да имат отлична топлопроводимост, така щото в тях да не възникват екстремно големи термо-механични напрежения, заплашващи ги с разрушение. В този смисъл берилият, въглеродът, карбидите и дори титановите сплави и съединения са логичен избор. Само по отношение на волфрама и молибдена са направени изключения, които, както ще видим, не са съвсем неоснователни и са продиктувани от обективни техни положителни качества.

За отбелязване е, че в никое от наличните големи устройства от типа ТОКАМАК (вкл. JET, Tore Supra, TFTR, JT-60 и др.) не е възможно постигането на потоци от частици с подобни плътности. Ето защо, за изпитването на бъдещите MBO и симулиране в реалистични условия на

поведението им, се наложи използването на други типове устройства, имащи съсредоточено действие. Такива са различните видове ускорители, плазмени ускорители и оръдия, магнитоплазмените компресори и, разбира се, плазмените фокуси, представляващи предмет на настоящата работа и заемаши видно място в изследването на поведението на MBO при плътности на мощността на потоците дори по-високи от тези, които се очакват в найекстремалните аварийни условия при работата на ТЯР.

Нека, като начало, обърнем внимание на волфрама като предпочитан диверторен материал (наред с графита). Разбира се, всеизвестен факт е, че това е високотемпературен материал (т. на топене 3695 К), способен да издържа на високи, но не твърде бързо променящи се температури. Защо? Причината е в един негов недостатък, изразяващ се в сравнително ниската му температура на прекристализация (движеща се в интервала 1300 – 1500°С в зависимост от предварителната обработка). Под температурата на прекристализация чистият волфрам притежава изключително високи механични показатели (якост на опън, твърдост, жилавост, но само при условие, че е получен посредством топене с електронен лъч или ел. дъгов разряд. Синтерованият волфрам е крехък, доколкото представлява пресован спек от дребни волфрамови кристалчета с не особено здрави връзки помежду им – тук би била уместна една аналогия с талашита). Коефициентът му на топлинно разширение е, също така, уникално нисък при сравнение с други метали. Над температурния интервал на прекристализация, и особено над 1700°С търпи рязък спад на механичните характеристики, става значително по-крехък и се изостря анизотропното му поведение, свързано с поликристалната му структура. Оказва се [13], че механичните свойства дори на синтерования волфрам могат да бъдат задоволително подобрени с оглед употребата му като диверторен материал, чрез сплавяването и легирането му (например с ZrO₂, ThO₂, CeO₂, La₂O₃ и др., виж таблица 1). Цената на така постигнатото подобрение на механичните качества е известен спад в температурата на топене.

Name of material		Chemical composition (percentage by weight)		
W (pure)		> 99.97		
W-NS		60 - 65 ppm K		
WVM WVMW		30 - 70 ppm K 15 - 40 ppm K		
WC	WC20	2.0 % CeO ₂		
WL	WL10	1.0 % La ₂ O ₃		
	WL15	1.5 % La ₂ O ₃		
	WL20	2.0 % La ₂ O ₃		
WL-S		1.0 % La ₂ O ₃		
WLZ		2.5 % La2O3 / 0.07 % ZrO2		
	WT20	2.0 % ThO ₂		
WT	WVMT10	30 - 70 ppm K / 1.0 % ThO ₂		
	WVMWT	5 - 30 ppm K / 2.0 % ThO ₂		
WRe	WRe5	5.0 % Re		
	WRe26	26.0 % Re		
WCu		10 - 40 % Cu		
	DENSIMET®	1.5 % - 10 % Ni, Fe, Mo		
W-High-density tungsten- heavy metal alloys	INERMET®	5 % - 9.8 % Ni, Cu		
	DENAL®	2.5 % - 10 % Ni, Fe, Co		

Таблица 1. Типични материали, основани на волфрамови сплави, предлагани от фирмата Plansee, Австрия.

Ще разгледаме взаимодействието на волфрама с плазмата, получена в ПФ, доколкото тя притежава нужните качества за едно реалистично изпитание на този забележителен материал. Експериментално е установено, че са възможни, в общи линии, 3 основни режима на изпитване:

- 1) Имплантационен режим, характеризиращ се с плътности на плазмените потоци q от порядъка на $q \approx 10^5 \div 10^7 W/cm^2$;
- 2) Режим на откъсване, при който $q \approx 10^7 \div 10^8 W/cm^2$, при който повърхността на третирания материал е частично екранирана от струите гореща плазма посредством собствена, вторична плазма, и
- 3) Режим на разрушение, при който $q \approx 10^8 \div 10^{12} W/cm^2$. В този последен случай струите гореща плазма и потоците от бързи йони действат заедно, нанасяйки значителни щети на повърхността на материала.

Всеки един от тези три режима може да бъде реализиран в един и същи ПФ, като се променя разстоянието между третираната повърхност и областта на пинча (обикновено образците от изследвания материал се фиксират над анода, така че се регулира разстоянието образец – анод, а на образеца му действат положителните йони, излитащи от пинча в посока, противоположна на анода). На фиг. 10 е показана схема, даваща приблизителна представа за въздействието на плазмата и йонните потоци върху мишена, разположена в камерата на ПФ.



Фиг. 10. Режимът на обстрел на образец в камерата на ПФ зависи от това къде ще бъде поставен той – по този начин може да се избере такова разстояние (по оста z) от областта на пинча, на което условията при обстрел удовлетворяват целите на конкретния тест.

За целите на експеримента, провеждан в лабораторията "плазмен фокус" във физическия факултет, беше изработен прибор, позволяващ настройката на вертикалното положение на образеца над пинча без отваряне на камерата. Действието му се основава на потоковото сцепване на вградени неодимови магнити през стените на стъклена тръба (фиг. 11 и 12). Вътрешната му част е подвижна както ротационно, така и аксиално, с помощта на резба с канал за улесняване на изпомпването. В края си тя завършва с щипка, захващаща образеца или държача му.



Фиг. 11 и 12. Устройство, позволяващо безконтактно аксиално преместване на държача на образците във вакуум и при ниско налягане.

По този начин се оказа възможно променянето на режима на облъчване на образците без отваряне на камерата. Смяната им също беше улеснена, доколкото въпросният прибор се прикрепва с т. нар. бърза вакуумна връзка.

За постигане на максимално реалистични условия при тест на образците, като работен газ беше избран деутерий при работно налягане в диапазона 2,5...4,0 Тогг. В качеството на контролен неутронен детектор, над камерата беше поставен стинтилационен детектор, състоящ се от ФЕУ TVP-56 (Phillips), пластмасов сцинтилатор и забавител и тънка сребърна пластина от сребро с висока чистота. Разбира се, камерата беше снабдена и с всестранна защита на персонала от неутрони, оформяща около нея куб с дебелина на стените 50 мм. За елеминиране на вероятността детекторът да регистрира рентгеновото лъчение от пинча, между последния и детектора беше поставена оловна плоча с дебелина 50 мм. Въпреки това беше регистриран пик, съвсем явно с неутронен произход (фиг. 13).

Бяха направени серия от предварителни изстрели, уточняващи разстоянията, на които в нашия конкретен случай се реализират 3-те режима на взаимодействие на плазмата и йонните потоци с повърхността на волфрамов образец. За целта бяха изрязани кръгли парчета от синтерована волфрамова ламарина и закрепени за държача вътре в камерата на ПФ, както е показано на фиг. 14. На фигурата се виждат и пораженията, понесени от материала в централната област на кръга.



Фиг. 13. Осцилограма на сигнала от неутронния детектор.



Фиг. 14. Постановка на експеримента по обстрел на образци от материали за ВО. Бяха използвани няколко основни способа на закрепване – с щипки, със залепване, с притягане към топлоотвеждащ масивен метален предмет и с пластмасов "камертон".

Представа за разходимостта на плазмената струя над областта на пинча може да се придобие от фиг. 15, получена в резултат на експеримент с поставяне на вертикално разположено квадратно парче волфрамова ламарина над анода.



Фиг. 15. Типични поражения по образци от синтерована волфрамова ламарина, разположена съответно копланарно и напречно на оста на пинча.

Ако предположим (а това е, в известен смисъл, добро приближение), че областта на пинча е точков източник, то ъгълът на разходимост на струята може да бъде оценен на около 20...25 дъгови градуса. Следите, оставени от взаимодействието на плазмената струя с волфрамовата повърхност в случая са полезни за визуализирането на този факт.

В процеса на експериментиране срещнахме тази трудност, че по време на обстрела на образците разпрашен метал от електродната система, разлитащ се из цялата камера, полепваше по интересуващите ни повърхности и маскираше търсените ефекти. Особено неприятна в това отношение беше медта, доколкото и анодът, и катодът бяха изцяло медни. Така се наложи да видоизменим електродната система, снабдявайки я с неръждаеми катодни пръти и неръждаема анодна тапа, в един от вариантите направена разглобяема и със сменяема волфрамова вложка (фиг. 16). При експериментите с кух анод от полза се оказа покриването както на вътрешната , така и на външната анодни повърхности с тънко волфрамово фолио. С това разпрашването беше драстично намалено. Освен това, за пълното му елиминиране се наложи и облицовка на катода с волфрамова ламарина, прилепваща плътно по прътите отвътре (фиг. 17).



Фиг. 16 и 17. Електродна система, облицована с волфрам с цел намаляване разпрашването и маскирането на пораженията по образците с разпрашен материал.

Яви се и тази допълнителна неприятност, че на всеки средно 50...60 изстрела (при пълен енергозапас) все пак се налагаше да се подменят въпросните защитни волфрамови фолиа.

Същинските волфрамови образци, които трябваше да бъдат изследвани, бяха приготвени по специална технология, с ориентирани кристални зърна, от австрийската фирма Plansee. Те бяха с размери 10 x 10 x 4,5 мм. Освен това беше изследвано поведението на синтерован волфрамов прокат (ламарина с дебелина 0,2 мм.), образци от лят молибден с размери 18 x 18 x 5 мм и аустенитна хром-никелова неръждаема стомана във вид на образци с размери 20 x 20 x 1 мм. От всеки от посочените материали бяха получени или изработени по 4 екземпляра. Как се представиха тези материали в условия на плазмен обстрел, е видно от долните снимки. Така например, на фиг. 18 може да бъде видяно сравнение в пораженията, настъпили по повърхностите съответно на кристално-ориентирания (лявата снимка) и на валцования синтерован волфрам (дясната). И двата образеца са облъчени при еднакви условия, а именно при налягане 3,3 mBarr D2, при напрежение на заряд на кондензаторите 22kV и 2 последователни изстрела.



Фиг. 18. Оптични микроскопски снимки на повърхностите на образци от синтерован и кристално-ориентиран волфрам.

На височина около 40 мм. над върха на анода по груба оценка плътността на потока на мощността варира между $q \approx 10^8 \div 10^{10}$ W/cm² [14], при време на взаимодействие от порядъка на 100÷200 ns. При такава плътност на потока на мощността дори такова съвсем кратко време се оказва достатъчно за частичното разтапяне на повърхностния слой. В работа [15] е показано, че средната дълбочина на получената при това течна фаза достига около 1,3 µm на 130-тата наносекунда от действието на потока от бързи йони и плазмата върху повърхността на мишената (в случая, образеца). В следващите 100÷150 ns тази течна фаза се охлажда и отново кристализира. Тази кристализация обаче, протича при извънредно висок температурен градиент (до 10^5 K/cm, съществуващ в обема на материала до дълбочина около 10 и повече микрометра. Именно този голям градиент поражда механични напрежения, каквито материалът обикновено не е в състояние да издържи. Когато процесът се повтаря неколкократно, повърхността на материала се покрива с мрежа от по-големи и по-малки пукнатини, често водещи началото си от по-големите. След обстрелването на металните образци, те бяха внимателно изследвани с помощта на оптичен и сканиращ електронен микраскопи при различни увеличения, осветления и напрежения.

Фигура 19 илюстрира състоянието на повърхността на образец от волфрам с ориентирани кристали, обстрелян с продуктите на поредица разряди в ПФ, завършили с пинч. Изстрелите са 35 на брой, увеличението е 100 пъти, напрежението на заряд – 25 kV, налягането на деутерия – 3.3 mBar. Очевидно повърхността е силно оплавена.



Фиг. 19. Оптична микроскопска снимка на образец от волфрам с ориентирани кристални зърна, обстрелян с 35 изстрела в деутериева атмосфера, при налягане 2,5 Torr, напрежение на заряд 25 kV, на 6 см. от пинча. Линейно увеличение 100 пъти.

И не е само покрита с пукнатини и хидриди на волфрама, но и значително деформирана от многобройните цикли на частично разтапяне и рекристализация.

Изследването на щетите, понесени от образеца като функция от броя изстрели, работния газ (или смес), отдалечеността от областта на пинча и т. н. дава възможността да се предскаже със задоволителна увереност това доколко е подходящ съответният материалза приложения, в които от него се изисква да понася високи топлинни натоварвания и плътни потоци от неутрони и заредени частици, както и да се дефинират границите на тези велечини, отвъд които разрушението на материала става неизбежно.

Технологията на волфрама е от голямо значение за приложимостта му, имайки предвид гореизложеното. Така например, не е маловажно дали е лят, синтерован, горещо валцован, кристално-ориентиран, легиран, сплавен или приготвен по друг някакъв начин.

Идеята на кристалното ориентиране (съосно ориентирани кристални зърна) с последващо отрязване на материала тока, щото повърхността, срещаща плазмата да се окаже перпендикулярна на осите на кристалите е проста – доколкото пукнатините, за които стана дума, имат склонност да се развиват с по-голяма лекота по кристалните граници и същевременно не е желателно отделянето на парчета и прашинки от материала, една такава ориентация на кристалните зърна позволява пукнатините да се развиват много по-дълго време и да станат много по-дълбоки, преди да се стигне до отчупване на парче, сравнено с другите случаи.

Друг метод за борба с отчупването на прашинки и люспи е легирането с изброените погоре вещества, като например с около 1% двулантанов триокис (La_2O_3). Такива легирани волфрами носят технологичното наименование WL с последващо го число, означаващо промилното съдържание на легиращата добавка (в сл. WL10). При относително неголеми плътности на потоците от плазмени продукти, сравнителният анализ на повърхностните поражения у чистия волфрам и у WL10 показва, че микрограпавостта, характеризираща макроскопичните щети (с характерни размери от порядъка на 10÷100 µm и дълбочина (амплитуда) 0,1÷10 µm) е една и съща и в двата случая (в рамките на грешката) [13]. С увеличаването на броя изстрели микрограпавостта, както се оказва, не нараства. Въпреки всичко, обаче, характерните размери на макроскопичните щети у WL10 се оказват по-големи от съответните при чистия волфрам. Това се дължи на различната природа на пораженията в двата случая, които сравняваме: у WL10 преобладават блистери (мехуроподобни втвърдени образувания по повърхността, наподобяващи опаковките на някои медикаменти и поради тази причина носещи същото име), разпрашени участъци и вълнисти структури, докато при чистия волфрам се явява мрежа от микропукнатини.

След обстрел с мощни изстрели, повърхността на W се оказва по-силно поразена. Но освен това, докато при WL10 щетите са еднотипни при всички режими и мощности на обстрел, у W се явяват и кратери при по-високите мощности, а вълнистите структури се оказват постохастични. На това основание може да се заключи, че легирането на волфрама с лантанов окис спомага за редуцирането на дефекти с остри ръбове и краища (като кратери и пукнатини), които заплашват с откъсване на едри прашинки, люспи и капки от повърхността. Това донякъде може да се обясни с по-ниската температура на топене на лантановия окис - La₂O₃ се топи и изпарява от повърхностния слой, но също така и дифундира в него. Разбира се, този процес се нуждае от уточняващи изследвания. Типични повърхнинни поражения у образец от WL10 са видни на фиг. 20.



Фиг. 20. Електронномикроскопски снимки на поразените повърхности на образци от WL10.

Предварителни изследвания на микротвърдостта (локалната твърдост) на напречни сечения на образците (с цел да се види как се изменя локалната твърдост в дълбочина по отношение на поразената повърхност) показват [13,16], че след обстрел твърдостта на повърхностния слой се оказва по-висока, а в дълбочина следва бърз спад на твърдостта, при което слоят с понижена твърдост е сравнително дебел. Причината плиткият повърхностен слой да е с по-висока твърдост от по-долните е, по всяка вероятност, много бързата кристализация, последваща разтапянето на въпросния слой. Формират се структури с многобройни дребни кристали, подобни на игли, сочещи отвън навътре в обема на материала – аналогично на повърхностната закалка при някои метали и сплави.

Мощните изстрели довеждат до флуктуации в микротвърдостта, които могат да бъдат, с известно основание, свързани с механичното действие на мощните ударни вълни в ПФ върху образците. На фиг. 21 може да се види типичен профил на локалната твърдост в дълбочината на образци от волфрам и от WL10.



Фиг. 21: а) Волфрам, 2 изстрела, разстояние до анода 7,5 см; б) WL10, 2 изстрела, разстояние до анода 7,5 см.

В заключение относно нашите изследвания върху волфрама може да се каже, че:

1). Горещо валцуваната волфрамова ламарина, с която бяха проведени предварителните уточняващи експерименти показва извънредно малка якост на опън, малка ударна жилавост, ниска пластичност. Може да се обработва само в нагрято състояние (поне 800 °C). Дори след един изстрел (4 kJ, D) образецът се деформира и напуква значително.

2). Волфрамът с ориентирани зърна също е крехък, но в условията на третиране с високотемпературна плътна плазма поведението му е удовлетворително: напуква се по границите на зърната, но доколкото зърната са продълговати и достигат значителна дълбочина под повърхността, не се стига до формиране на прахови частици и отлюспване. Това е от особена важност за приложението му като материал за MBO (PFC (Plasma Facing Components)) в синтезните реактори. Което в комбинация с извънредно ниската му летливост гарантира, че плазмата няма да бъде охладена от нахлулия в нея волфрамов примес.



Фиг. 22. Оптични микроскопски снимки на образци от волфрам. Видно е формирането на големи пукнатини между областите, изстинали по-бавно в процеса на прекристализация.



Фиг. 23. Електронномикроскопски снимки на повърхностите на образци от синтерован волфрам, образци 3 и 4, обстреляни с по 30 изстрела в деутерий, при налягане 2,5 Тогг и напрежение на заряд 21 kV, на 6 см. от пинча.



Фиг. 24. Електронномикроскопски снимки на волфрамови образци (волфрам с ориентирани кристални зърна), обстреляни съответно с 25 и 35 изстрела в деутерий, при налягане 2,5 Torr, напрежение на заряд 25 kV, на 6 см. от пинча.

Нека сега обърнем внимание на поведението на образците от лят молибден, които приготвихме във вид на плочки с размери 18 x 18 x 5 мм.

Молибденът е от групата на хрома и волфрама, забележителен с редица свойства високотопим метал (температура на топене 2896 К), също с ОЦК (Обемно Центрирана Кубична) кристална решетка и много висока твърдост.

В сравнение с волфрама, молибденът е по-лесен за механична и термична обработка, в частност може лесно да се полира до висока гладкост, което и обуславя евентуалното му приложение като перспективен материал за диагностични огледала в реакторите за ТЯС.

Третиран при същите или аналогични условия показва по-високи якостни показатели от волфрама – напуква се в по-малка степен, пукнатините са по-плитки, по-къси и образуват фина мрежа в зоната на максимални поражения. Значителна якост на опън и по-голяма ударна жилавост. Освен напукването се наблюдава и формирането на мехури с деутерий и пари на метала по третираната повърхност на образеца. Явлението е познато като blistering.

На фигури 25 и 26 са показани снимки съответно с оптичен и с електронен микроскоп на пораженията, понесени от повърхностите на образците от лят молибден, които са били предварително полирани. Състоянието на полираната повърхност е дадено за сравнение на първата от електронно-микроскопските фотографии.



Фиг. 25. Оптични микроскопски снимки на образци от молибден при различни увеличения. Виждат се пукнатини, мрежи от пукнатини и блистери.



Фиг. 26. Електронно-микроскопски снимки на образец от лят молибден, обстрелян в деутериева атмосфера, при налягане 2,3 Torr, напрежение 21 kV, 1 изстрел. Разстояние от пинча 6 см.

И накрая, след изследването на поведението на образците от аустенитна хром-никелова неръждаема стомана при обстрел с високотемпературната плазма на ПФ, можем да обобщим, че тя има безупречно якостно поведение в условията на облъчване с екстремно плътни плазмени и йонни потоци (над 10^8 W/cm²). Поради високите й якост на опън и ударна жилавост, съчетани с пластичността й, тя не се напуква след разтапянето и мигновената прекристализация на повърхностния слой. За сметка на това, неръждавейката е по-лесно топима (и по-летлива) в сравнение с волфрама и молибдена, което я прави неподходяща за вътрешен лицев материал на камерите. Истинското й приложение е като конструкционен материал, сиреч като скелет на съоръжението.

Снимки на пораженията, понесени от повърхностите на съответните образци, са видни на фиг. 27 и 28.



Фиг. 27. Оптични микроскопски снимки на неръждаема стомана, обстреляна при различни условия – съответно 0, 2, 5, 10, 10 и 20 изстрела в деутерий, при налягане 2,2 Тогг и напрежение на заряд 22 kV. Разстояние от пинча 4 см.



Фиг. 28. Електронно-микроскопски снимки на повърхността на образец от неръждаема стомана, показващи ясно изразен блистеринг.



Фиг. 29. Състояние на повърхността на образец от неръждаема стомана преди и след обстрел с 10 изстрела при 2 Torr деутерий, 22 kV, на 4 см. от пинча.



Фиг. 30. Кратер, образуван в центъра на аноден накрайник на ПФ, изработен от хромникелова неръждаема стомана, след 100 изстрела при 22 кВ в деутериева атмосфера. Кратерът е образуван от релативистичните електрони и контакта с горещата свръхплътна плазма на пинча.

Глава 4. Влияние на рентгеновото излъчване върху някои живи организми

С помощта на ПФ облъчвахме биологичните образци с "букет" от рентгенови лъчи, в който присъстваха и сравнително големите дължини на вълните – т. нар. "мек рентген" или нискоенергично рентгеново излъчване. Разбира се, влиянието му беше съвместно с това на високоенергичното, което, за жалост, не намерихме начин да елиминираме. Предполага се, че поради много по-силното поглъщане на мекия рентген в образците, влиянието му (поне в енергетичен смисъл) преобладава.

С особеностите на ПФ сме вече запознати – излъчва импулсно, а самата фаза на пинча, при която става излъчването на рентгенови лъчи е съвсем кратка – с от порядъка на $3 \times 10^{-8} \div 5 \times 10^{-7}$ секунди. В работи [17,18,19] е описано примерно приложение на ПФ за целите на радиационната ензимология. За целта различни ензими са били облъчвани *in vitro* при различни условия. Например, в различен спектрален интервал на рентгеновото излъчване, различни дози и мощности на дозата. Получените резултати показват големи разлики в активацията и деактивацията на различни ензими у облъчени и необлъчени клетки. Но също така, при една и съща погълната доза, резултатите, получени след облъчване с ПФ са съществено различни от тези, получени при облъчване с радиоизотопни източници и рентгенови тръби. Причината е, както се оказва, в мощността на дозата. Тази разлика може да се изразява, например, в следното – един и същи ефект върху поведението на даден ензим може да се наблюдава при 5-6 порядъка по-ниски дози при облъчване с ПФ, отколкото при облъчване с непрекъснат източник като тръбата или радиоизотопа (които имат малка мощност на дозата – както видяхме, от порядъка на стотици или хиляди mSv/min, но не повече).

Има сериозно основание да се предполага, че дозата и формата на импулса от рентгенови фотони във времето имат значение едновременно (респ. формата и "площта" на импулса).

За целите на експеримента горният капак на неръждаемата камера на ПФ беше оборудван със специален прозорец, представляващ кръгъл отвор с диаметър 60 мм., покрит с тънко (10 µm) алуминиево фолио, разстлано върху носеща мрежа от неръждаема стомана с просвет около 50% (Виж фиг. 31).



Фиг. 31. Експериментална установка за облъчване на биологични образци с рентгеново лъчение. В централната област на горния капак на камерата е монтиран рентгенов прозорец.

Експериментите бяха проведени при следните условия: номинално налягане в диапазона 1,0÷1,7 mBar с работна смес - въздух, при напрежение на заряд 15÷18 kV, съответно енергозапас, не надхвърлящ 3 kJ. С помощта на 4-канален осцилоскоп имахме възможността да наблюдаваме едновременно еволюцията на тока през разряда, производната му, сигнала от PINдиодите BPX-65, регистриращи мекото рентгеново лъчение и твърдото, високоенергично рентгеново излъчване, посредством сцинтилационен детектор, състоящ се от плексигласов сцинтилатор и ФЕУ TVP-56 (Phillips). Представа за дозата, погълната от образците се даваше от термо-луминесцентните детектори (TLD), поставени при същите условия, при които и образците.

За да бъдат фотодиодите чувствителни в този несвойствен им по заводски характеристики обхват, какъвто е мекото рентгеново лъчение, стъклените им прозорчета бяха отстранени и заменени със слоеве от алуминиево фолио, дебело 10 µm. Така се получи своеобразен 4-канален регистратор на късовълново лъчение, снабден с 4 PIN-диода, първият от които снабден с 1 пласт от въпросното фолио, вторият – с два, третият – с три и четвъртият – с 0,5 мм. олово пред него. Съответно, от тези 4 диода се получаваха 4 различни сигнала, доколкото всеки от тях "виждаше" по различен начин филтрирана рентгенова картина.

На долната фигура 32 се вижда едновременна осцилограма на тока през разряда, сигнали от два от фотодиодите, съответстващ на мекото рентгеново излъчване, регистрирано от тях, и сигнал от сцинтилационния детектор, за който стана реч. Това е по същество осцилограма, даваща представа за характерните времена и взаимните отмествания във времето на тези съвсем краткотрайни процеси, развиващи се на наносекундната скала.



Осцилограмата дава представа за началото на процеса – примерно около -2,2 µs преди пинча (в началото има големи флуктуации на сигналите от всички детектори, защото започва пробива). После токът нараства, достига максимална стойност (която, в зависимост от енергозапаса, респ. напрежението на заряд) може да варира между 80 и 200 kA) и после внезапно спада и пак нараства веднъж или няколко пъти. Именно тогава се явява пинчът, който коинцидира със сигналите от фотодиодите и сцинтилационния детектор. Но, разбира се, имайки предвид, че процесите са на наносекундната скала, е нужно да се отчита времето за пътуване на рентгеновото лъчение от областта на пинча до детектора през разстоянието, което ги разделя. Това време е от порядъка на единици или десетки наносекунди. Както и следва да се очаква, сигналът от първия фотодиод (с 10-те микрона фолио) превъзхожда по площ и амплитуда другите. Осцилограмите на 4-те диода не могат и не трябва да се пресичат – противното би било явна индикация за повреда. Установена е явната корелация между единия или няколкото пика на излъчване на мек и твърд рентген от една страна и особеностите в производната на тока dI/dt, които пък съответстват по брой и характер на броя и вида на последователните пинчове (в общия случай може да има и няколко пинча), при това със съответното взаимно разположение във времето. Закъснението на сигнала от твърдото рентгеново излъчване в сравнение с този от мекото се дължи на различната отдалеченост от пинча на двата вида детектори. Освен това, на електроните, пораждащи спирачното твърдо рентгеново лъчение, им отнема известно време да пропътуват разстоянието между областта на пинча и анодната повърхност, при срещата с която го излъчват. Така, в крайна сметка, сигналът от твърдия рентген се оказа отместен с цели 50 пѕ...

Въпреки че нямат пряко отношение към биологичната част от експеримента, върху която се стремим да поставим фокус в тази глава, тези детайли са важни с оглед на повторяемостта на експеримента и отчитането само на тези изстрели, при които се е получил пинч.

Както е известно от литературата, в ПФ има два основни източника на меко рентгеново излъчване. Първият от тях са т. нар. "горещи точки" в стълба на пинча (всъщност това са микроскопични области с екстремна плътност и температура на плазмата), а вторият – дифузните области от плазма. Внимателните изследвания на топологията на областта на пинча посредством камера обскура с филтри, в комбинация с лазерна интерферометрия и други видове диагностика (в това число неутронни изображения и високоскоростни снимки на развитието на пинча) показват, че дифузните обекти могат да бъдат свързани с турбулентната фаза от развитието на пинча [20]. Установено е също, че горещите точки са нещо твърде обичайно, когато се работи с тежък газ или такъв участва в работната смес (примерно аргон).

По принцип, спектърът на излъчените от разряда в ПФ рентгенови лъчи зависи от режима на работа на устройството. Например, когато налягането на работния газ е сравнително ниско, а напрежението на заряд – високо, този режим е особено благоприятен за получаване на високи добиви от твърдо рентгеново лъчение – наблюдават се много плътни потоци от него. Една от най-големите машини от семейството на ПФ е PF-3, построена по указания на самия Филипов в института "Курчатов" край Москва, работи именно в такъв режим. В някои случаи рентгеновият добив на тази машина достига около 10% от енергозапаса на кондензаторите (!), при това само в "меката" рентгенова област [20]. Когато пък целта е да се постигнат високи добиви от рентгенови лъчи със средна и висока енергия, в края (на върха) на анода се вграждат различни метални накрайници [21]. Примери за такива накрайници могат да се видят на фиг. 33.

Ние (от ФзФ) също решихме да проверим как се отразяват анодните накрайници на добива твърдо рентгеново лъчение, като за целта направихме набор от най-различни накрайници – медни, месингови, от неръждаема стомана, разглобяем с възможност за вграждане на волфрамови и молибденови вложки. И установихме, например това, че при поставянето на медна тапа на върха на кухия анод, добивът твърдо рентгеново лъчение, отчитан от сцинтилационния детектор, нарастна приблизително 2 пъти [22].



Фиг. 33. Анодни накрайници на ПФ във ФзФ.

Посредством термолуминесцентинте дозиметри (ТЛД или TLD) измерихме типичните дози, които получава обект с размерите на детектора (кръгла таблетка с диаметър около 4 мм.) на разстояние около 10 см. от областта на пинча. И се оказа, че средната доза е от порядъка на 0,3 Sv на изстрел, докато същите детектори, поставени от външната страна на камерата, отчетоха средна доза, съизмерима с фоновата. Иначе казано, дебелата 5 мм. неръждаема стомана на вакуумната камера се явява съвсем приемлива защита от рентгеновите лъчи, поглъщайки почти цялата лява част от разпределението им по енергии. Наложи се да направим рентгеновия прозорец, за който стана реч, за да може организмите да остават при атмосферно налягане и същевременно да бъдат облъчвани с широкоспектърни рентгенови импулси, съдържащи солидна нискоенергетична компонента (мек рентген).

Известно е, че рентгеновите лъчи, излъчени непосредствено от областта на пинча (т.е. мекият рентген) имат анизотропия в пространственото разпределение на потока им: те формират най-плътен поток по оста на пинча, в което направление той е леко издължен [45]. Именно по тази ос, на около 15 см. над областта на пинча, е разположен и прозорецът, през който преминават лъчите, третиращи биологичните обекти.

За да намалим колкото е възможно високоенергичната компонента от лъчите в сравнение с "меката", оставихме анода кух, без накрайник. Така, по наши груби оценки, високоенергичната опашка с енергии от порядъка на десетки килоелектронволта трябваше да се окаже поне на порядък по-ниска (като общо количество енергия) от рентгена с енергии в диапазона $10^2 \div 10^4$ eV.

И така, целта на проведените експерименти беше да се установи промяната (ако такава се откриеше) в някои важни жизнени характеристики на живи организми, подложени на рентгеновото излъчване на ПФ със споменатата му специфика, отличаваща ситуацията от разгледаните изследвания на царевица, слънчоглед и др.

Водната суспензия на организмите, които биваха изследвани, се наливаше в тънкостенна пластмасова съдинка, така че да бъде удобно облъчването й отдолу през прозореца. Под съдинката бяха поставяни по няколко термолуминесцентни детектори, които след прочитането им да покажат с каква доза са били облъчени организмита (няколко за по-добра статистическа достоверност, както и от съображения за случаи на грешно отчитане или проблем в процеса на отчитане на някой от дозиметрите). Зъболекарска рентгенова плака беше поставена редом с дозиметрите като допълнително, съвсем грубо средство за контрол на дозата.

Дрожди

Първите облъчени организми бяха дрождите *Saccharomyces cerevisiae*. Изследвана беше тяхната оцеляемост при това облъчване, т. е. колко от началният брой дрожди биха оцелели след третиране. За целта клетките бяха отгледани в агар YPD, съдържащ 2% глюкоза, 2% пептон и, разбира се, 1% закваска (от самите дрожди) до т. нар. късна експоненциална фаза. След това клетките бяха промити двукратнои ресуспендирани до окончателна концентрация 10⁷ клетки на милилитър. После дойде ред да бъдат облъчени, като преди това бяха опаковани в херметични тънкостенни пластмасови съдове, обезпечаващи стерилност на експеримента. Подложени бяха на излъчването на 14 изстрела през алуминиево фолио, дебело 100µm. Дозата, която погълнаха при това, беше около 65 mSv. За оцеляемостта се съдеше по броя формирани впоследствие колонии. Както се оказа, подобна доза въобще не повлия на оцеляемостта, за което свидетелстваше липсата на каквато и да е разлика помежду облъчените и контролните дрожди след опита. Подобен "никакъв" резултат беше получен и с друг вид дрожди – *Kluyveromyces marxiamus*, при които също не беше наблюдавано повлияване поне по отношение на оцеляемост.

Едноклетъчни водорасли

Експериментите продължиха с облъчване на добре познатите едноклетъчни водорасли *Chlamydomonas reinhardtii* (фиг. 34).



Фиг. 34 - Chlamydomonas reinhardtii. Електронно-микроскопска и оптична снимка с увеличения съответно 10000 и 2000 пъти.

Водораслите бяха отгледани по фотомиксотропичен път в среда с три-ацетат-фосфат (ТАФ или ТАР) с киселинност 7,0, при температура 25°С. Културите бяха първоначално отгледани в 25-милилитрови стъклени съдове и осветени с луминесцентна светлина с плътност на фотонния поток (ПФП или PFD) 80 μ mol $\gamma/m^2 \cdot s$ в продължение на 24 часа и при постоянно разклащане. Така получената микроалгална суспензия беше култивирана в продължение на 1 седмица до настъпване на късната експоненциална фаза с концентрация на клетките от около 4 до 6 милиона клетки на милилитър.

Тъй като рентгеновото лъчение се освобождава във вид на много кратковременни импулси, беше решено да изследваме не преживяемостта, а влиянието на това лъчение върху някои бързи процеси, протичащи във фотосинтетичния апарат на едноклетъчните водорасли. За целта се оказа нужно да бъде измерена хлорофилната флуоресценция с помощта на мултифункционален анализатор на фотосинтетичната активност (МАФА или mPEA, multifunctional Plant Efficiency Analyzer, Hansatech Instruments Ltd., Kig's Lynn, UK) по метода на Рето Щрасер, описан в работа [28].

Първата партида водорасли бяха облъчени през алуминиево фолио, дебело 20µm и през стена на пластмасовия контейнер, дебела 10µm с 4 изстрела и погълната доза ~11mSv;

Втората партида бяха облъчени през алуминиево фолио, дебело 100µm (с цел частично "орязване" на рентгена откъм по-големите дължини) и отново през 10µm стена на контейнера, с 14 изстрела и доза ~65 mSv.

В споменатата работа на Р. Щрасер е добре описана методологията на анализа на фотосинтетичната активност по разработения от него и сътрудниците му метод. Следвайки тази процедура, третираните проби бяха в последствие осветени с импулси червена светлина (с

дължина на вълната 627 ± 10 nm), а след това бързата и забавената флуоресценция (с дължина на вълната 735 ± 15 nm) бяха регистрерани *in-vivo*. Промените в интензивността на светлината по време на прехода от затъмнено към осветено състояние, записани като функции на времето – т. нар. наречени "индукционни криви" бяха получени при т. нар. JIP-тест, също подробно описан от Щрасер и др. На фиг. 35 са показани индукционните и диференциални криви за двете партиди. Индукционните криви показват зависимостта на относителната променлива флуоресценция на хлорофила (V_t) като функция на времето. Тя се подчинява сравнително добре на закона $V_t = (F(t) - F_0)/(F_p - F_0)$. "F" е за флуоресценция, "0" е за началната, а "p" е за бързата (prompt) флуоресценция. Стойностите на флуоресценциите са нормирани към максималните и минималните им стойности. Диференциалните криви пък показват относителното изменение спрямо контролната партида на флуоресценцията като функция на времето: V_t (*treated*)– V_t (*control*).



S. Zapryanov et al.: Influence of the soft X-ray plasma focus radiation on live microorganisms

Фиг. 35 – индукционни (вляво) и диференциални (вдясно) криви.

Суспензията на *Chlamydomonas reinhardtii* беше впоследствие адаптирана към неосветено състояние в продължение на 1 час, а преходният процес на хлорофилната флуоресценция беше проследен при светлинна интензивност 5000 μ mol $\gamma/m^2 \cdot s$.

Изучаването на фотосинтетичната активност у водораслите показва недвусмислено, че рентгеновото лъчение има силен ефект върху структурата и функционирането на фотосинтетичния апарат. Видна е промяната на индукционните криви спрямо тези на необлъчените организми. Има основание да се подозира забавяне на електронния транспорт в акцепторите на фотосистеми 1 и 2 (PS I и PS II), съответно (виж фиг. 36).



Фиг. 36. Електронна транспортна верига.

Както е видно от диференциалните криви, визуализиращи особено добре влиянието на рентгеновото въздействие, ефектът е най-силно изразен след около 2 ms, когато се установява стационарното състояние на реакциите от електронно-транспортната верига към първичния хинонов акцептор Q_A и от Q_A^- към Q_B^- . Това ще рече, че у първата партида реакциите на реоксидация в акцептора на фотосистема 2 са били потиснати, а ефектите у втората партида могат да се обяснят като лек стрес (в биологично-терминологичен смисъл).

Повече и по-подробна информация относно влиянието на рентгеновото лъчение върху механизмите на фотосинтетичния електронен транспорт, се дава от параметрите на JIP-теста, отразяващи съответно квантовия добив при първичната фотохимична реакция във фотосистема 2 (φ_{P_0}), реоксидацията в акцепторите на Φ C2 (φ_{E_0}) и фотоиндуцирания електронен транспорт през Φ C1 към крайните акцептори (φ_{R_0}). Последната, четвърта хистограма от фиг. 87 илюстрира влиянието на рентгеновото облъчване върху показателя на фотосинтетичната активност (англ. термин е Performance Index of the Efficiency of Photosynthetic Machinery).

Гореизложените резултати показват, че импулсното лъчение на П Φ повлиява в партида 1 фотосинтетичната електронно-транспортна верига във всички изследвани участъци – както във ФС1 и ФС2, така и между двете. Показателят на фотосинтетичната ефективност, който дава количествена представа за цялостната жизненост и функционалност на фотосинтетичния апарат И отразява едновременно структурни и функционални характеристики на цялата фотосинтетична активност, намалява повече от 2 пъти в сравнение с контролната проба. В същото време се наблюдава 20% увеличение на ефективността на електронния транспорт у представителите на партида 2, облъчени с 65 mSv през 0,1 мм. алуминиево фолио. Този факт първо сякаш потвърждава подозрението, че сравнително дълговълновите рентгенови лъчи не се отразяват добре на растителните организми, както стана дума при разглеждането на облъчването на семена с рентгенова тръба през алуминиев екран. Второ, може би също така потвърждава наблюдаваният отново там ефект на мобилизация при някакви "оптимални" (но не минимални!) дози радиация. Във всеки случай, изказването на твърдения с по-голяма сигурност по този въпрос изисква от нас по-точно познаване на спектралното разпределение на лъчението, с което третираме организмите.



Резултатът от анализа на случилото се с партида 1 показва колко е голямо значението на мощността на дозата, доколкото дозата, сама по себе си, в този случай не е особено голяма (особено по сравнение с дозите, използвани за облъчването на семената, за които стана реч). Подобни резултати са получени и в работи [17 и 19].

Влияние на облъчването със серии къси високоенергични рентгенови импулси върху синтеза на ендоглюканаза у плесените *Trichoderma reesei*-M7

Биоконверсията на целулозосъдържащи субстрати в глюкоза представлява важна област от модерните биотехнологии. Ензимите, необходими за разграждането на полизахаридната част от биомасата, са били получени главно чрез използването на плесени от род *Trichoderma*.

Бяха проведени изследвания с мутантния щам *Trichoderma reesei*-M7, който е целулазен продуцент. Спорите на ензимния продуцент бяха подложени на въздействието на определени дози характеристично рентгеново лъчение на волфрама (главно К α 1 и К α 2 – линиите) при големи мощности на дозата. Последната особеност е характерна за източника на лъчението – Плазмен Фокус (ПФ), който работи в импулсен режим и генерира къси и високоенергични импулси от различни видове частици и ЕМ вълни. В случая вниманието ни е насочено към въздействието именно на високоенергичните рентгенови лъчи върху живия обект, като за целта те бяха изолирани от другите видове излъчване.

Условията, при които ПФ беше използван като максимално ефективен източник на рентгеново лъчение бяха следните: напрежение на заряд 18 kV, работен газ аргон (техн. чист) при налягане 0,8÷0,9 Torr. На върха на анода беше монтиран разглобяемият накрайник с

притегнато върху горната му повърхност хоризонтален кръгъл лист от волфрамова ламарина, която да послужи като мишена за излъчване на характеристичното рентгеноволъчение на волфрама.

Погълнатите от спорите на плесента дози рентгеново лъчение бяха зададени в интервал от около 5 до 32 000 mSv и измерени с помощта на Термо-Луминесцентни Дозиметри (ТЛД, TLD). Комплексното влияние на приложените дози в съчетание с големите мощности на дозата (от порядъка на десетки mSv за микросекунда) върху активността на произведената ендоглюканаза, върху количеството биомаса и извънклетъчни белтъци, беше изследвано в условията на партидно култивиране.

В дозовия обхват $\sim 200 \div 1200 \text{ mSv}$ беше наблюдавано отчетливо повишаване на активността на ендоглюканазата – с около $18 \div 32\%$, въпреки спада на биомасата, в сравнение с контролните проби.

Разрядът в ПФ е благодатен за подобни изследвания, доколкото генерира мощни импулси от различни видове излъчвания, при това със сравнително добре контролируеми параметри. В работи [17,18] са използвани рентгенови лъчи със средна и висока енергия на квантите, за нуждите на радиационната ензимология. Различни ензими са облъчвани *in-vitro*, при различни режими – с промяна на енергийния обхват, на дозите, на мощността на дозите и др. Получените резултати показват, като правило, значителна разлика в активация/деактивацията на ензимите след облъчване с ПФ в сравнение с ефекта, наблюдаван след облъчване с по-конвенционалните източници на рентгеново и гама излъчване, като например Цезий 137 и рентгенови тръби. В частност, ефектът от по-голямата мощност на дозата, т.е. бързината, с която дозата се натрупва, е особено отчетлив в областта на малките дози ~mSv, където при една и съща погълната доза влиянието на ПФ е много различно от това на непрекъснатите източници с малка мощност на дозата. Ето защо авторите са на мнение, че не толкова дозата, отдално взета, е от значение, колкото комбинацията й с мощността на дозата.

Плесени от групата на *Trichoderma* са широкоразпространени в дивата природа, където могат да бъдат намерени в почвените екосистеми, в частност във взаимодействие с корени и гниеща дървесина.

Беше изследвано въздействието на високоенергично рентгеново излъчване в обхвата $\sim 0,1 \div 120$ keV върху спорите на *Trichoderma reesei*-M7, при което различни проби бяха облъчени с различни дози в обхвата $\sim 5 \div 32~000$ mSv.

Изследваният щам М7 на *Trichoderma reesei* беше получен чрез мутагенеза с нитрозогуанидин на основата на Trichoderma sp. 914. [23].

Експериментът беше проведен с 10-дневна култура Trichoderma reesei-M7, посята върху картофено-декстрозен агар (Potato-Dextrose Agar, PDA) при температура 28°С. Посявката беше получена в съдове с обем 500 ml, с добавена 100 ml Манделсова минерално-солна среда [24] с 2% глюкоза и 1% царевичен екстракт при начална киселинност (при изварени в автоклав съдове) от около 4,8÷5, с постоянно разбъркване (220 об./мин) в продължение на 24 часа.

Ферментационната смес (50ml) беше образувана от от Манделсова солена среда с собавена 1% микрокристална целулоза Micricel® и 1% житни трици, при начална киселинност 5,8÷5,9. Ферментационният процес беше проведен също при 28°C с постоянно разбъркване при 220 об./мин. Активността на ендо-1,4-β-глюканазата (Сх) измерена на 120-тия час от култивацията. Активността на ендо-1,4-β-глюканазата беше изпитана върху натриева карбоксиметил целулоза (Na-CMC) в качеството на субстрат, по предписанието на Ууд и Бхат [25].

Реакционната смес, съдържаща 0,5ml 1-процентов разтвор на на Na-CMC в натриево-ацетатен буфер с pH 4,8 и 0,5 ml ензимен разтвор, беше инкубирана при 50°C в продължение на 30 мин.

За определяне нивото на редуциращите захари (като глюкоза и галактоза), беше използван аналитичният метод, предложен в [25 и 26]. Единица активност се дефинира като количеството ензим, нужно за получаването на 1 µmol глюкоза за 1 минута при описаните условия (50°C, pH 4,8).

Разтворимите белтъци бяха определени посредством багрилна техника [27] (съществуват багрила, които се свързват с наличните белтъци, а това позволява оценката им с обикновен спектрофотометър). В случая като еталон беше използван обикновен яйчен белтък. Всяко измерване беше правено по 3 пъти, като грешката беше пресметната за трите отделни проби.

Биомасата беше измерена с определянето на сухото й вещество в mg/ml в културата.

В експеримента беше използван споменатият ПФ от Мадеров тип, снабден с прозорец за рентгеновото лъчение.

Както стана реч, ефектът от рентгеновото облъчване върху ендоглюканазната активност и количеството пълен белтък, беше установено на 120-тия час от култивацията. Сухото вещество на биомасата беше определено още на 24-тия час от същия процес. Експериментът беше проведен с 10-дневна култура *Trichoderma reesei*-M7, посята върху PDA при 28°C. Веднага след култивацията, прорастващите в агара спори бяха облъчени с ПФ.

Погълната доза, mSv	Ендоглюканазна активност, IU/ml.	Белтък, mg/ml.	Специфична ендоглюконазна активност, mg/ml.	Бномаса, mg/ml.
Контролна проба, необлъчена, 0.4	49	0.480	102,08	2.96
7	44	0.402	109,45	2.81
28	46	0.405	113,58	3.11
89	51	0.454	112,33	2.88
137	49	0.467	104,93	2.87
178	49	0.419	116,95	2.92
206	50	0.465	107,53	3.23
232	52	0.476	109,24	2.85
475	54	0.527	102,47	2.56
519	58	0.548	105,84	2.67
618	57	0.533	106,94	2.48
669	65	0.559	116,28	1.88
1174	61	0.552	110,51	2.10
2370	52	0.489	106,34	2.91
4216	49	0.464	105,60	3.18
5601	47	0.479	98,12	2.98
6265	45	0.420	107,14	2.87
7491	44	0.456	96,49	3.15
9542	50	0.488	102,46	2.97
10346	47	0.468	100,43	3.12

Таблица 2. Влияние на облъчването с рентгеновото лъчение на ПФ върху ензимната активност, пълния белтък и биомасата (при партидно култивиране в течна среда) у прорастнала култура.



Фиг. 38. Биопоказатели у прорастнала култура - "оптималните" дози са сравнително ниски.

От фигура 38 се вижда, че у прорастналите спори, облъчени с дози в интервала ~250÷550 mSv се наблюдава повишена активност на ендоглюканазата: тя е с между 22 и 36% по-висока от нормалната (която се наблюдава у необлъчените спори). Количеството пълен белтък е също повишено в тази област, като при погълната доза от ~471 mSv то е с 30% по-високо, токолкото у нетретираните спори. Интересно наблюдение е, обаче, че при това сухата биомаса търпи отчетлив спад.

Беше проведен и следващ експеримент, също с 10-дневна култура *Trichoderma reesei*-M7, посята върху PDA при 28°C. Но от тази култура беше получена спорова суспензия с концентрация на спорите около $5 \div 7 \times 10^6$ в солен разтвор. Епруветките с тази суспензия бяха облъчени по специална схема (позволяваща елиминирането на грешки в измерването на погълнатата доза при отвземането и поставянето на нови епруветки над рентгеновия прозорец), след което отново, както и в предишния експеримент, беше извършена култивация върху Манделсова солена среда, при вече описаните условия.

Погълната доза, mSv	Ендоглюканазна активност, IU/ml.	Белтък, mg/ml.	Специфична ендоглюканазна активност, mg/ml.	Бномаса, mg/ml.
Контролна проба, необлъчена, 0.4	49	0.480	102,0833	2.96
5	47	0.412	114,0777	2.80
29	43	0.409	105,1345	3.08
95	48	0.470	102,1277	2.96
130	49	0.483	101,4493	2.93
184	45	0.439	102,5057	2.87
200	48	0.477	100,6289	3.01
239	60	0.580	103,4483	1.85
471	67	0.627	106,8581	2.01
528	63	0.578	108,9965	2.27
630	50	0.513	97,46589	2.90
675	48	0.491	97,75967	3.07
913	50	0.484	103,3058	3.10
2493	49	0.489	100,2045	3.06
4536	49	0.468	104,7009	3.12
5780	46	0.470	97,87234	2.89
6566	43	0.429	100,2331	2.92
7860	46	0.463	99,35205	3.04
9700	47	0.468	100,4274	2.96
10273	48	0.483	99,37888	3.01

Таблица 3. Влияние на облъчването с рентгеновото лъчение на ПФ върху ензимната активност, пълния белтък и биомасата (при партидно култивиране в течна среда) у спорова суспензия.



Фиг. 39. Биопоказатели у споровата суспензия. "Оптималните" дози са доста по-високи.

И в този случай установихме нарастване на ендоглюканазната активност и на пълния белтък (10÷32% по-висока ендоглюканазна активност и 9÷16% повече белтък), както и забележим спад на сухата биомаса (фиг. 39).

Видно е, че *Trichoderma reesei*-M7 показва висока резистентност към въздействието на импулсното рентгеново излъчване, при което жизнеността на спорите остава, практически, непроменена дори до най-високата доза от експеримента (32 Sv). С анализа на ендоглюканазната активност, с измерването на сухата биомаса и на пълния белтък, стана напълно ясно, че при сравнително ниски погълнати дози (мощността на дозата се приема за константа в целия експеримент и е характеристика на ПФ с дадената му геометрия, енергозапас и волфрамова плоска мишена) ($200 \div 1200$ mSv) ефектът на микромицетния продуцент е отчетлив и добре изразим. От друга страна, с по-нататъшното увеличаване на погълнатата доза не бяха предизвикани каквито и да е измерими (с наличните методи) промени в изброените 3 параметъра.

От всичко казано може да се заключи, че резултатите имат потенциала да доведат до наистина интересни изводи, особено като се има предвид, че изобщо екстремните условия, като силна радиация, много ниски температури, недостиг на вода и др. са нормално положение в космоса, да речем. Знаем, че някои семена, спори и дори цели животни (например бавноходките, *Tardigradae*) оцеляват добре в такива условия. Но в случая с *Trichoderma reesei* конкретните биохимични и биофизични причини за подобно поведение тепърва предстои да бъдат изяснени. Ето защо проблемът е интересен и със сигурност заслужава допълнителни изследвания.

Глава 5. Първи стъпки в неутронната физика на ПФ

В лаборатория "ПФ" на ФзФ беше поставено началото на експерименти с добив на неутрони от реакция D+D при следните работни условия: типично напрежение на заряд между 20 и 22 kV и налягане на деутерия 2...2,5 mTorr. При по-ниски налягания и напрежения също се наблюдават изстрели с неутронен добив, но статистическата им възпроизводимост е сравнително ниска.

На фиг. 40 е показана осцилограма на изстрел, при който беше регистриран отчетлив неутронен пик посредством същия сцинтилационен детектор, който по принцип ни служи за регистрация на твърдото рентгеново лъчение. Последното беше елиминирано, като на пътя на неутроните и рентгеновите лъчи от областта на пинча към детектора беше поставена на подходящо място оловна тухла с дебелина около 50 мм. Неутроните преминават през оловото сравнително лесно, търпейки единствено лека промяна (несиметрично уширение) в спектъра им по енергии.



Фиг. 40. Осцилограма на отклика на неутронния детектор.

За целта на експеримента беше необходимо снабдяването на устройството с адекватна неутронна защита, която да защитава персонала и апаратурата от неутронното излъчване. Изпълнихме я във вид на разглобяем куб около камерата, с дебелина на стените 50 мм. Стените на куба представляват плочи, които се застъпват така, че да няма направление, по което неутроните да могат да преминат безпрепятствено по права линия. Готовата конструкция беше изпитана посредством крушка в центъра на куба за светлонепроницаемост. Всяка плоча, изготвена като куха гетинаксова кутия (форма), пълна с твърда суспензия на 10% (по тегло) на борна киселина в парафин. Борът има свойството да поглъща (бавни!) неутрони, превръщайки се, например, в изотоп на лития, ето защо е удобно използването на съединения на бора. Найдостъпно и практично се оказа използването за целта на борна киселина или боракс. Но тъйкато сеченията за реакциите, при които борът поглъща неутрон са при сравнително ниски енергии на неутроните (при бавни неутрони), е наложително поставянето и на неутронен забавител между източника (областта на пинч, камерата на $\Pi\Phi$) и поглътителя, какъвто се явяват богатите на водород материали като водата, маслата, пластмасите и др. Особено удобни за практични цели се оказват парафинът и пластмасата (например полиетилен), представляващи въглеводороди. На фиг. 41 са показани някои от етапите от изготвянето на защитата. Вижда се и разположението на сцинтилационния детектор (вертикално, над камерата), пред който в защитата беше предвиден отвор.



Фиг. 41. Етапи от изготвянето на неутронната защита около камерата на ПФ във ФзФ

Основни приноси в дисертационния труд

• В хода на работата, документирана в настоящата дисертация, бяха проведени множество експерименти, в хода на които беше разработена методика за сондови измервания с висока точност, което, от една страна, позволи да бъде установено равномерното придвижване на ТПС по време на аксиалната фаза на разряда в нашия ПФ с мадерова геометрия, а от друга страна дава възможност за едни бъдещи изследвания на движението на плазмоидите, възникващи след пинча. Виж статия [A1].

• Анализирано беше въздействието на импулсното рентгеново лъчение на плазмения фокус върху живи организми от всички царства и сравнено с въздействието на други видове лъчения. Получените резултати за едноклетъчните водорасли и плесените са уникални – те показват от една страна, че въпросните организми се повлияват много по-силно от импулсното, отколкото от постоянното облъчване при една и съща погълната доза, а от друга – че самият ефект при сравнително малки дози и висока мощност на дозата може да има стимулиращо действие върху множество биологични показатели: може да потисне, ускори или забави фотосинтезата у растенията, да промени преживяемостта както в положителен, така и в отроцателен смисъл, може да предизвика повишаване ефективността на редица ензими (както се откри при облъчването на плесените), а това от своя страна е от голямо значение за множество биотехнологични приложения. Потвърдена беше пословичната радиационна резистентност на животните от групата на бавноходките. Виж статии [А2] и [А3].

• Изследвано беше поведението на материали за вътрешните облицовки на термоядрени реактори – такива като волфрам и молибден. Конструкционната неръждаема стомана също беше обект на изследвания. Установени бяха с голяма точност ограниченията в приложимостта на всеки от материалите, както и радиационните и плазмени натоварвания, в които може да работи без бързо да се разрушава. Описано беше специфичното поведение на всеки от материалите (волфрам, молибден, неръждаема стомана) както в зависимост от способа на приготвянето му като материал, така и от режима на облъчване (изпитване). Дадени бяха препоръки въз основа на получените резултати. Виж статия [A4].

• Направени бяха първите необходими стъпки за започване на експерименти с неутрони и вече са налични някои предварителни резултати.

Публикации във връзка с дисертацията

A1). On the current layer in the run-down phase of the plasma focus discharge, S Zapryanov, V Yordanov and A Blagoev, Journal of Physics: Conference Series 516 (2014) 012029.

A2). Influence of the soft X-ray plasma focus radiation on live microorganisms, S. Zapryanov, V. Goltsev, B. Galutsov, M. Gelev, and A. Blagoev, Eur. Phys. J. Appl. Phys. (2012) 58: 11201.

A3). Effect of multiple short highly energetic X-ray pulses on the synthesis of endoglucanase by mutant strain of *Trichoderma reesei*-M7, Orlin Gemishev, Stanislav Zaprynov, Alexander Blagoev, Maya Markova, Valentin Savov, Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2014 Vol. 28, No. 5, 850_854.

A4). Irradiation of samples for fusion prospective materials by the plasma focus device of Sofia University, Stanislav Zapryanov and Alexander Blagoev, Phys. Scr. T161 (2014) 014041 (4pp).

A5). Measurements of the Basic Characteristics of the Dense Plasma Focus Device, S. Zapryanov, V. Yordanov, A. Blagoev, Bulg. J. Phys. 38 (2011) 184–190

Доклади на конференции във връзка с дисертацията

B1). Vladimir Alexandrov, Stanislav Zapryanov, Vasilii Gol'tsev, Metody Gelev, Alexander Blagoev, Influence of the X-ray radiation of a Plasma Focus on leaves of green beans, IWSSPP 2012, Kiten, Bulgaria, 2012.

B2). Stanislaw Zapryanov, Alexander Blagoev and Stoyan Rusev, Irradiation of samples for fusion prospective materials by the Dense Plasma Focus device of the University of Sofia, VEIT – 2013, Sozopol, Bulgaria, 2013.

B3). Stanislav Zaprynov, Orlin Gemishev, Alexander Blagoev, Maya Markova, Valentin Savov, Influence of the Plasma Focus X-Ray Pulses on the Synthesis of Endoglucanase by the Mutant Strain of Trichoderma Reesei-M7, IWSSPP 2014, Kiten, Bulgaria, 2014.

Библиографска справка

1). Петров Д.П., Филиппов Н.В., Филиппова Т.И., Храбров В.А. "Мощный импульсный газовый разряд в камерах с проводящими стенками". В сб. Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций. Изд. АН СССР, 1958, т. 4, с. 170-181.

2). P.P. Petrov, N V Filippov, T I Filippova and V A Khrabrov in "Plasma Physics and Problems of Controlled Thermonuclear Reactions" vol. **4**, p 198, Ed M A Leontovich,......". Pergamon New York, 1960.

3). J. V. Mather, Physics of Fluids 7 (1964) Suppl. 28

4). J. V. Mather, Physics of Fluids 8, 366 (1965)

5). S. K. H. Auluck, Axial magnetic field and toroidally streaming fast ions in the dense plasma focus are natural consequences of conservation laws in the curved axisymmetric geometry of the current sheath, 2014.

6). V.I. Krauz, K.N. Mitrofanov, V.V. Myalton, E.Yu. Khautiev, A.N. Mokeev, V.P. Vinogradov, Yu.V. Vinogradova, E.V. Grabovsky, G.G. Zukakishvili, Studies of Dynamics and Structure of Current Sheath on Plasma Focus Facility PF-3, 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2 - 6 July 2007 ECA Vol.31F, P-1.018 (2007).

7). S Zapryanov, V Yordanov and A Blagoev, On the current layer in the run-down phase of the plasma focus discharge, Journal of Physics: Conference Series 516 (2014) 012029.

8). P. Knoblauch, V. Raspa, F. Di Lorenzo, A. Lazarte, A. Clausse, and C. Moreno, Correcting magnetic probe perturbations on current density measurements of current carrying plasmas, Review of Scientific Instrume, Volume:81 Issue:9, 2010.

9). H. Bruzzone, C. Moreno, and H. Kelly, Measurements of current sheets in plasmas with a finite-sized magnetic probe, Meas. Sei. Tech- nol. 2, 1195 (1991).

10). J. H. Malmberg, Rev. Sci. Instrum. 35, 1622 _1964.

11). Current Sheath Structures of the Plasma Focus in the Run-Down Phase, K. H. Kwek, T. Y. Tou, S. Lee, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. **18** №5, October 1990.

12). Stanislav Zapryanov and Alexander Blagoev, Irradiation of samples for fusion prospective materials by the plasma focus device of Sofia University, Phys. Scr. T161 (2014) 014041 (4pp).

13). V. Shirokova, T. Laas, A. Ainsaar, J. Priimets, Ü. Ugaste, E.V. Demina, V.N. Pimenov, S.A. Maslyaev, A.V. Dubrovsky, V.A. Gribkov, M. Scholz, V. Mikli, Comparison of damages in tungsten

and tungsten doped with lanthanum-oxide exposed to dense deuterium plasma shots, Journal of Nuclear Materials 435 (2013) 181–188.

14). Gribkov V. A. *et al* 2007, Plasma dynamics in the PF-1000 device under full-scale energy storage: II. Fast electron and ion characteristics versus neutron emission parameters and gun optimization perspectives, J Phys. D: Appl. Phys. 40 3592.

15). E.V. Demina, A.V. Dubrovsky, V.A. Gribkov, S.A. Maslyaev, V.N. Pimenov, I.P. Sasinovskaya, R. Miklaszewski, M. Scholz, Application of a Plasma Accelerator of the Dense Plasma Focus Type in Simulation of Radiation Damage and Testing of Materials for Nuclear Systems, 2008.

16). Valeriy N. Pimenov, Elena V. Demina, Sergey A. Maslyaev, Lev I. Ivanov, Vladimir A. Gribkov, Alexander V. Dubrovsky, Ülo Ugaste, Tõnu Laas, Marek Scholz, Ryszard Miklaszewski, Blagoslav Kolman, Agostino Tartari, Damage and modification of materials produced by pulsed ion and plasma streams in Dense Plasma Focus device, NUKLEONIKA 2008; **53** (3):111-121.

17). V.A. Gribkov, M.A. Orlova, On various possibilities in pulsed radiation biochemistry and chemistry, Radiat. Environ. Biophys. **43**, 303 (2004).

18). V. Dubrovsky, I.G. Gazaryan, V.A. Gribkov, Y.P. Ivanov, O.A. Kost, M.A. Orlova, N.N. Troshina, On the Possible Mechanisms of Activation Changes of Enzymes under Pulsed Irradiation, J. Russ. Laser Res. **24**, 289 (2003).

19). V.A. Gribkov et al., PF-6 - an effective plasma focus as a source of ionizing radiation and plasma streams for application in material technology, biology and medicine, Nucleonika **51** (2006) 55.

20). Грибков, В. А., Энциклопедия низкотемпературной плазмы, том 6, изд. Физматлит, Москва, 2008, стр. 151.

21). М. Леонтович, С. Осовец, О механизме сжатия тока при быстром и мощном газовом разряде, *Атомная енергия* (1956) **3** 81.

22). S. Zapryanov, V. Yordanov, A. Blagoev, Measurements of the Basic Characteristics of the Dense Plasma Focus Device, Bulg. J. Phys. 38 (2011) 184–190.

23). Atev, A.P. (2005) Habilitation work, University of Sofia, Faculty of Biology.

24). Mandels M.L., L. Hontz, J. Nistrom, Enzymatic Hydrollysis of Waste Cellulose, Biotechnol.and Bioeng. (1974) **16**, 471-49.

25). Wood, T.M., K.M. Bhat, Methods for measuring cellulase activities, Methods Enzymol. (1988), **160**, 87-112.

26). Somogyi, M., Note on sugar determination, J. Biol. Chem. (1952), 200, 245.

27). Bradford, M.M., A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding, Anal. Biochem.(1976), **72**, 248-254.

28). R.J. Strasser, M. Tsimilli-Michael, S. Qiang, V. Gol'tsev, Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant Haberlea rhodopensis, Biochim. Biophys. Acta 1797 (6-7), 1313-26 (2010).