

# СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ

Катедра „Атомна физика“  
Специалност: „Медицинска физика“  
ОКС „Магистър“



## ДИПЛОМНА РАБОТА

### ТЕМА:

Полимерни композити на основата на поливинилов алкохол (PVA) и волфрамов триоксид ( $WO_3$ ) за защита от рентгенови лъчения

Научен ръководител:.....  
/проф. дфн Вера Маринова/

Дипломант: .....  
/Мария Младенова/

Специалност: Медицинска физика  
Фак.№ ЗРН3500027

Научен консултант: .....  
/ доц. д-р Страхил Георгиев/

Март, 2026 г.  
София

# Съдържание

<b>СЪДЪРЖАНИЕ</b>	<b>Стр.</b>
Списък на използваните съкращения	
<b>УВОД</b>	1
<b>ЦЕЛ И ЗАДАЧИ</b>	2
<b>I. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ (Обзорна част, описание на методите на изследване)</b>	3
<b>1. Взаимодействие на йонизиращо лъчение с веществото</b>	3
<b>1.1. Йонизиращи лъчения</b>	3
<b>1.2. Взаимодействие на гама лъчение с веществото</b>	3
1.2.1. Фотоелектричен ефект;	4
1.2.2. Комптоново разсейване;	5
1.2.2.1. Релеевско (кохерентно) разсейване;	6
1.2.3. Образуване на двойки електрон/позитрон;	6
	7
<b>1.3. Отслабване на гама лъчение при преминаване през вещество</b>	7
1.3.1. Линеен коефициент на отслабване	7
1.3.2. Масов коефициент на отслабване	8
1.3.3. Слой на полуотслабване	9
1.3.4. Среден свободен пробег	9
<b>1.4. Материали за радиационно отслабване</b>	9
1.4.1. Олово като стандарт в практиката	10
1.4.2. Недостатъци на оловото	11
<b>1.5. Полимерни матрици</b>	11
1.5.1. Епоксидни смоли (EP)	13
1.5.2. Полиетилен (PE)	13
1.5.3. Полимлечна киселина (PLA)	13
1.5.4. Полидиметилсилоксан (PDMS)	14
1.5.5. Поливинилов алкохол (PVA)	14
<b>1.6. Неорганични пълнители</b>	15
1.6.1. Бисмут	15
1.6.2. Барий	16
1.6.3. Волфрам	16
1.6.3.1. Волфрамов триоксид	17
<b>1.7. Методи за определяне на линейния коефициент на отслабване на лъчението при преминаване през дадено вещество</b>	17
1.7.1. Метод с Гайгер–Мюлеров брояч (GM counter)	17
1.7.2. Сцинтилационни детектори NaI(Tl)	18
1.7.3. Йонизационна камера (ionization chamber)	18

1.7.4. Метод с HPGe (високочувствителен германиев детектор)	18
<b>II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЧАСТ</b>	20
2.1. Получаване на полимерни композити от WO <sub>3</sub> и PVA	20
	21
2.2. Изследване на лъчезащитни свойства на полимерните композити	
2.3. Изпитване на способностите за огъване на полимерни композити от PVA и WO <sub>3</sub>	22
2.4. Методи за характеризиране на слоеве от полимерни композити от PVA и WO <sub>3</sub> .	23
2.4.1. XRD на слоеве от полимерни композити от PVA и WO <sub>3</sub>	23
2.4.2. TEM на слоеве от полимерни композити от PVA и WO <sub>3</sub>	23
2.4.3. AFM на слоеве от полимерни композити от PVA и WO <sub>3</sub>	24
2.4.4. SEM на слоеве от полимерни композити от PVA и WO <sub>3</sub>	24
<b>III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ И РЕЗУЛТАТИ</b>	25
3.1. XRD анализ	25
3.2. TEM анализ на наночастици от WO <sub>3</sub>	25
3.3. Морфологичен анализ на получените композити	26
3.3.1. AFM анализ	27
3.3.2. SEM анализ	27
3.4. Способност за огъване на полимерни композити от PVA-WO <sub>3</sub>	28
3.5. Изследване на лъчезащитни свойства на полимерни композити	29
3.5.1. Теоретична оценка масовия коефициент на отслабване	29
3.5.2. Теоретична стойност на отслабване на лъчението	31
3.5.2.1. Определяне на плътността на композитите	32
3.5.2.2. Определяне на дебелината на използваните образци	33
3.5.2.3. Определяне на теоретичната стойност на отслабване на лъчението	33
3.6. Експериментално определяне на отслабване на лъчението	34
3.7. Експериментално определяне на масовия коефициент на отслабване на лъчението	36
3.8. Определяне на слой на полуотслабване	39
3.9. Определяне на оловен еквивалент на получените проби	40
<b>ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	42
<b>ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА</b>	44

## Списък на използваните съкращения

PVA	<i>Polyvinyl Alcohol</i>	Поливинилов алкохол
WO <sub>3</sub>	<i>Tungsten Trioxide</i>	Волфрамов триоксид
XRD	<i>X-ray Diffraction</i>	Рентгенова дифракция
TEM	<i>Transmission Electron Microscopy</i>	Трансмисионна електронна микроскопия
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>	Сканираща електронна микроскопия
AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>	Атомно-силова микроскопия
ДНК		Дезоксирибонуклеинова киселина
HVL	<i>Half Value Layer</i>	Слой на полуотслабване
MFP	<i>Mean Free Path</i>	Среден свободен пробег
ЛПС		Лични предпазни средства
EP	<i>Epoxy</i>	Епоксидна смола
PE	<i>Polyethylene</i>	Полиетилен
PLA	<i>Polylactic Acid</i>	Полимлечна киселина
PDMS	<i>Polydimethylsiloxane</i>	Полидиметилсилоксан
AAPM	<i>American Association of Physicists in Medicine</i>	Включително Американската асоциация на физиците в медицината
BaSO <sub>4</sub>	<i>Barium Sulfate</i>	Бариевият сулфат
BaCO <sub>3</sub>	<i>Barium Carbonate</i>	Бариев карбонат
GM	<i>Geiger–Müller</i>	Гайгер–Мюлеров
HPGe	<i>High-Purity Germanium</i>	Свърхчист Германий
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>	Енергодисперсионна спектроскопия
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>	Национален институт за стандарти и технологии

## УВОД

Ролята на йонизиращите лъчения в диагностичната и терапевтичната практика на модерната медицина е фундаментална. Въпреки неоспоримите ползи от рентгенографията и компютърната томография, нарастващата честота на тези процедури поставя сериозен фокус върху въпроса за радиационната безопасност. Тъй като дори ниските дози облъчване могат да имат кумулативен негативен ефект върху човешкия организъм, разработването на по-ефективни материали и методи за индивидуална защита се превръща в приоритетно направление за медицинската физика.

В продължение на десетилетия оловото е „златният стандарт“ в радиационната защита, поради неговия висок атомен номер и отлични абсорбционни свойства. Въпреки своята ефективност, традиционните оловни престилки и екрани имат сериозни недостатъци. Те са тежки и създават дискомфорт на персонала при продължителна употреба. В допълнение, оловото е токсичен метал, чието производство и извеждане от експлоатация създават рискове за околната среда. Тези фактори налагат търсенето на алтернативни материали, които да са леки, екологично чисти и достатъчно гъвкави за изработката на ергономични защитни облекла.

Съвременните разработки в областта на защитните материали все по-често залагат на полимерните композити, които успешно обединяват лекотата и гъвкавостта на полимерите с високата спираща способност на плътните неорганични добавки. Поливинил алкохолът (PVA) се доказва като изключително подходяща основа за такива системи, тъй като е биосъвместим, лесно се преработва в разтвор и позволява хомогенно вграждане на наночастици. Като активен легиращ агент в работата е избран волфрамов триоксид  $WO_3$ . Със своя висок атомен номер ( $Z=74$ ), волфрамот ефективно отслабва интензитета на рентгеновите лъчи, като за разлика от оловото, е напълно безопасен за човешкото здраве и околната среда.

Настоящата дипломна работа е посветена на разработването и изследването на иновативни композитни слоеве на основата на PVA, с добавени наночастици от  $WO_3$ . Основната цел е да се създаде материал, който не само осигурява надеждна радиационна защита, но и притежава необходимата механична устойчивост при многократно огъване – критично условие за практическото му приложение в медицината. Чрез комбиниране на методи за микроскопски анализ и експериментални измервания на радиационните характеристики, работата цели да установи оптималните концентрации на пълнителя, които гарантират максимална ефективност при минимално тегло и дебелина на защитния слой.

## **Цел:**

**Да се синтезират и изследват структурните, повърхностните, механичните и радиационно-защитните свойства на полимерни композити на основата на PVA, легирани с наночастици от  $WO_3$ , както и да се оцени възможността за тяхното приложение като алтернатива на традиционните оловосъдържащи защитни материали.**

За постигане на тази цел, бяха формулирани следните задачи:

- 1) Да се получат полимерни композити на основата на PVA с добавяне на различни тегловни проценти наночастици от  $WO_3$ .
- 2) Да се изследват наночастиците  $WO_3$  с помощта на методите рентгенова дифракция (XRD) и Трансмисионна електронна микроскопия (TEM).
- 3) Да се изследват структурните свойства на получените композити със Сканиращ електронен микроскоп (SEM) и атомно-силова микроскопия (AFM) преди и след механични деформации, както и след изследване налъчезащитните свойства.
- 4) Да се изследват механичните свойства на полимерните композити
- 5) Да се изследват радиационно-защитните свойства на получените композити чрез определяне на масовия коефициент на отслабване, слоя на полуотслабване и оловния еквивалент, както и да се оцени влиянието на концентрацията на  $WO_3$  върху защитната ефективност и възможностите за практическо приложение.

# **I. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТ (Обзорна част – описание на методите на изследване)**

## **1. Взаимодействие на йонизиращо лъчение с веществото**

### **1.1. Йонизиращи лъчения**

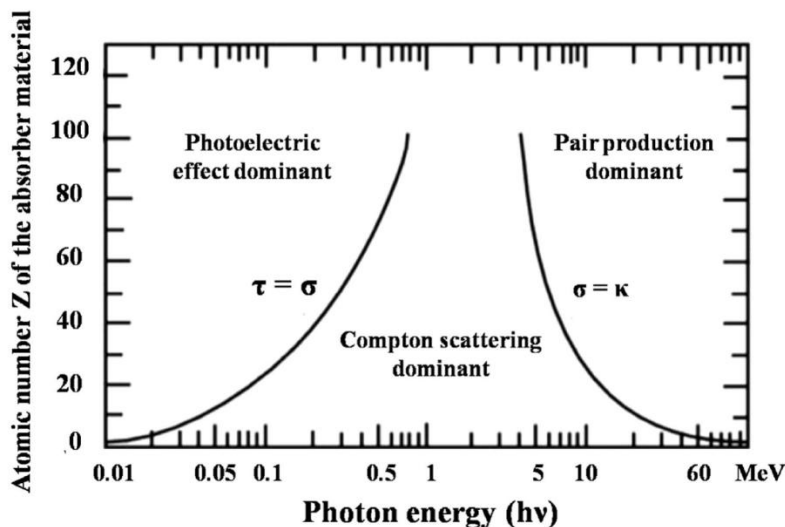
Йонизиращите лъчения представляват високоенергийно електромагнитно излъчване или поток от частици, които при взаимодействие с веществото могат да откъсват електрони от атоми и молекули, като по този начин предизвикват йонизация. В резултат на този процес могат да се разрушават химични връзки, да се образуват свободни радикали и други реактивни химични видове, както и да се предизвикват структурни и функционални увреждания на биологично значими макромолекули, най-вече на дезоксирибонуклеиновата киселина (ДНК). В зависимост от погълнатата доза (физична величина, характеризираща количеството енергия, предадено от йонизиращото лъчение на единица маса вещество), мощността на дозата и радиочувствителността на облъчените тъкани, тези увреждания могат да доведат до клетъчна смърт, мутации, хромозомни аберации, канцерогенеза и нарушения в ембрионалното и феталното развитие.

Облъчването на човека от йонизиращо лъчение се формира както от естествени, така и от изкуствени източници. Естественият радиационен фон включва космично лъчение, лъчение със земен произход, постъпване на естествено срещащи се радионуклиди чрез храната и водата, както и инхалация на радон. От своя страна, изкуствените източници са свързани главно с медицински, индустриални, научноизследователски и ядреноенергийни приложения. Особено съществено е медицинското облъчване, поради широкото използване на йонизиращи лъчения в образната диагностика, нуклеарната медицина и лъчетерапията. Непрекъснатото разширяване на приложението на йонизиращото лъчение в съвременната практика налага задълбочено разбиране на взаимодействието между лъчението и веществото, както и разработването на ефективни средства за радиационна защита. Поради това за правилното оценяване на биологичните ефекти на йонизиращото лъчение и за разработването на ефективни защитни материали е необходимо да се разгледат основните механизми на взаимодействие на гама-лъчението с веществото [1], [2], [3], [4].

### **1.2. Взаимодействие на гама лъчение с веществото**

Гама-лъчението представлява електромагнитно излъчване с висока енергия и голяма проникваща способност, което взаимодейства с веществото основно чрез фотоелектричен ефект, Комптоново разсейване и кохерентно (Релеевско)

разсейване, а при по-високи енергии – и чрез образуване на електрон-позитронни двойки (фиг. 1).



**Фиг. 1** Илюстрация на трите механизма на взаимодействие на фотоните с абсорбиращата среда в зависимост от тяхната енергия и атомния номер [5]

### 1.2.1. Фотоелектричен ефект;

Фотоелектричният ефект представлява нееластично взаимодействие между фотон и силно свързан електрон от вътрешна електронна обвивка на атома, при което фотонът се поглъща напълно (фиг. 2а)). За да протече този процес, енергията на фотона трябва да бъде по-голяма от енергията на свързване на електрона. В резултат електронът се откъсва от атомната обвивка като фотоелектрон, а разликата между енергията на фотона и енергията на свързване се превръща в негова кинетична енергия. Процесът се описва с уравнението:

$$hf = \phi + E_k \quad (1.1)$$

където  $hf$  е енергията на падащия фотон,  $\phi$  е енергията на свързване, а  $E_k$  е кинетичната енергия на излъчения фотоелектрон.

След извеждането на електрона атомът остава във възбудено състояние с ваканция във вътрешна обвивка. При нейното запълване от електрон от по-високо енергийно ниво се излъчва характеристично рентгеново лъчение или се отделят Оже-електрони. Вероятността за възникване на фотоелектричен ефект е най-голяма при ниски и средни енергии на фотона, приблизително в диапазона 10–100 keV, и нараства силно с увеличаване на атомния номер  $Z$  на поглъщащия материал. Сечението зависи от  $Z$  и  $E=h\nu$ :

$$\sigma_{ph} \propto \frac{Z^4}{(h\nu)^3} \quad (1.2)$$

Където  $Z$  е атомен номер на материала,  $h$  е константа на Планк и  $\nu$  е честота на фотона.

Поради това, фотоелектричният ефект има съществено значение при защита от йонизиращи лъчения с материали, съдържащи елементи с висок атомен номер, какъвто е волфрамът, особено за Рентгеново и нискоенергийни гама-лъчения [5], [6].

### 1.2.2. Комптоново разсейване;

Комптоновото разсейване представлява еластично взаимодействие между падащ фотон и слабо свързан или практически свободен електрон от атома (фиг. 2 б)). При този процес фотонът предава част от енергията си на електрона, който се изважда от атома, а самият фотон променя посоката си на разпространение и продължава с по-ниска енергия и съответно по-голяма дължина на вълната.

Комптоновото разсейване се разглежда като основен механизъм на взаимодействие на фотоните с веществото в средния енергиен диапазон, като приносът му нараства с увеличаване на енергията на фотоните и зависи главно от електронната плътност на средата. Сечението за взаимодействие зависи правопрпорционално на  $Z$  и обратно пропорционално на  $E$ :

$$\sigma_c \propto Z/E \quad (1.3)$$

В биологичните тъкани и в полимерните материали този процес е важен източник на разсеяно лъчение и оказва съществено влияние върху общото отслабване на преминаващия фотонен сноп. Поради това при изследването на радиационно-защитните свойства на PVA–WO<sub>3</sub> полимерни композити Комптоновото разсейване следва да се разглежда като един от механизмите, които определят ефективността на материала, особено при по-високи енергии, където фотоелектричният ефект намалява своя относителен принос.

За разлика от Комптоновото разсейване, при което фотонът губи част от енергията си, при Релеевското разсейване енергията на фотона се запазва, поради което двата процеса се разграничават съответно като нееластично и еластично разсейване [7], [8] [5].

### 1.2.2.1. Релеевско (кохерентно) разсейване;

Релеевското разсейване е кохерентно разсейване на фотон от свързаните електрони на атома, при което фотонът променя посоката си на разпространение, но не губи енергия. Следователно дължината на вълната на разсеяния фотон остава непроменена. Тъй като процесът е кохерентен, между разсеяните вълни се запазва фазова връзка, което позволява възникването на интерференчни ефекти. Поради тази причина Релеевското разсейване допринася към кохерентния сигнал в дифракционни и образни методи, за разлика от Комптоновото разсейване, което формира предимно фон.

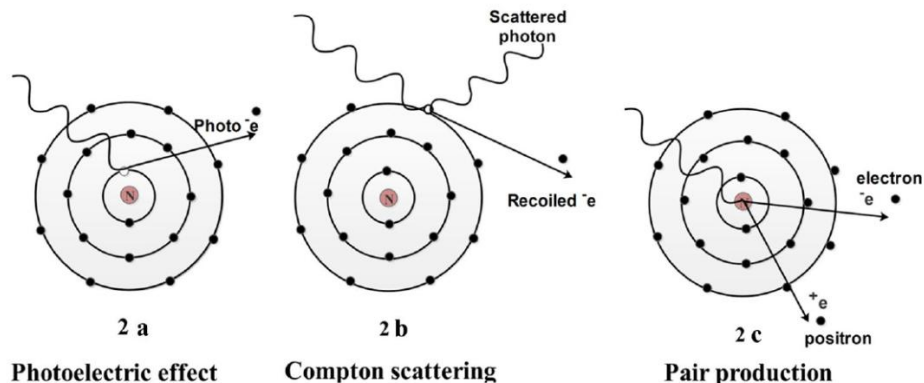
Релеевското разсейване е по-голямо при по-ниски енергии на фотона и при материали с по-висок атомен номер, докато с увеличаване на енергията относителният му принос намалява спрямо некохерентното разсейване. Въпреки че често се счита за по-слаб механизъм в сравнение с фотоелектричния ефект и Комптоновото разсейване, той не е пренебрежим в нискоенергийния диапазон и следва да бъде отчитан при анализ на трансмисията и общото отслабване на лъчението.

### 1.2.3. Образуване на двойки електрон/позитрон;

Раждането на двойка електрон–позитрон представлява процес на взаимодействие, при който високоенергиен фотон се преобразува в електрон и позитрон (фиг. 2 с). За да настъпи този процес, енергията на падащия фотон трябва да бъде по-голяма от сумарната енергия на покой на двете частици, т.е.  $2 \times 0.511 \text{ MeV} = 1.022 \text{ MeV}$ . При взаимодействието фотонът се поглъща напълно, а енергията над праговата стойност се превръща в кинетична енергия на образуваните електрон и позитрон. Сечението за взаимодействие зависи по следния начин от  $Z$  и  $E$ :

$$\sigma_{e^-e^+} \propto Z^2 \ln E \quad (1.4)$$

За спазване на законите за запазване на енергията и импулса е необходимо в процеса да участва и близка заредена частица, която да поеме част от импулса. Обикновено тази роля се изпълнява от атомното ядро, поради което раждането на двойка в ядрено поле е значително по-вероятно, отколкото в полето на атомен електрон. Тъй като този механизъм възниква само при високи енергии, той няма съществен принос при нискоенергийните източници, използвани в настоящата работа, но е важен за пълното описание на взаимодействието на гама-лъчението с веществото [5], [9].



Фиг. 2 Изобразява трите вида взаимодействия на високоенергийни фотони с материята [5]

### 1.3. Отслабване на гама лъчение при преминаване през вещество

При преминаване на Рентгеново или гама-лъчение през вещество интензитетът на фотонния сноп намалява вследствие на взаимодействията между фотоните и атомите на средата. Това отслабване се описва чрез закона на Беер–Ламберт:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.5)$$

където  $I_0$  е интензитетът на падащото лъчение,  $I$  е интензитетът на преминалото лъчение,  $x$  е дебелината на материала, а  $\mu$  е линейният коефициент на отслабване.

#### 1.3.1. Линеен коефициент на отслабване

Линейният коефициент на отслабване  $\mu$  представлява вероятността фотонът да взаимодейства с веществото на единица дължина на пробег. Той зависи както от енергията на фотоните, така и от химичния състав и плътността на материала.

Общият линеен коефициент на отслабване може да бъде представен като сума от приносите на различните механизми на взаимодействие:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (1.6)$$

където:

- $\tau$  е приносът от фотоелектричния ефект;
- $\sigma$  е приносът от Комптоновото разсейване;
- $\kappa$  е приносът от раждането на двойка електрон–позитрон.

В по-пълнен вид към общото отслабване може да бъде включен и приносът от кохерентното (Релеевско) разсейване. Относителният дял на всеки механизъм зависи от енергията на фотоните и от атомния номер на материала. При ниски енергии доминира фотоелектричният ефект, в междинния енергиен диапазон — Комптоновото разсейване, а при високи енергии става възможно раждането на двойка електрон–позитрон.

Линейният коефициент на отслабване се определя като се оцени намаляването на интензитета на лъчението  $I/I_0$  при преминаване през слой с дебелина  $x$  от изследвания материал:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (1.7)$$

При използване на спектрометрични измервания с детектор интензитетите  $I_0$  и  $I$  могат да бъдат определени чрез нетната площ на съответния фото-пик.

### 1.3.2. Масов коефициент на отслабване

Масовият коефициент на отслабване  $\mu_M$  се дефинира като отношението на линейния коефициент на отслабване към плътността на материала:

$$\mu_M = \frac{\mu_L}{\rho} [\text{cm}^2/\text{g}] \quad (1.8)$$

където  $\rho$  е плътността на материала.

Масовият коефициент на отслабване представлява вероятността за взаимодействие на фотоните с веществото на единица масова дебелина. Той е особено полезен при сравнение на различни материали, тъй като елиминира пряката зависимост от плътността и позволява по-коректно съпоставяне на техните отслабващи свойства.

Коефициентите на отслабване зависят силно от енергията на фотоните и от атомния състав на материала. При ниски енергии вероятността за фотоелектричен ефект е висока и нараства с увеличаване на атомния номер  $Z$ . Поради това материали, съдържащи тежки елементи, като волфрам, проявяват по-добри радиационно-защитни свойства в нискоенергийния диапазон. При по-високи енергии и при по-големи атомни номера намалява приносът на фотоелектричния ефект и нараства ролята на Комптоновото разсейване. Това определя необходимостта от внимателен подбор на състава и дебелината на екраниращите материали в зависимост от енергията на използвания източник.

Освен линейния и масовия коефициент на отслабване, за по-пълно характеризиране на радиационно-защитните свойства на материала се използват и слой на полуотслабване и среден свободен пробег.

### 1.3.3. Слой на полуотслабване

Слоят на полуотслабване (Half Value Layer, HVL) представлява дебелината на материала, при която интензитетът на падащото лъчение намалява до половината от началната си стойност:

$$I = \frac{I_0}{2} \quad (1.9)$$

От тук се получава:

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu_L} \quad (1.10)$$

HVL дава ясна представа за необходимата дебелина на материала за редуциране на интензитета с 50%.

### 1.3.4. Среден свободен пробег

Средният свободен пробег (Mean Free Path, MFP) представлява средното разстояние, което фотонът изминава в материала преди да взаимодейства с него. Той се определя чрез:

$$MFP = \frac{1}{\mu_L} \quad (1.11)$$

Този параметър е аналог на периода на полуразпад.

## 1.4. Материали за радиационно отслабване

Материалите за радиационно отслабване играят ключова роля за ограничаване на нежеланото облъчване и произтичащото вредно въздействие на йонизиращите лъчения върху човека и околната среда. Основната им задача е да намаляват интензитета на падащото лъчение чрез поглъщане, разсейване или отслабване, така че дозовото натоварване върху персонала, пациентите и околните обекти да бъде сведено до възможно най-ниски стойности.

Разработването на ефективни екраниращи материали е сложен процес, тъй като трябва едновременно да се съобразят редица фактори, като маса, размери, цена, механични свойства и способност за отслабване на лъчението. Поради това при избора на подходящ защитен материал не е достатъчно да се отчита само неговата

екранираща способност, а и практическата му приложимост в конкретни условия[10].

В общия случай най-предпочитани са материалите с висок атомен номер и голяма плътност, тъй като вероятността за взаимодействие на фотоните е по-голяма, а оттам и способността им да поглъщат/отслабват лъчението е по-висока [10].

#### **1.4.1. Олово като стандарт в практиката**

Сред традиционно използваните материали за радиационно екраниране, най-широко приложение намира оловото. Оловото е утвърдено като референтен материал поради съчетанието от висок атомен номер, висока плътност и сравнително ниска цена. Именно тези характеристики го правят особено ефективно при отслабване на гама- и рентгеновото лъчение и с времето са наложили широкото му приложение. Оловото се използва масово в медицинската радиология, радиотерапията, нуклеарната медицина, промишлените обекти и научноизследователските лаборатории. Освен в защитни средства, като медицински престилки и жилетки, оловото намира приложение и при изграждането на стационарни защитни конструкции – облицовки на стени, подове, тавани и врати, оловно стъкло за наблюдателни прозорци, както и оловни тухли за локална защита около източници с по-висока активност [11].

В медицинската практика, защитните оловни жилетки и престилки, използвани при работа с рентгенови уредби за медицински цели, представляват лични предпазни средства (ЛПС), предназначени да ограничат дозата на йонизиращо лъчение към персонала и пациентите. Техническите изисквания към тези защитни средства се определят от европейски стандарти от серията EN 61331 и от изискванията на европейското законодателство за лични предпазни средства.

Основен параметър на защитното облекло е неговият оловен еквивалент, който характеризира способността на материала да отслабва рентгеновото лъчение. В практиката се използват стойности от 0,25 mm Pb, 0,35 mm Pb и 0,50 mm Pb, в зависимост от нивото на радиационен риск и конкретната клинична процедура.

Материалите, използвани при изработването на защитните жилетки, трябва да осигуряват достатъчна степен на отслабване при енергии на рентгеновото лъчение до 150 kV, без да се нарушава тяхната механична цялост. Конструкцията на изделието следва да гарантира комформално покритие на критичните анатомични области (гръден кош, корем и таз), като при двукомпонентни модели припокриването на предните панели осигурява удвоена защита [12].

CEN. **EN 61331-1:2014**. Protective devices against diagnostic medical X-radiation – Part 1: Determination of attenuation properties of materials. Brussels: European Committee for Standardization, 2014.

CEN. **EN 61331-3:2014**. Protective devices against diagnostic medical X-radiation – Part 3: Protective clothing and protective patient shields. Brussels: European Committee for Standardization, 2014.

#### **1.4.2. Недостатъци на оловото**

Въпреки отличните свойства на отслабване на йонизиращото лъчение, традиционно използвания екраниращ материал – олово има редица съществени недостатъци.

Основният проблем при използването на олово е неговата токсичност. Тя представлява риск както за здравето на човека, така и за околната среда, особено при продължителна експлоатация и наличие на оловен прах по повърхността на защитните средства. Освен това оловните изделия са тежки, обемни и неудобни при продължително носене. Това важи най-вече за защитните престилки и жилетки, които могат да причинят дискомфорт, болки във врата и гърба и да допринесат за мускулно-скелетни увреждания при медицинския персонал [5], [13].

Друг недостатък на оловото е свързан с неговите експлоатационни свойства. С течение на времето материалът може да стане по-крехък, да загуби гъвкавост и да се напука при неправилно съхранение или честа употреба. Появата на пукнатини, отвори и разслояване в защитния слой води до намаляване на екраниращата ефективност и създава зони с недостатъчна защита. Поради това оловните защитни средства изискват периодичен контрол и своевременно подмяна при установяване на дефекти [5], [12].

Поради изброените недостатъци, през последните години се наблюдава засилен интерес към разработването на безоловни алтернативи. Основната цел е да се запази високата степен на защита от йонизиращи лъчения, като едновременно с това се намалят теглото, токсичността и неудобството при употреба. В тази насока се разработват композитни и многослойни материали, които предлагат по-добра ергономичност и безопасност, без съществен компромис в защитните характеристики, което е и в основата на настоящата дипломна работа [5], [13].

#### **1.5. Полимерни матрици**

Полимерите, легирани с частици с висок атомен номер, са перспективен клас материали за защита от йонизиращи лъчения, като интересът към тях нараства във връзка с необходимостта от разработване на безоловни и екологично безопасни

екраниращи системи. Това се обуславя от токсичността на оловото и стремежа към създаване на материали, които съчетават добра защитна ефективност с по-ниско тегло и по-добри експлоатационни характеристики [14].

По своята същност полимерите са високомолекулни съединения, изградени от повтарящи се структурни звена, свързани във верижни молекули. Те се характеризират с ниска плътност, добра механична устойчивост, гъвкавост, лесна се обработват и имат сравнително ниска себестойност [14], [15]. Освен това полимерните материали са стабилни в широк температурен интервал и изискват ограничена поддръжка, което ги прави подходящи за приложение в медицината и техниката [10].

Особено значение за радиационното екраниране имат полимерните композити, при които към полимерната матрица се добавят пълнители с висока плътност или висок атомен номер. Чрез подобна модификация се подобряват отслабващите свойства на материала спрямо рентгеново и гама-лъчение, като същевременно се запазват предимствата на полимерната основа. В зависимост от използваните примеси е възможно да се повишат не само екраниращите характеристики, но и механичната здравина, топлинната устойчивост и дълготрайността на материала [15], [16].

Съществено предимство на полимерните композити е възможността да осигурят ефективна защита от йонизиращи лъчения при значително по-ниска маса в сравнение с традиционните оловни материали. Поради това те се разглеждат като подходяща алтернатива за изработване на съвременни защитни средства, при които освен висока екранираща способност се изискват също безопасност, ергономичност и комфорт при продължителна употреба [10].

### **Видове полимерни матрици**

Материалите за защита от йонизиращи лъчения на базата на синтетични полимери привличат значително внимание поради своята устойчивост на корозия, висока термична стабилност, отлична гъвкавост и лесна обработка. Освен това, леката им структура и относително ниската токсичност правят синтетичните полимери особено подходящи за производството на материали за радиационна защита, които могат да се носят.

За тази цел в последните години се изследват различни полимери, включително епоксидна смола (EP), полиетилен (PE), полимлечна киселина (PLA), полидиметилсилоксан (PDMS) и поли(винилов алкохол) (PVA). Тези материали са широко използвани в разработването на гъвкави и преносими системи за защита от йонизиращи лъчения [17].

### **1.5.1. Епоксидни смоли (EP)**

Епоксидните смоли са едни от най-широко използваните термореактивни полимери при получаването на композитни материали, включително и за приложения в областта на защита от йонизиращи лъчения. Те се отличават с ниско тегло, добра технологичност и възможност за оформяне в различни форми, което улеснява използването им в разнообразни конструкции. Освен това, епоксидните полимери притежават добри механични свойства, висока якост, ниско свиване при втвърдяване, добра размерна стабилност и устойчивост на химична и корозионна среда. Като матрица в композитите, епоксидът допринася за повишаване на твърдостта, здравината и дълготрайността на крайния материал. При модифициране с пълнители с висок атомен номер е възможно значително подобряване на екраниращите свойства на епоксидните композити спрямо рентгеново и гама-лъчение.

Поради съчетанието от добри механични характеристики, малка маса и възможност за подобряване на радиационнозащитните свойства, епоксидните композити се разглеждат като перспективни материали за съвременни защитни приложения [15], [18].

### **1.5.2. Полиетилен (PE)**

Полиетиленът е широко използван материал в защита от йонизиращи лъчения, особено при защита от неутронно лъчение. Това се дължи на съчетанието от ниско тегло, малък обем, добра химична устойчивост и способност ефективно да забавя неутроните [19]. Високото съдържание на водород в структурата му определя добрите му модериращи свойства, тъй като улеснява разсейването и намаляването на енергията на падащите неутрони.

Поради това, полиетиленът се разглежда като подходяща основа за създаване на защитни материали. При въвеждане на неорганични функционални пълнители в полиетиленовата матрица могат допълнително да се подобрят както екраниращите характеристики, така и механичните свойства на получения композит [20].

### **1.5.3. Полимлечна киселина (PLA)**

PLA (полимлечна киселина) е биоразградим полимер от групата на алифатните полиестери, който се разглежда като екологична алтернатива на традиционните синтетични полимери. Той се получава от възобновяеми ресурси, а продуктите от неговото разграждане са нетоксични и безопасни за човека и околната среда [21]. Въпреки че PLA се характеризира с по-висока крехкост и по-ниска термична устойчивост, неговите свойства могат да бъдат подобрени чрез добавяне на подходящи пълнители и оптимизиране на условията на обработка. В областта на

защитата от йонизиращи лъчения PLA е перспективна полимерна матрица за получаване на композити с подобрени екраниращи свойства.

При добавяне на пълнители с висок атомен номер може да се повиши способността му да отслабва рентгеново и гама-лъчение, което го прави подходящ за разработване на по-леки и екологично по-безопасни защитни материали [22].

#### **1.5.4. Полидиметилсилоксан (PDMS)**

PDMS (полидиметилсилоксан) е широко използван органосилициев полимер, който се отличава с ниска токсичност, еластичност и лесна технологична обработка. Благодарение на високото си съдържание на водород той е подходящ материал за защита от неутронно лъчение, тъй като може ефективно да участва в забавянето и поглъщането на неутрони. Освен това PDMS притежава добра гъвкавост и биосъвместимост, което го прави подходящ за приложение в медицински, индустриални и ядрени среди [23].

Основното ограничение на PDMS като радиационнозащитен материал е свързано с ниския му атомен номер, поради което самостоятелно той е по-слабо ефективен срещу високоенергийно гама- и рентгеново лъчение. За преодоляване на този недостатък към полимерната матрица могат да се добавят пълнители с висок атомен номер, като желязо, волфрам или олово. По този начин се получават композити с подобрени екраниращи свойства, които съчетават гъвкавостта и безопасността на PDMS с по-висока ефективност на радиационна защита [5], [16], [23].

#### **1.5.5. Поливинилов алкохол (PVA)**

PVA (поливинилов алкохол) е термопластичен, водоразтворим полимер, който привлича значителен интерес при разработването на композитни материали за радиационна защита. Това се дължи на съчетанието от ниска токсичност, неканцерогенен характер, добра биосъвместимост, висока механична якост и гъвкавост [24]. Освен това PVA притежава добра термична устойчивост, химична стабилност и способност за лесно формиране на слоеве, което го прави подходящ за различни технологични приложения, включително в медицинската и защитната техника [5], [25].

Съществена особеност на PVA е наличието на голям брой хидроксилни групи в неговата структура. Те определят добрата му способност за образуване на водородни връзки и добрата му съвместимост с различни органични и неорганични добавки. Благодарение на това полимерът може да взаимодейства ефективно с пълнители и да осигурява тяхното по-хомогенно разпределение в матрицата, което

е важно условие за получаване на композити с равномерни свойства и надеждна екранираща способност [26]. Добрата съвместимост на PVA с пълнители с висок атомен номер, съчетана с неговата лесна обработка, безопасност и възможност за модифициране, го определя като перспективен материал за разработване на съвременни радиационнозащитни композити, при които наред с екраниращата ефективност се търсят също биосъвместимост, гъвкавост и надеждност [24].

## **1.6. Неорганични пълнители**

Добавянето на метали с висок атомен номер  $Z$  или метални съединения в полимерна матрица значително подобрява отслабването на йонизиращото лъчение. Материалите с висок атомен номер показват по-голяма вероятност за взаимодействие на фотони, което води до по-висок коефициент на отслабване. В литературата най-често докладваните метали са Бисмут (Bi), Барий (Ba) и Волфрам (W) [5].

### **1.6.1. Бисмут (Bi)**

Бисмутът е тежък метал с атомен номер 83 и плътност, близка до тази на оловото, което го прави подходящ кандидат за безоловна защита от йонизиращи лъчения. Поради тези причини професионални организации в областта на медицинската физика, включително Американската асоциация на физиците в медицината (AAPM), са публикували становища, в които се препоръчва при оптимизация на пациентската доза да се разглеждат и алтернативни стратегии спрямо използването на екрани от бисмут. В областта на медицината, бисмутовите защитни предпазители са изследвани и като средство за намаляване на дозата при компютърна томография, особено за предно разположени радиочувствителни органи като млечните жлези, очната леща и щитовидната жлеза. Наред с докладваното дозово намаляване, в литературата обаче се обсъждат и недостатъци, свързани с възможни артефакти и промени в качеството на изображението, както и влияние върху автоматичния контрол на експозицията и модулацията на тока на тръбата.

В индустриални и лабораторни условия бисмутът също е разглеждан като по-безопасна алтернатива на оловото за рутинна персонална защита, с аргумент за сравнима или дори малко по-добра екранираща ефективност при определени енергийни диапазони. В Националната лаборатория Лос Аламос са направили проучване за ползите и разходите от замяната на оловото с бисмут за рутинна защита на персонала от радиоактивни източници. Желателно е пълното елиминиране на оловото в работната среда, особено в ядрените съоръжения. Въпреки че бисмутът не се счита за канцероген, при високи дози и при вдишване/поглъщане на негови съединения са възможни рискове, а поради

крехкостта му в практиката често се използват композитни материали (напр. полимери с  $\text{Bi}$ -пълнители) [14], [17].

### 1.6.2. Барий (Ba)

Барият е широко разпространен сребърно-бял метал, който обикновено се среща в съединения (напр. в баритни руди). В областта на защита от йонизиращи лъчения интерес представляват предимно неговите съединения, най-вече бариевият сулфат ( $\text{BaSO}_4$ ), разглеждан като безоловна и по-екологична алтернатива на оловните престилки.

Бариеви съединения се използват и за получаване на безоловно екраниращо стъкло (например със  $\text{BaCO}_3$ ), при което увеличаването на съдържанието на барий повишава коефициентите на отслабване за гама-лъчение (напр. 662 keV). Допълнително, двуслойни композити  $\text{BaSO}_4$ –  $\text{BaCO}_3$  са докладвани като леки и удобни защитни решения с добра ефективност спрямо стандартни изделия с 0.5 mm Pb-еквивалент [14].

### 1.6.3. Волфрам (W)

Волфрамът (W) е материал с голям атомен номер ( $Z = 74$ ) и с много висока плътност ( $\approx 19.25$ – $19.3 \text{ g/cm}^3$ ), което го прави една от най-разглежданите безоловни алтернативи за радиационна защита. В обзорите по тази тема волфрамът се посочва като ефективен избор за компактни екрани, тъй като високият атомен номер и голямата плътност водят до повишено отслабване на фотонното лъчение [14], [15], [17], [27].

В практиката, волфрамът често се използва под формата на прах/частици, внедрени в полимерни матрици, за да се съчетаят екранираща способност и добра технологичност (гъвкавост, лесна обработка). Показателен пример е “волфрамова функционална хартия” с 80% волфрамов прах и 20% целулоза, при която седем слоя с дебелина около 0.3 mm демонстрират пълно екраниране при 50 kVp, като материалът може да се реже и сгъва. Отбелязва се и значението на размера на частиците, тъй като по-фините пълнители могат да подобрят уплътняването и ефективната плътност на композита, а това влияе директно върху отслабването. Също така се подчертава ролята на теоретичните модели и Monte Carlo симулациите като инструмент за проверка и прогнозиране на екраниращите свойства на композитните материали [17], [25].

Поради високата ефективност на волфрам-базираните системи и по-добрата им приложимост като пълнители в полимерни матрици, особено внимание в литературата се отделя на волфрамовите съединения, и най-вече на волфрамовия триоксид ( $\text{WO}_3$ ), който е широко използван функционален пълнител за защита от йонизиращи лъчения.

### **1.6.3.1. Волфрамов триоксид ( $WO_3$ )**

Волфрамовият триоксид ( $WO_3$ ) е сред най-изследваните високо-атомни пълнители, тъй като съчетава изразени функционални свойства с широк спектър от приложения. Материалът е добре познат в области като газови сензори, електрохромни и оптични устройства, фотокатализа и защитни покрития, а характерният му жълт цвят обуславя употребата му и като пигмент [22], [27].

От гледна точка на защита от йонизиращи лъчения,  $WO_3$  представлява особено интересен пълнител поради високия атомен номер на волфрама и сравнително високата плътност на съединението, което води до ефективно отслабване на фотонно лъчение. Ефектът е най-съществен в нискоенергийния диапазон, където фотоелектричният ефект има доминиращ принос към взаимодействието на фотоните с веществото, поради което  $WO_3$  често се разглежда като перспективна безоловна алтернатива при разработването на екраниращи композити за нискоенергийни рентгенови и гама-лъчи [22].

Допълнително предимство е възможността  $WO_3$  да се внедрява в полимерни матрици под формата на микро- или наночастици, което подпомага получаването на по-хомогенни композити и позволява оптимизация на масата и механичните характеристики на крайния материал. В литературата се посочва, че добавянето на  $WO_3$  към полимери, включително PVA, може да подобри не само екраниращите свойства, но и част от физичните параметри на композита (например термични, механични и оптични), което е важно при разработване на гъвкави защитни слоеве [25].

## **1.7. Методи за определяне на линейния коефициент на отслабване на лъчението при преминаване през дадено вещество**

Наред с избора на подходящ легиращ агент, съществено значение за коректната оценка на радиационно-защитните свойства има и експерименталната методика за определяне на коефициента на отслабване, която в различни публикации се реализира чрез различни типове детектори и измервателни геометрии.

### **1.7.1. Метод с Гайгер–Мюлеров брояч (GM counter)**

При този подход интензитетът се оценява чрез скорост на броене на детектора без и с проба. GM броячът има проста електроника и висока чувствителност, но не дава енергийна информация (не позволява спектрометрия). Поради това, методът е подходящ основно за сравнение на общото отслабване при сравнително стабилна геометрия и когато разсейването е добре контролирано. Недостатък е, че измерването може да включва и разсеяни фотони, ако колимацията е недостатъчна [28].

### 1.7.2. Сцинтилационни детектори NaI(Tl)

NaI(Tl) детекторите позволяват спектрометрия, т.е. отделяне на фото-пик и определяне на  $I$  от нетната площ на пика или скоростта на броене в него. Енергийната резолюция е по-ниска от тази на свръх чувствителен германие детектор (HPGe), но е достатъчна за много  $\gamma$ -източници (например 59.5 keV, 662 keV). Чрез работа с фото-пика се намалява влиянието на разсеяното лъчение и линейния коефициент на отслабване може да се получи по-надеждно в сравнение с GM брояч, особено при добре реализирана теснолъчева геометрия [22], [27].

### 1.7.3. Йонизационна камера (ionization chamber)

Йонизационната камера измерва не броя фотони, а йонизационния заряд, който е пропорционален на експозиция/въздушна керма при дадено качество на лъча. В този случай  $I_0$  и  $I$  се заменят с измерени величини като  $K_0$  и  $K$  и се използва:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{1}{x} \ln \left( \frac{K_0}{K} \right) \quad (1.12)$$

където  $\mu_{\text{eff}}$  е **ефективният линеен коефициент на отслабване**,  $K_0$  е въздушната керма без образец, а  $K$  е въздушната керма след преминаване на лъчението през материала с дебелина  $x$ .

Този метод е широко използван при диагностични рентгенови лъчи (kVp), включително при оценка на защитни материали, защото е стабилен, дава добра повторемост и е пряко свързан с дозиметрични величини. Поради полихроматичния спектър на рентгеновата тръба често се определя ефективен коефициент на отслабване за дадено качество на лъча (kVp + филтрация) [29].

### 1.7.4. Метод с HPGe (свръхчувствителен германиев детектор)

HPGe детекторът има много висока енергийна резолюция, което позволява надеждно отделяне на фото-пика на избраната  $\gamma$ -линия. Интензитетът се определя от нетната площ на фото-пика, разделено на „живото“ време за измерване:

$$I = \frac{A}{t}, I_0 = \frac{A_0}{t_0} \quad (1.12)$$

където  $A$  и  $A_0$  са нетните площи на фото-пика съответно при наличие и при отсъствие на образец, а  $t$  и  $t_0$  са съответните времена на измерване.

След това  $\mu_L$  се намира чрез:

$$\mu_L = \frac{1}{x} \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) = \frac{1}{x} \ln \left( \frac{A_0 t}{A t_0} \right) \quad (1.13)$$

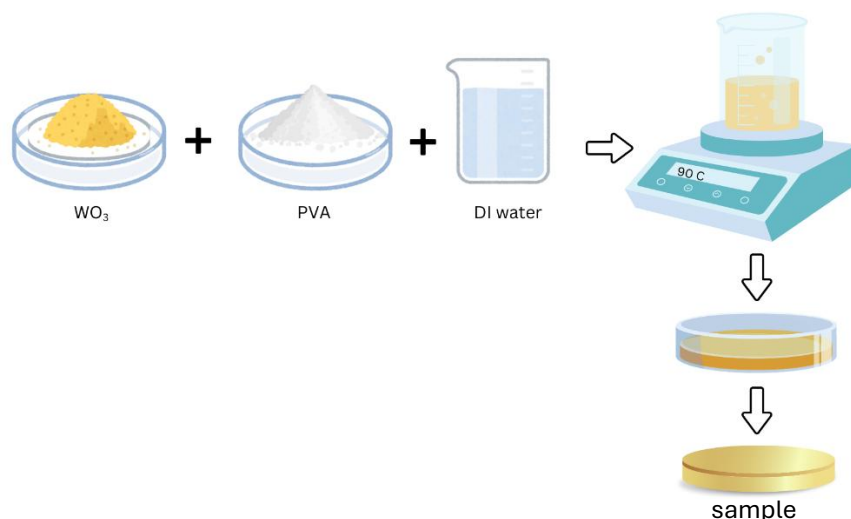
Основното предимство на HPGe е, че минимизира влиянието на фона и разсеяната компонента (при подходяща колимация), което го прави особено подходящ за прецизно определяне на  $\mu$  при конкретни енергии и за сравнение с таблични данни (напр. XCOM) [30].

В обобщение, макар оловото да остава референтен материал за защита от йонизиращи лъчения поради високата си екранираща ефективност, неговата токсичност и екологичните ограничения стимулират разработването на безоловни решения. Литературните данни показват, че волфрамовият триоксид, благодарение на високия атомен номер на волфрама и добрата му съвместимост с полимерни матрици, се утвърждава като една от най-надеждните и перспективни алтернативи за радиационно-защитни композити, особено в нискоенергийния диапазон. На тази основа в настоящата работа се поставя акцент върху получаването и изследването на PVA – WO<sub>3</sub> композити и оценката на техните екраниращи и физикомеханични характеристики.

## II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЧАСТ

### 2.1. Получаване на полимерни композити от PVA и легирани с $WO_3$

Полимерните композити от PVA, както и PVA, легирани с  $WO_3$  наночастици са получени по следния начин: Предварително е изчислена каква част от всеки компонент е необходима, а именно PVA на прах, наночастици от  $WO_3$  и дейонизирана вода като разтворител. Всеки компонент е претеглен на микровезна и поставен в общ съд. Така получената смес е поставена в нагриваща се магнитна бъркалка на средна мощност и температура  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . Разбъркването продължава около 6 часа, като е възможно необходимост от увеличаване на времето до съгъстяване на сместа. След получаването на хомогенен разтвор, сместа се излива в петрита, като в зависимост от желаната дебелина се излива необходимото количество. Така подготвените образци се оставят да съхнат на стайна температура за 24 часа (или по-дълго при необходимост) до напълното изпарение на водата. Фигура 3 показва нагледно процеса.



**Фиг 3.** Схема на метод за получаване на полимерни композити от PVA и  $WO_3$

Получените образци от PVA и легирани с  $WO_3$  са обозначени, както следва:

PVA – чист полимер поливинилов алкохол

PVA/ $WO_3$  (33wt%) – полимер легиран с 33 тегловни процента  $WO_3$

PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%) – полимер легиран с 50 тегловни процента WO<sub>3</sub>

## 2.2. Изследване на лъчезащитни свойства на полимерните композити

За провеждането на експеримента е използван р-тип коаксиален свръхчист германиев детектор. Източниците на йонизиращо лъчение са <sup>241</sup>Am и <sup>152</sup>Eu като техните активности снети от сертификата и активността по време на провеждане на експериментите са посочени в следната таблица 1.

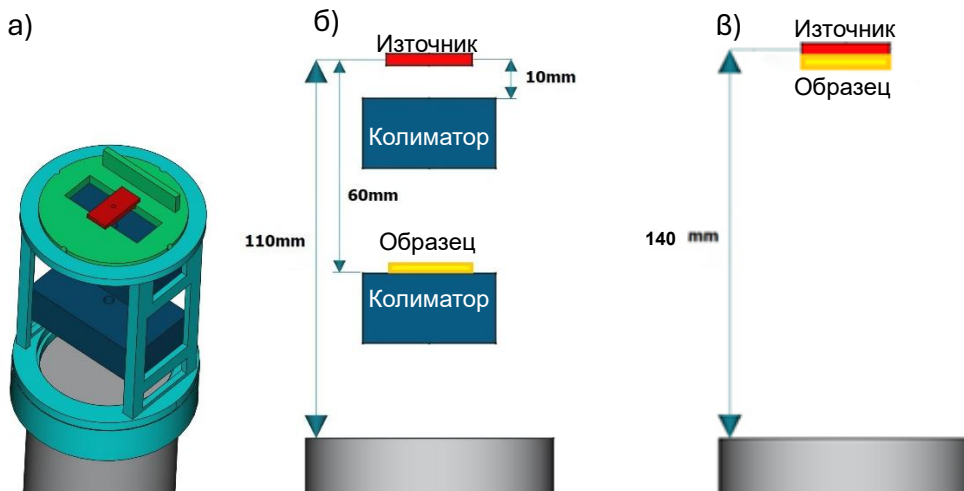
Дата	A ( <sup>241</sup> Am), kBq	Референтна дата	A ( <sup>152</sup> Eu), kBq
01.06.1976	423	28.02.2006	450.8
02.2026	390.6	02.2006	162.2

**Таблица 1.** *Активности на използваните радиоактивни източници с референтни дати от сертификатите и по време на измерването*

В изготвената дипломна работа са реализирани два модела на опитната постановка – с колиматор и без колиматор. При постановката с колиматор се формира успореден сноп, а добре дефинираните граници на снопа позволяват добра възпроизводимост при пролъчване на образеца и формиране на петно с желаните от нас размери, което е предимство при наличие на нехомогенности. Сред недостатъците на тази постановка са по-ниската статистика и по-високата чувствителност към позиционирането на източника спрямо колиматора, тъй като е необходимо отворите на двата колиматора да бъдат строго колинеарни, а източникът да бъде разположен по оста на отворите, за да се осигури прецизно колимиране на снопа.

При опитната постановка без колиматор се постига значително по-добра статистика и не се изисква съгласуване при позиционирането на двата колиматора. Нейните недостатъци са свързани с по-малкия размер и недобрата възпроизводимост на петното на снопа, както и с наличието на по-голям пространствен ъгъл, което води до по-голям принос на Комптъновото разсейване. Освен това, когато източникът е разположен непосредствено до образеца, малкият размер на петното повишава чувствителността на измерването към локални нехомогенности на образеца, като неравномерно разпределение на частиците и вариации в дебелината.

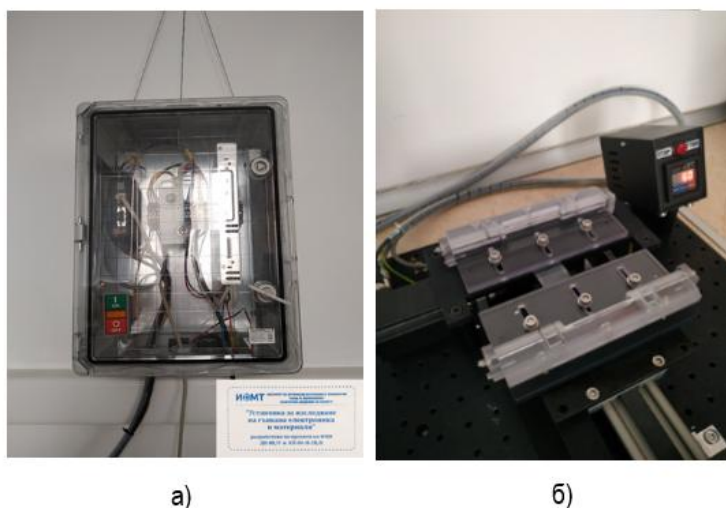
Опитната постановка (Фиг. 4) се състои от два колиматора с дебелина 20 мм и диаметър на отвора , при наличието на колиматор разстоянието между източника и детектора е 110 мм, а при отсъствието на колиматор разстоянието се увеличава на 140 мм.



**Фиг. 4** Схема на използваната опитна постановка, а) триизмерен изглед на схема с колиматор, б) двуизмерен изглед на схема с колиматор, в) двуизмерен изглед на схема без колиматор

### 2.3. Изпитване на способностите за огъване на полимерни композити от PVA и WO<sub>3</sub>

За тестването на способността на огъване на получените образци е използвана лабораторно направена компютъризирана система за огъване с контролна платформа ESP301 (Нюпорт, Ървайн, Калифорния, САЩ) и функция за симулиране на огъване при различни радиуси, представена на фиг. 5:



**Фиг. 5** Компютъризирана система за огъване: а) пулт за включване, б) настройка за многократни огъвания с помощта на брояч.

По време на експериментите, тестваните образци бяха фиксирани хоризонтално между две скоби и пробите бяха огънати чрез изтласкване на двете скоби до получаването на определен радиус на огъване (фиг. б).

Радиусът на огъване  $R$  е определен чрез измерване на дължината на пластинката  $l$  и на големината на отвора  $c$  на огъващата платформа съгласно следната формула:

$$R = \sqrt{\frac{l^3}{24(l-c)}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{l^3}{6(l-c)}} \quad (2.1)$$

Получените образци бяха огънати 500 пъти, като радиусът на огъване изчислен по формула (2.1) е 10.5 mm.

## **2.4. Методи за характеризирание на слоеве от полимерни композити от PVA и WO<sub>3</sub>.**

### **2.4.1. XRD на слоеве от полимерни композити от PVA и WO<sub>3</sub>**

За XRD измерванията е използван дифрактометър Bruker D8 Advance с излъчване Cu K $\alpha$  (1.54056Å) и детектор LynxEye (Bruker Corporation, Billerica, MA, САЩ) в рамките на  $2\theta$  от 5,5 до 80° и постоянна стъпка 0,02°- 0,03°. Идентификацията на кристалната фаза е извършена с EVA Diffract-plus, използвайки базата данни ICDD-PDF2.

### **2.4.2. TEM на слоеве от полимерни композити от PVA и WO<sub>3</sub>**

Морфологията и фазата на наночастици от WO<sub>3</sub> са изследвани с JEOL JEM 2100 Transmission Electron Microscope. Наночастиците се интегрират в дейонизирана вода и се накапват върху стандартни медни TEM мрежи. Микроскопските модели, които са използвани за анализа са – Bright-Field Transmission Electron Microscopy (BF TEM), Selected Area Electron Diffraction (SAED) and High Resolution Transmission Electron Microscopy (HR TEM).

#### **2.4.3. AFM на слоеве от полимерни композити от PVA и WO<sub>3</sub>**

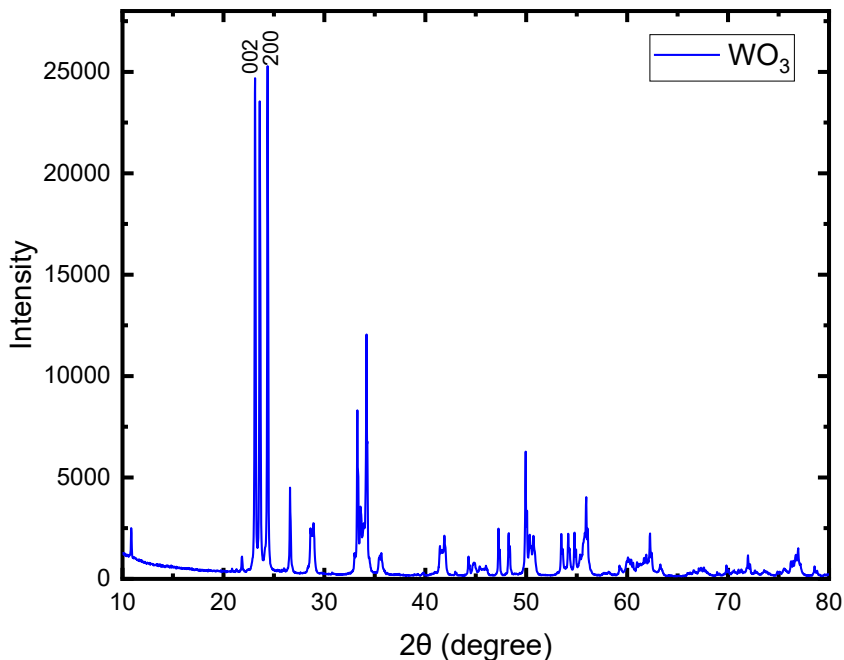
Топографията на повърхността и грапавостта на израстващите слоеве беше изследвана с помощта на атомно-силов микроскоп MFP-3D (Asylum Research, Oxford Instruments, NanoAnalysis 25,2 мили, High Wycombe, UK).

#### **2.4.4. SEM на слоеве от полимерни композити от PVA и WO<sub>3</sub>**

Морфологията на повърхността и елементният анализ бяха изследвани чрез сканиращ електронен микроскоп JEOL IT800SHL (Токио, Япония), оборудван с in-lens и in-chamber детектори за обратно разсеяни и вторични електрони, както и с два енергодисперсионни спектрометра.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ И РЕЗУЛТАТИ

#### 3.1. XRD анализ на частиците от $WO_3$

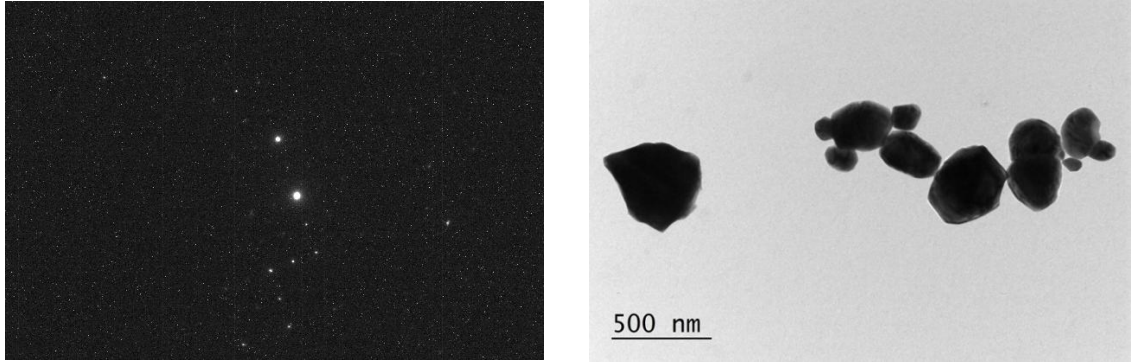


Фиг. 6 XRD спектър на наночастици от  $WO_3$

Рентгенофазовият анализ потвърждава наличието на високочиста моноклинна  $\gamma$ -фаза на  $WO_3$ , характеризираща се с отчетлив триплет от рефлексии (002), (020) и (200) (фиг. 6). Острите пикове и изчисленият чрез уравнението на Шерер среден размер на кристалитите ( $\sim 42 - 45$  nm) показват нанокристална структура с висока степен на кристалност. Високата относителна интензивност на равнината (200) предполага предпочитана ориентация на растеж на кристалите в направление [100].

#### 3.2. TEM анализ на наночастици от $WO_3$

При направения TEM анализ и дифракционната картина (фиг. 7 а) е доказано наличие на частици от  $WO_3$ . След определянето на тяхната големина е потвърдено, че наночастиците са със средна големина  $61 \pm 22.8$  nm. (фиг. 7 б).

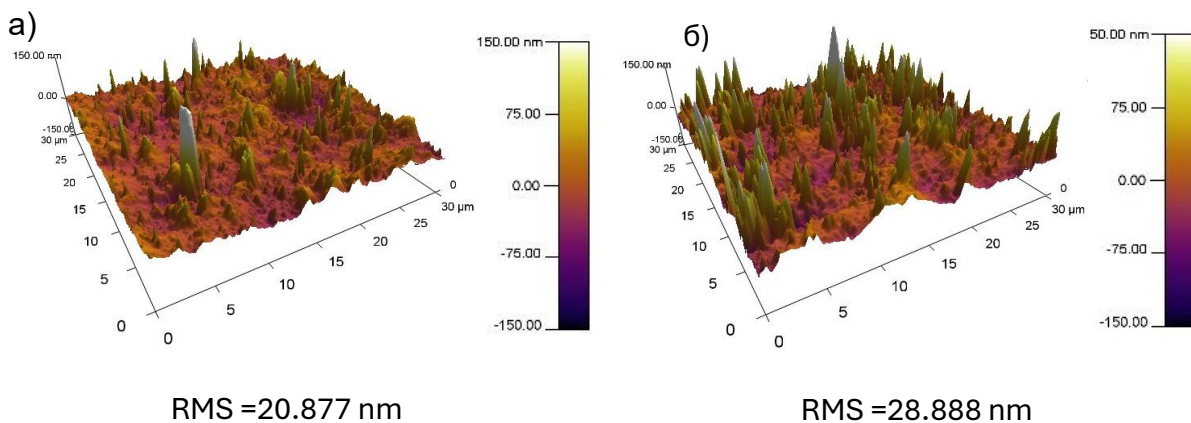


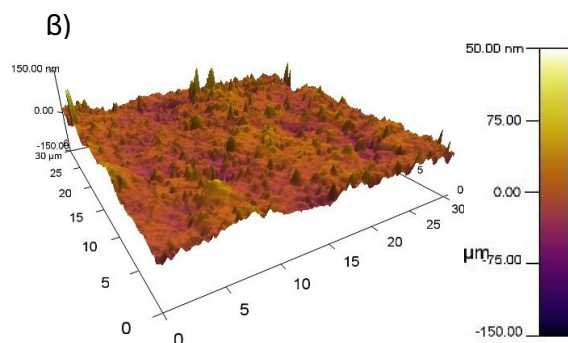
Фиг. 7 а) дифракционна картина , б) TEM снимка на наночастици от  $WO_3$

### 3.3. Морфологичен анализ на получените композити

#### 3.3.1. AFM анализ

Морфологията на повърхността на слоевете е анализирана с помощта на AFM метод с площ на сканиране  $30 \times 30 \mu m^2$ . AFM изображенията (фиг. 8 а), б),в) ) на PVA/ $WO_3$  (33wt%) в PVA полимерен композит преди и след огъване и след облъчване с йонизиращ източник са показани на Фиг. 8. Повърхността на получените слоеве е сравнително гладка, с грапавост  $< 33 \text{ nm}$ . Наблюдава се леко увеличаване на грапавостта след огъване на композита 500 пъти, както и изглаждане на повърхността след пролъчване с йонизиращ източник. Измерената средна квадратична грапавост (RMS - *Root mean square*) на композитите от PVA с PVA/ $WO_3$  (33wt%) и PVA/ $WO_3$  (50wt%) преди огъване, след огъване и след облъчване са представени в таблица.





RMS = 13.706 nm

**Фиг. 8** Триизмерни AFM снимки и тяхната средна квадратична грапавост на а) образец преди огъване, б) образец след огъване, в) образец след пролъчване

Образец	RMS [nm] Преди огъване	RMS [nm] След огъване	RMS [nm] След облъчване
PVA/33.3% wt WO <sub>3</sub>	20.877	28.888	13.706
PVA/50% wt WO <sub>3</sub> ,	30.928	32.575	22.675

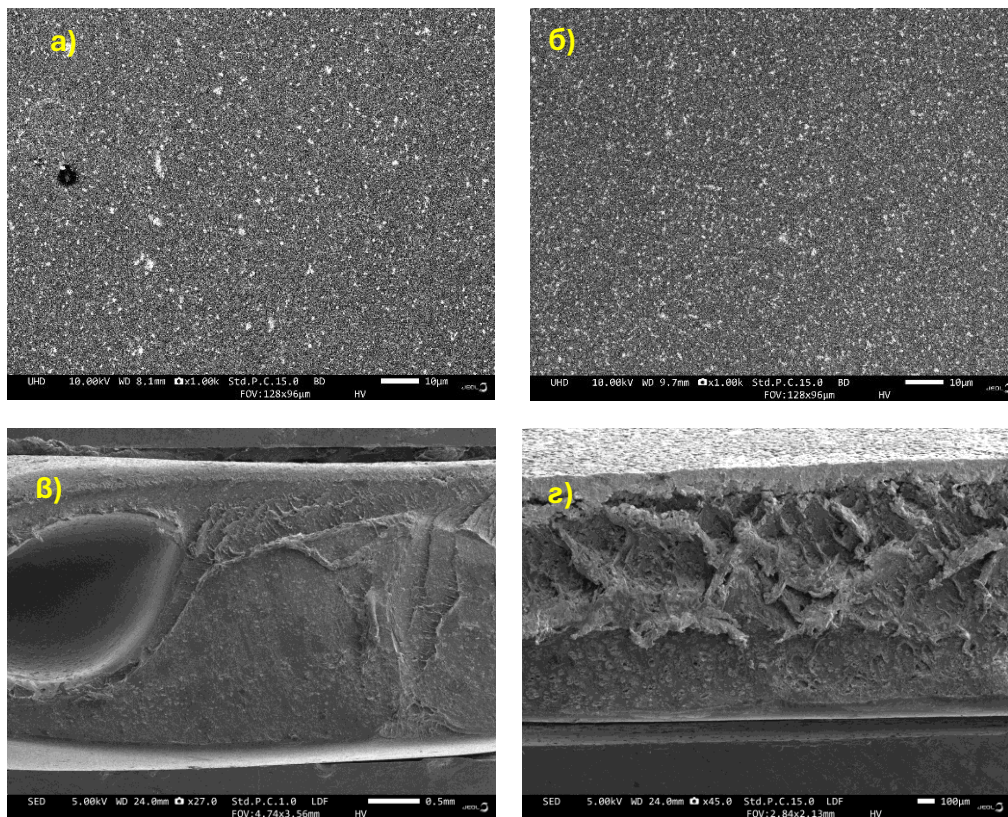
**Таблица 2.** Средна квадратична грапавост на PVA/WO<sub>3</sub> (33wt%) и PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%) преди огъване, след огъване и след пролъчване

Наблюдава се очаквана тенденция на увеличаване на RMS след огъване и за двете изследвани концентрации на WO<sub>3</sub> в PVA матрицата (таблица. 2). Облъчването с йонизиращо лъчение води до намаляване на rms и за двете изследвани концентрации, което е в съгласие с литературни данни за полимерни и полимер-композитни системи. При PVA-базирани нанокompозити е докладвано, че AFM отчита намаляване на повърхностната грапавост след облъчване [31]. В литературата този резултат най-често се обяснява с радиационно индуцирано образуване на връзки между полимерните вериги и/или уплътняване на полимерната матрица, което води до „изглаждане“ на повърхността [32].

### 3.3.2. SEM анализ

От направения SEM анализ се вижда, че при композита с PVA/WO<sub>3</sub> (50 wt%) наночастиците са равномерно разпределени. Направен е и EDS анализ на белите участъци (петна), които потвърждава, че това са наночастици от WO<sub>3</sub>. Същият анализ бе направен и за PVA/WO<sub>3</sub> (33 wt%) като от снимката (фиг. 9 а)) се забелязва, че наночастиците са се групирани и не са толкова хомогенно разпределени, както при образца с PVA/WO<sub>3</sub> (50 wt%) (фиг. 9 б)). Направена е снимка на напречен разрез (Cross section) на същите образци като при образец PVA/WO<sub>3</sub> (50 wt%) (фиг. 9 г)) се забелязва наличие на микро пори. Докато при PVA/WO<sub>3</sub> (33 wt%) (фиг. 9 в)) има един

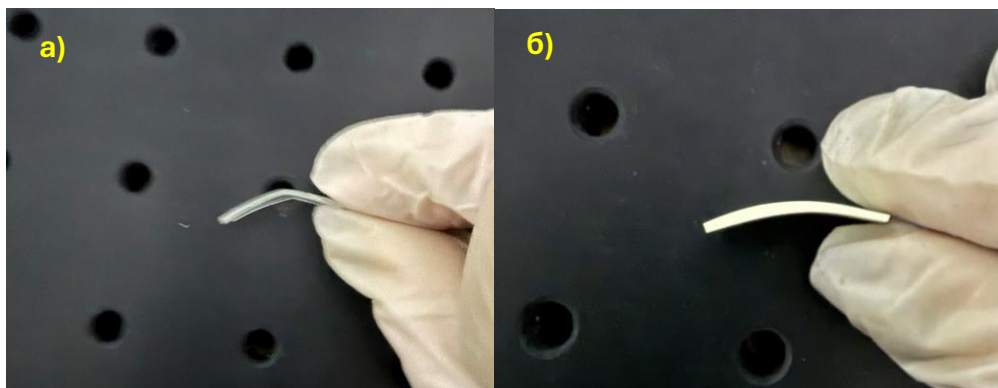
по-голям участък, които е единичен случай и не се забелязва наличие на микропори.



**Фиг. 9** SEM изображения на а)  $PVA/WO_3$  (33 wt%) и б)  $PVA/WO_3$  (50 wt%)  
Cross section на а)  $PVA/WO_3$  (33 wt%) и б)  $PVA/WO_3$  (50 wt%)

### 3.4. Способност за огъване на полимерни композити от PVA- $WO_3$

Способността за огъване е изследвана за гъвкави полимерни композити от PVA- $WO_3$  образци при прилагане на напрежение на опън. Композитите са огъвани 500 пъти, като преди и след огъването е направен анализ на повърхността с атомно силов микроскоп. Не се наблюдават микропукнатини и деформация на образците. За няколко секунди композитите възвръщат първоначалното си състояние. Добавянето на  $WO_3$  легиращ агент подобрява способността за огъване на PVA. На снимките (фиг. 10 а), б) се вижда, че чистият полимер претърпява деформация след огъване от 500 пъти, а полимерният композит е възвърнал първоначалната си форма.



Фиг. 10 Снимка на образци след огъване 500 пъти, а) PVA, б) PVA/WO<sub>3</sub> (33wt%)

### 3.5. Изследване на лъчезащитни свойства на полимерни композити

#### 3.5.1. Теоретична оценка масовия коефициент на отслабване

Стойностите за масовия коефициент на отслабване са определени с помощта на NIST XCOM – веб-базирана програма на Националния институт по стандарти и технологии на САЩ (NIST), която изчислява сечения на взаимодействие (cross sections) и коефициенти на отслабване на фотони (X-ray, gamma) за елементи, съединения и смеси. Инструментът покрива енергии от 1 keV до 100 GeV, включвайки фотоелектричен ефект, Комптоново и кохерентно разсейване и образуване на двойка електрон/позитрон. NIST XCOM позволява определяне на масовия коефициент на отслабване  $\mu_M$  само за дискретни стойности на енергията на фотоните. Поради това, за оценка на  $\mu_M$  при конкретните енергии, използвани в настоящото изследване – 59.5 keV (<sup>241</sup>Am), 121.53 keV (<sup>152</sup>Eu), 244.02 keV (<sup>152</sup>Eu) и 344.24 keV (<sup>152</sup>Eu) – е необходимо стойностите, извлечени от базата данни, да бъдат интерполирани по следната формула:

$$\mu_{ME_3} = \frac{(\mu_{ME_2} - \mu_{ME_1})}{E_2 - E_1} (E_3 - E_1) + \mu_{ME_1} \quad (3.1)$$

Като стойностите  $E_1$  и  $E_2$  са взети от базата данни, а стойността за  $E_3$  е тази, която е необходимо да се изчисли. За енергиите е валидно следното неравенство  $E_1 < E_3 < E_2$ .

В настоящата дипломна работа за теоретично сравнение с експериментално определените стойности е използван масовият коефициент на отслабване без кохерентно разсейване. Този избор е обусловен от факта, че при кохерентното разсейване фотонът променя посоката си, но запазва енергията си, както и от утвърдената практика в литературата при анализ на WO<sub>3</sub>-съдържащи защитни композити да се използват именно стойностите без кохерентно разсейване. [33], [34] За конкретната експериментална постановка това приближение е допълнително

обосновано, тъй като измерванията са извършени с HPGe детектор чрез анализ на пика на пълно поглъщане, при който се регистрират не само неразсеяни фотони от първичното невзаимодействало лъчение, но и фотони, претърпели кохерентно разсейване. Наред с това, изследваните образци са сравнително тънки, което ограничава вероятността за многократно разсейване и намалява влиянието на вторичното излъчване върху измерения сигнал.

Определянето на  $\mu_M$  за използваните композити с помощта на NIST XCOM е извършено по три различни начина, предоставени от базата данни (таблица 3):

- Пресмятане на масовия коефициент на отслабване на композита като сума на масовите части на масовите коефициенти на полимера и  $WO_3$  взети от базата данни в раздел „compound“ (съединение)

$$\mu_{M_{comp}} = \omega_{WO_3} \mu_{M_{WO_3}} - (1 - \omega_{WO_3}) \mu_{M_{PVA}} \quad (3.2)$$

Където  $\mu_{M_{comp}}$  е масов коефициент на отслабване на композита,  $\omega_{WO_3}$  тегловна част на  $WO_3$ ,  $\mu_{M_{WO_3}}$  масов коефициент на отслабване на  $WO_3$ ,  $\omega_{PVA}$  тегловна част на PVA,  $\mu_{M_{PVA}}$  масов коефициент на отслабване на PVA

- Стойността за композита е определена директно чрез опцията „mixture“ („смес“) в базата данни, при която общият коефициент на отслабване се изчислява автоматично на базата на масовите дялове на отделните компоненти;
- Стойността на композита взета директно от опцията „mixture“ като в този случай се въвеждат масовите тегла на всеки атом, а именно при PVA/ $WO_3$  (33wt%) – H = 0.06104792, C = 0.36371357, O = 0.31117919, W = 0.26405932 и PVA/ $WO_3$  (50wt%) – H = 0.04575631, C = 0.27267734, O = 0.28509489, W = 0.39647146;

Масов коефициент на отслабване	PVA/ $WO_3$ (33wt%)			PVA/ $WO_3$ (50wt%)		
	Съединение	Смес	Атомна смес	Съединение	Смес	Атомна смес
$\mu_{M_{59.5 \text{ keV}}}$ , $\text{cm}^2/\text{g}$	1.034	1.032	1.032	1.460	1.457	1.457
$\mu_{M_{121.53 \text{ keV}}}$ , $\text{cm}^2/\text{g}$	0.924	0.923	0.923	1.309	1.307	1.307
$\mu_{M_{244.02 \text{ keV}}}$ , $\text{cm}^2/\text{g}$	0.235	0.235	0.235	0.290	0.289	0.289
$\mu_{M_{343.24 \text{ keV}}}$ , $\text{cm}^2/\text{g}$	0.147	0.146	0.146	0.164	0.164	0.164

**Таблица 3.** Теоретично пресметнати масови коефициенти на отслабване на PVA/WO<sub>3</sub> (33wt%) PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%) и при енергии 59.5 keV, 121.53 keV, 244.02 keV, 343.24 keV

Стойностите на  $\mu_M$ , получени по трите възможни начина, са практически еднакви, като различия се наблюдават едва в третия знак след десетичната запетая. Това показва, че за изследваните композити изборът на подход в NIST XCOM не води до съществена разлика в теоретично определените стойности.

От базата данни на NIST XCOM са извлечени стойности за масовия коефициент на отслабване на оловото (таблица 4).

Масов коефициент на отслабване, cm <sup>2</sup> /g	Pb	
	Без кохерентно разсейване	С кохерентно разсейване
$\mu_{M59.5\ keV}$	4.575	5.171
$\mu_{M121.53\ keV}$	3.763	4.027
$\mu_{M244.02\ keV}$	0.603	0.737
$\mu_{M343.24\ keV}$	0.229	0.331

**Таблица 4.** Масов коефициент на отслабване на олово при енергии 59.5 keV, 121.53 keV, 244.02 keV, 343.24 keV

### 3.5.2. Теоретична оценка на интензитета на преминалото лъчение

Относителният интензитет на преминалото лъчение е оценен теоретично по следната формула:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu_L x} \quad (3.3)$$

където  $I_0$  е интензитетът на падащото лъчение,  $I$  е интензитетът на преминалото лъчение,  $x$  е дебелината на материала, а  $\mu$  е линейният коефициент на отслабване.

Линейният коефициент на отслабване се определя по следната формула:

$$\mu_L = \mu_{M_{comp}} \rho_{comp} \quad (3.4)$$

където  $\rho_{comp}$  е плътността на композита.

За пресмятането на линейния коефициент на отслабване са необходими плътността на композита и дебелината на използваните образци.

### 3.5.2.1. Определяне на плътността на композитите

Плътността на композитите е определена с помощта на пикнометър. Използваните течности са ацетон и толуен. Поради летливостта на ацетона получените стойности се различават много от теоретично пресметнатите и стойностите получени с толуен, затова резултатите от опита с ацетон няма да бъдат споменати в дипломната работа.

За провеждането на експеримента са необходими следните стойности:

- Маса на празен пикнометър -  $m_p$ ;
- Маса на пълен пикнометър + течност  $m_{pt}$ ;
- Обем на пикнометъра  $V_p$  – той е даден от производителя и неговата стойност се приема за таблична;
- Маса на образец  $m_s$ ;
- Маса на пикнометър + течност + образец  $m_{pto}$ ;

Плътността на течността се определя по следната формула:

$$\rho_t = \frac{m_{pt} - m_p}{V_p} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\rho_t} = \frac{1}{V_p} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{m_{pt}}}{m_{pt}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{m_p}}{m_p}\right)^2} \quad (3.6)$$

Експериментът с толуен е проведен с три независими образца и получените стойности за плътността  $\rho_s$  на образца са осреднени и тяхната неопределеност се пресмята по следната формула:

$$M = m_s + m_{pt} - m_{pto} \quad (3.7)$$

$$\sigma_M = \sqrt{(\sigma_{m_s})^2 + (\sigma_{m_{pt}})^2 + (\sigma_{m_{pto}})^2} \quad (3.8)$$

$$\rho_s = \rho_t \frac{m_s}{M} \quad (3.9)$$

$$\sigma_{\rho_s} = \sqrt{\left(\frac{m_s}{M} \sigma_{\rho_t}\right)^2 + \left(\rho_t \frac{m_{pt} - m_{pto}}{M^2} \sigma_{m_s}\right)^2 + \left(\rho_t \frac{m_s}{M^2} \sigma_{m_{pt}}\right)^2 + \left(\rho_t \frac{m_s}{M^2} \sigma_{m_{pto}}\right)^2} \quad (3.10)$$

Образец	$\rho_s, \text{g/cm}^3$ (теоретично)	$\rho_s, \text{g/cm}^3$ (експериментално)
PVA/WO <sub>3</sub> (33wt%)	1.660	1.525(3)
PVA/WO <sub>3</sub> (50wt%)	2.055	2.059(6)

**Таблица 5.** Теоретично и експериментално определени стойности за плътността на PVA/WO<sub>3</sub> (33wt%) и PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%)

Стойностите за плътността на наночастиците на WO<sub>3</sub>  $\rho_{WO_3}$  е 7.16 g/cm<sup>3</sup>. Плътността на PVA  $\rho_{PVA}$  е взета от производителя 1.2 g/cm<sup>3</sup>. Като теоретичните стойности на плътностите на различните композити се пресмятат по следната формула:

$$\rho_{comp} = \omega_{WO_3}\rho_{WO_3} - (1 - \omega_{WO_3})\rho_{PVA} \quad (3.11)$$

Разликата между теоретичната и експерименталната стойност на плътността може да се дължат на нехомогенност на WO<sub>3</sub> в самия композит (таблица 5).

### 3.5.2.2. Определяна на дебелината на използваните образци

Дебелината на полимерните композити с 33 и 50 тегловни процента WO<sub>3</sub> се определят с помощта на микрометър. Направени са 5 измервания около пролъчената област, взета е средната стойност  $\bar{x}$  и е определено стандартното отклонение. Стойностите са представени в таблица 6.

### 3.5.2.3. Определяне на теоретичната стойност на преминалото лъчение

След определянето на плътностите и дебелините на изследваните образци са пресметнати теоретичните стойности на отслабването на лъчението на <sup>241</sup>Am и <sup>152</sup>Eu. Получените резултати са представени в таблица 6.

		<b>59.5 keV</b>	<b>121.53 keV</b>	<b>244.02 keV</b>	<b>344.24 keV</b>
<b>№</b>	<b>x, mm</b>	<b>I/I<sub>0</sub> %</b>	<b>I/I<sub>0</sub> %</b>	<b>I/I<sub>0</sub> %</b>	<b>I/I<sub>0</sub> %</b>
<b>PVA/WO<sub>3</sub> (33 wt%)</b>					
1	2.193(39)	70.8(4)	73.4(4)	92.4(1)	95.2(1)
2	1.176(37)	83.1(5)	84.7(5)	95.9(1)	97.4(1)
3	0.992(17)	85.5(2)			
4	0.559(11)	91.6(2)			
5	0.399(5)	93.9(1)			
<b>PVA/WO<sub>3</sub> (50 wt%)</b>					
1	1.225(32)	69.2(7)	71.9(6)	93.0(2)	96.0(1)
2	0.881(75)	76.7(7)			
3	0.573(21)	84.2(5)	85.7(5)	94.9(4)	98.1(1)
4	0.484(18)	86.5(5)			
5	0.409(17)	88.4(5)			
<b>PVA</b>					
	0.802(21)	98.1(1)	98.5(1)	98.8(1)	98.9(1)
<b>Pb</b>					
	0.44(2)	10.2(11)	15.3(13)	74.0(10)	89.2(5)

**Таблица 6.** Таблицата съдържа измерените дебелини на образците както и Теоретично определени стойности на отслабване на лъчението на  $^{241}\text{Am}$  на PVA/ $\text{WO}_3$  (33 wt%) и PVA/ $\text{WO}_3$  (50 wt%)

За по-високите енергии са изследвани по два образца от всеки композит, като избраните са тези с по-голяма дебелина.

Таблица 6 показва, че преминалото лъчение  $I/I_0$  намалява с увеличаване на дебелината и нараства с увеличаване на енергията. Композитите PVA/ $\text{WO}_3$  отслабват лъчението значително по-добре от чистия PVA, като по-високото съдържание на  $\text{WO}_3$  води до по-добра защита. Оловото е най-ефективно при ниска енергия, но при 244.02 keV и 344.24 keV ефективността му намалява осезаемо поради малката дебелина на образца.

### 3.6. Експериментално определяне на отслабване на лъчението

За експерименталното определяне на отслабване на лъчението са снети спектрите на  $^{241}\text{Am}$  и  $^{152}\text{Eu}$  за 2000 секунди при наличие на колиматор и 500 секунди без колиматор, след което за същия интервал от време са снети спектрите на отслабване на различни дебелини при тегловни проценти на  $\text{WO}_3$  33% и 50%. Преминалото лъчение при всеки един композит е представено в таблица и се определя по следната формула:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{t_0 A}{A_0 t} \quad (3.12)$$

където  $A_0$  и  $A$  са нетните площи на фото-пиковите без образец и с образец.

Неопределеността на полученото отслабване се пресмята по формулата:

$$\sigma_{\frac{I}{I_0}} = \frac{I}{I_0} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_0}}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2} \quad (3.13)$$

където  $\sigma_{I/I_0}$  е стандартната неопределеност на отношението  $I/I_0$ ,  $\sigma_{I_0}$  е стандартната неопределеност на интензитета на падащото лъчение, а  $\sigma_I$  е стандартната неопределеност на интензитета на преминалото лъчение.

$$\frac{\sigma_{I_0}}{I_0} = \frac{\sigma_{A_0}}{A_0} \quad \frac{\sigma_I}{I} = \frac{\sigma_A}{A} \quad (3.14)$$

където  $\sigma_{A_0}$  и  $\sigma_A$  са съответните им стандартни неопределености.

Сравнението на теоретичните и експерименталните получени стойности за отслабването при композити с 33 wt% WO<sub>3</sub> и 50 wt% WO<sub>3</sub> при различни енергии са представени в таблица 7.

№	59.5 keV			121.53 keV		
	I/I <sub>0</sub> (th) %	I/I <sub>0</sub> (ex) %		I/I <sub>0</sub> (th) %	I/I <sub>0</sub> (ex) %	
		Без колиматор	С колиматор		Без колиматор	С колиматор
PVA/WO <sub>3</sub> (33wt%)						
1	70.8(4)	72.8(8)	73.9(11)	73.4(4)	79.1(12)	75.9(11)
2	83.1(5)	79.6(10)	77.8(15)	84.7(5)	84.4(9)	83.3(12)
3	85.5(2)	82.7(8)	87.4(11)			
4	91.6(2)	91.7(8)	91.9(12)			
5	93.9(1)	94.1(10)	93.1(15)			
PVA/WO <sub>3</sub> (50wt%)						
1	69.2(7)	72.2(10)	69.3(13)	71.9(6)	74.7(9)	76.4(12)
2	76.7(17)	76(5)	73(12)			
3	84.2(5)	83.5(10)	80.0(15)	85.7(5)	87.1(16)	86.5(18)
4	86.5(5)	87.3(9)	85.1(12)			
5	88.4(5)	91.6(7)	91.2(12)			
PVA						
	98.1(1)	97.4(1)	98.5(5)	98.5(1)	98.3(6)	95.7(18)
Pb						
	10.2(11)	10.7(6)	11.0(3)	15.3(13)	20.6(03)	21.9(11)
244.02 keV						
344.24 keV						
PVA/WO <sub>3</sub> (33 wt%)						
1	92.4(1)	93.1(16)	88.1(68)	95.2(1)	94.1(9)	92.6(7)
2	95.9(1)	96.2(15)	94.2(67)	97.4(1)	97.6(4)	97.8(22)
PVA/WO <sub>3</sub> (50 wt%)						
1	93.0(2)	93.3(17)	83.7(61)	96.0(1)	95.3(9)	96.4(18)
3	94.9(4)	94.6 (25)	100.0(67)	98.1(1)	97.6(15)	97.3(25)
PVA						
	98.8(1)	99.5(16)	100.0(71)	98.9(1)	99.5(8)	96.8(21)
Pb						
	74.0(10)	73.6(13)	71.9(62)	89.2(5)	87.4(8)	87.3(19)

**Таблица 7 . Сравнение между теоретично и експериментално получени стойности за отслабването на PVA/WO<sub>3</sub> (33wt%) и PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%) при енергии 59.5 keV, 121.53 keV, 244.02 keV, 343.24 keV**

Таблица 7 показва добро съответствие между теоретичните и експерименталните резултати, като най-малки отклонения се наблюдават при измерванията без колиматор. При PVA/WO<sub>3</sub> (33 wt%) резултатите, получени при конфигурация без колиматор, са по-близки до теоретичните, сравнено със стойностите получени при

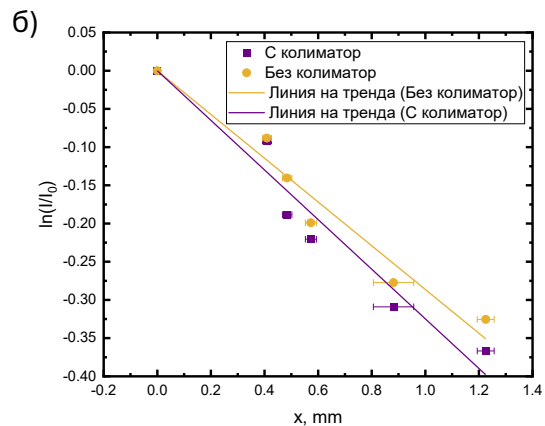
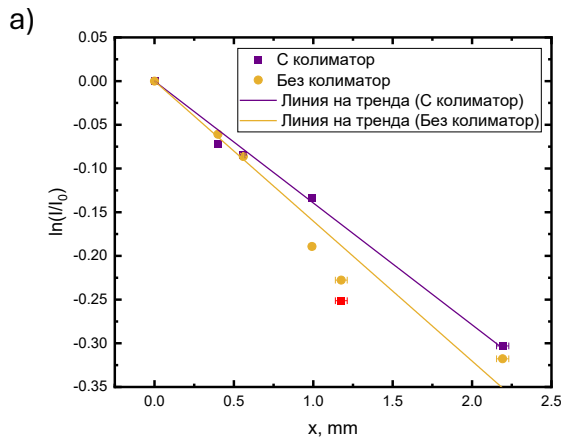
наличието на колиimator. За полимерен композит PVA/WO<sub>3</sub> (50 wt%) последните два образеца - PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%)-4 и PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%)-5, изследвани при енергия 59.5 keV, са с дебелина по 0.5 мм на което се дължат несъответствията между теоретично пресметнатите стойности и експериментално получените.

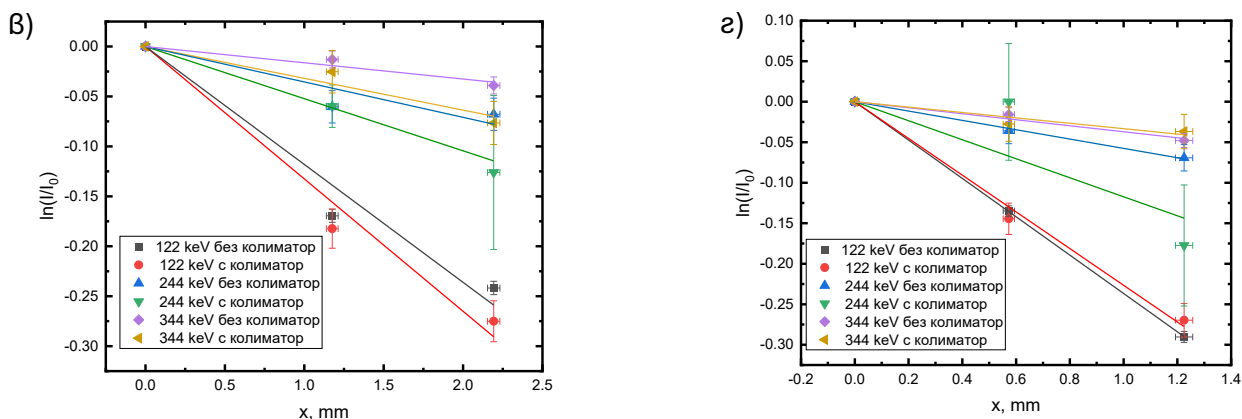
### 3.7. Експериментално определяне на масовия коефициент на отслабване на лъчението

Експерименталните стойности на масовия коефициент на отслабване са определени чрез зависимостта между  $\ln(I/I_0)$  и дебелината  $x$  за двата композита (фиг. 11), като наклонът на получената права определя линейния коефициент на отслабване представени в таблица 8.

С ■ са обозначени стойностите с колиimator, а с ● – стойностите без колиimator. За удобство данни са нормира към  $I_0$  и уравнението на функцията изглежда по следния начин:

$$y = -bx \tag{3.15}$$





**Фиг. 11** Зависимост на  $\ln(I/I_0)$  от дебелината на образца при: а)  $PVA/WO_3$  (33wt %) за енергия 59.5 keV, б)  $PVA/WO_3$  (50 wt%) за енергия 59.5 keV, в)  $PVA/WO_3$  (33wt %) за енергия 121.53 keV, 244.02 keV, 343.24 keV, г)  $PVA/WO_3$  (50 wt%) за енергия 121.53 keV, 244.02 keV, 343.24 keV

	$PVA/WO_3$ (33 wt%)		$PVA/WO_3$ (50 wt%)	
Енергия	Наклон		Наклон	
	С колиматор	Без колиматор	С колиматор	Без колиматор
59.5 keV	0.139(4)	0.160(10)	0.325(19)	0.286(15)
121.53 keV	0.133(9)	0.118(10)	0.226(9)	0.237(46)
244.02 keV	0.052(2)	0.035(6)	0.117(40)	0.058(2)
344.24 keV	0.032(3)	0.016(2)	0.033(5)	0.037(3)

**Таблица 8.** Зависимост на фита от данните

Масовият коефициент на отслабване  $\mu_M$  на двата образца за всяка енергия се определя по следната формула:

$$\mu_M = \frac{b}{\rho_s} \quad (3.16)$$

където  $b$  е наклона на графиката, а  $\rho_s$  е плътността на съответния композит.

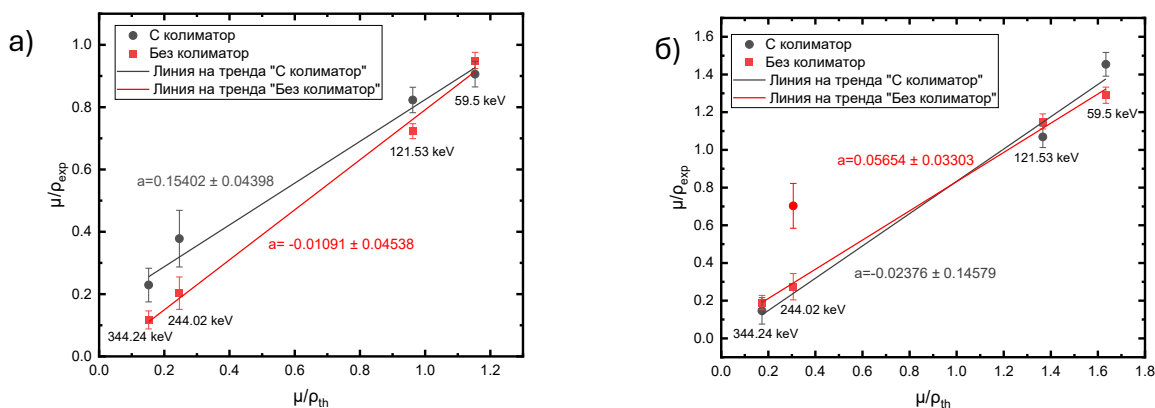
В таблица 9 са сравнени експериментално получените стойности от графиките за масовия коефициент на отслабване и теоретично определените стойности при наличие и отсъствие на кохерентно разсейване.

	$\mu_{M59.5 \text{ keV}}$ , cm <sup>2</sup> /g	$\mu_{M121.53 \text{ keV}}$ , cm <sup>2</sup> /g	$\mu_{M244.02 \text{ keV}}$ , cm <sup>2</sup> /g	$\mu_{M343.24 \text{ keV}}$ , cm <sup>2</sup> /g
$PVA/WO_3$ (33wt%)				
С колиматор	0.914(24)	0.869(58)	0.342(12)	0.209(22)
Без колиматор	1.050(64)	0.774(66)	0.232(39)	0.106(13)

Теоретична стойност	1.032	0.923	0.235	0.146
PVA/WO <sub>3</sub> (50wt%)				
С колиматор	1.576(92)	1.100(44)	0.570(195)	0.162(24)
Без колиматор	1.390(72)	1.251(23)	0.280(8)	0.180(15)
Теоретична стойност	1.457	1.307	0.289	0.164

**Таблица 9.** Сравнение между теоретичните стойности за масовия коефициент на отслабване и експериментално получените стойности от графиките на фигура 11

Получените експериментални стойности на масовия коефициент на отслабване следват очакваната тенденция за намаляване с увеличаване на енергията на фотоните. Наблюдава се нарастване на  $\mu_M$  при увеличаване на съдържанието на WO<sub>3</sub> от 33 wt% до 50 wt%, което е в съответствие с повишаването на ефективния атомен номер и плътността на композитите. Наблюдава се добро съответствие между експерименталните и теоретичните стойности, особено в нискоенергийната област.



**Фиг. 12** Зависимост на експериментално получени стойности на масовия коефициент на отслабване и теоретично пресметнатия за дадената енергия на а) PVA/WO<sub>3</sub> (33wt%), б) PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%)

От представените на фиг. 12 графики се забелязва, че при наличие и при отсъствие на колиматор, стойността на свободния член на уравнението клонят към нула, което потвърждава съответствието между теоретично пресметнатите стойности на масовия коефициент на отслабване и експериментално пресметнатите.

За сравнение е направен експеримент с оловна пластина и чист полимер PVA за определяне на масовите коефициенти на отслабване при различните енергии. От таблица 10 се вижда, че експериментално получените стойности за олово са в

съответствие с теоретичните стойности, което потвърждава, че направените експерименти са коректни. За PVA се забелязва, че без добавяне на тежък метал полимерът почти напълно пропуска лъчението и масовият му коефициент на отслабване при различните енергии граничи с нула. Получените експериментални резултати попадат в теоретичния интервал с малки изключения.

Енергия	Теоретично $\mu_M, \text{cm}^2/\text{g}$	Експериментално с колиматор $\mu_M, \text{cm}^2/\text{g}$	Експериментално без колиматор $\mu_M, \text{cm}^2/\text{g}$
Pb пластина			
59.5 keV	4.575	4.422(207)	4.468(29)
121.53 keV	3.763	3.037(144)	3.158(143)
244.02 keV	0.603	0.661(70)	0.613(28)
344.24 keV	0.229	0.272(38)	0.269(12)
PVA			
59.5 keV	0.195	0.235(45)	0.273(65)
121.53 keV	0.158	0.451(124)	0.063(4)
244.02 keV	0.126	-0.82(296)	0.207(13)
344.24 keV	0.111	0.335(182)	0.203(12)

**Таблица 10.** Сравнение между теоретично и експериментално получени стойности за масовия коефициент на отслабване на Pb пластина и PVA образец при енергии 59.5 keV, 121.53 keV, 244.02 keV, 343.24 keV

### 3.8. Определяне на слой на полуотслабване

Енергия	Теоретична стойност	С колиматор	Без колиматор	Теоретична стойност	С колиматор	Без колиматор
	HVL, мм		HVL, мм	HVL, мм	HVL, мм	HVL, мм
PVA/WO <sub>3</sub> (33 wt%)				PVA/WO <sub>3</sub> (50 wt%)		
59.5 keV	4.40	4.97(13)	4.33(26)	2.31	2.14(12)	2.42(13)
121.53 keV	4.92	5.23(35)	5.87(50)	2.58	3.06(12)	2.92(57)
244.02 keV	19.34	13.29(47)	19.59(329)	11.65	5.91(102)	12.02(34)
344.24 keV	31.13	21.75(229)	42.88(426)	20.53	20.78(208)	18.70(156)

**Таблица 11.** Експериментално получени и теоретични стойности на слой на полуотслабване на PVA/WO<sub>3</sub> (33wt%) и PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%) енергии 59.5 keV, 121.53 keV, 244.02 keV, 343.24 keV

Получените експериментални стойности на HVL са в сравнително добро съгласие с теоретичните, особено при 59.5 keV и 121.53 keV. Наблюдава се ясно

изразена тенденция за намаляване на HVL при повишаване на съдържанието на WO<sub>3</sub> от 33 wt% до 50 wt%, което потвърждава подобряването на екраниращите свойства на композитите. По-съществените отклонения при 244.02 keV могат да се обяснят с малкия брой регистрирани импулси, а при 344.24 keV — с много слабото отслабване на лъчението при тази енергия, което води до по-голяма относителна неопределеност при определянето на HVL.

### 3.9. Определяне на оловния еквивалент на получените композити

Оловният коефициент  $x_{Pb,eq}$  се определя по следната формула:

$$x_{Pb,eq} = x_{sample} \frac{\mu_{sample}}{\mu_{Pb}} \quad (3.17)$$

Дебелината, необходима да се получи отслабване на лъчението присъщо на 0.25 мм оловна пластина, се пресмята по следната формула:

$$x_{sample, \text{ for } 0.25 \text{ mm Pb}} = 0.25 \frac{\mu_{Pb}}{\mu_{sample}} \quad (3.18)$$

където  $x_{Pb,eq}$  е оловният еквивалент,  $x_{sample}$  е дебелината на изследвания образец,  $\mu_{sample}$  е линейният коефициент на отслабване на образца, а  $\mu_{Pb}$  е линейният коефициент на отслабване на оловото при 59.5 keV на фотоните.

Образец	Оловен еквивалент, мм Pb	Необходима дебелина за 0.25 мм Pb, мм	Образец	Оловен еквивалент, мм Pb	Необходима дебелина за 0.25 мм Pb, мм
PVA/WO <sub>3</sub> (33wt%) -1	0.060	9.09	PVA/WO <sub>3</sub> (50wt%)-1	0.073	4.19
PVA/WO <sub>3</sub> (33wt%) -2	0.050	5.88	PVA/WO <sub>3</sub> (50wt%)-2	0.062	3.58
PVA/WO <sub>3</sub> (33wt%) -3	0.027	9.28	PVA/WO <sub>3</sub> (50wt%)-3	0.044	3.24
PVA/WO <sub>3</sub> (33wt%) -4	0.017	8.33	PVA/WO <sub>3</sub> (50wt%)-4	0.037	3.26
PVA/WO <sub>3</sub> (33wt%) -5	0.014	7.00	PVA/WO <sub>3</sub> (50wt%)-5	0.018	5.59
Average	0.034(20)	7.92(145)		0.047(22)	3.97(98)

**Таблица 12.** Стойности на пресметнатия оловен еквивалент и необходимата дебелина всеки образец за достигане на дебелина 0.25 мм олово

Получените стойности показват, че изследваните образци от PVA/WO<sub>3</sub> (33wt%) и PVA PVA/WO<sub>3</sub> (50wt%) имат потенциал за приложение в лъчезащитата, но образците са тънки, за да отговарят на европейските стандарти за защита от йонизиращи лъчения. С увеличаване на количеството на пълнителя и синтезиране на хомогенно разпределените композити, получените образци имат потенциал да заместят оловната защита. В допълнение, разработените материали са гъвкави, леки и нетоксични.

В настоящата дипломна работа получените резултати са в съгласие с литературните данни за полимерни композити, съдържащи WO<sub>3</sub> като безоловен легиращ агент за радиационна защита. Установеното намаляване на слоя на полуотслабване при увеличаване на съдържанието на WO<sub>3</sub> от 33 wt% до 50 wt% потвърждава по-добрите защитни свойства на композитите с по-висока концентрация на пълнителя.

Подобни резултати са докладвани от други автори [25], [35], които установяват, че при WO<sub>3</sub>/PVA нетъкани нановлакнести слоеве отслабването на рентгеновото лъчение се повишава с увеличаване на съдържанието на WO<sub>3</sub>. Аналогична зависимост е наблюдавана и при други полимерни системи, например силиконова гума с WO<sub>3</sub> наночастици, при която по-високата концентрация на WO<sub>3</sub> води до намаляване на HVL и до повишаване на лъчезащитна ефективност [36]. В настоящата работа е установено, че композитите запазват своята цялост след 500 цикъла на огъване и не проявяват микропукнатини или остатъчни деформации. Това показва, че WO<sub>3</sub> може успешно да се прилага в гъвкави полимерни защитни материали, което се потвърждава и от други автори [37]. Получените стойности сочат, че изследваните образци от PVA/WO<sub>3</sub> 33% и PVA/WO<sub>3</sub> 50% работят, но са прекалено тънки, за да отговарят на европейските стандарти за защита от йонизиращи лъчения. С увеличаване на количеството на легиращия агент и синтезиране на хомогенно разпределените композити, получените образци имат потенциал да заместят оловната защита. В допълнение, разработените материали са гъвкави, леки и нетоксични.

## ИЗВОДИ

1. Успешно са получени гъвкави PVA/WO<sub>3</sub> композити с концентрации 33 wt% и 50 wt% WO<sub>3</sub>, като SEM и AFM анализи потвърждават запазване на цялостта на композитите след 500 цикъла на огъване и добра механична устойчивост.
2. Показано е, че с увеличаване на съдържанието на WO<sub>3</sub> се подобряват екраниращите свойства на композитите, което се изразява в намаляване на HVL и увеличаване на масовия коефициент на отслабване. Определеният оловен еквивалент също показва, че разработените материали представляват перспективна нетоксична и гъвкава алтернатива на традиционните оловни защитни материали. За успешното им приложение в областта на лъчезащитата са необходими допълнителни изследвания.
3. Експерименталните резултати за абсорбционните свойства на пригответените полимери са в добро съгласие с теоретичните оценки. Това демонстрира, че теоретичните оценки с помощта на XCOM NIST могат успешно да бъдат използвани за предварителна оценка на абсорбционните свойства на разработваните материали. Наблюдавани са обаче някои отклонения между експерименталните и теоретичните резултати. Това подчертава необходимостта от експериментално валидиране на свойствата на получените материали.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата дипломна работа бяха синтезирани и изследвани полимерни композити на основата на PVA, легирани с наночастици от WO<sub>3</sub>, предназначени за приложение в радиационната защита. Получените резултати показват, че включването на WO<sub>3</sub> в полимерната матрица води до съществено подобряване на радиационнозащитните свойства, като по-високото съдържание на пълнителя от WO<sub>3</sub> осигурява по-високи стойности на масовия коефициент на отслабване и по-нисък слой на полуотслабване. Установено беше също, че композитите запазват добра гъвкавост и механична устойчивост, което е много важно предимство за потенциалното им приложение в гъвкави защитни материали. Сравнението между експерименталните резултати и теоретичните оценки от NIST XCOM показва добро качествено съгласие и потвърждава приложимостта на използвания теоретичен

модел при анализа на тези системи. Макар при изследваните дебелини да не е достигнат еквивалент на 0.25 mm Pb, резултатите показват, че PVA-WO<sub>3</sub> композитите са перспективна безоловна алтернатива за радиационна защита и имат потенциал за бъдещо оптимизиране и практически приложения.

## Исползвана литература:

- [1] J. Talapko *et al.*, “Health Effects of Ionizing Radiation on the Human Body,” Apr. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/medicina60040653.
- [2] W. Wei *et al.*, “Ionizing radiation: molecular mechanisms, biological effects, and therapeutic targets,” Dec. 01, 2026, *Springer Nature*. doi: 10.1186/s43556-025-00358-4.
- [3] S. Baatout, *Radiobiology Textbook*. Springer International Publishing, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-18810-7.
- [4] C. P. Wild, E. Weiderpass, and B. W. Stewart, *Cancer research for cancer prevention World Cancer Report*. 2020. [Online]. Available: <http://publications.iarc.fr/586>.
- [5] A. Bijanu *et al.*, “Metal-polymer composites for radiation protection: a review,” Oct. 01, 2021, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s10965-021-02751-3.
- [6] S. Nambiar and J. T. W. Yeow, “Polymer-composite materials for radiation protection,” Nov. 28, 2012. doi: 10.1021/am300783d.
- [7] L. J. Verhey and P. L. Petti, “PRINCIPLES OF RADIATION PHYSICS.”
- [8] R. Percuoco, “Light and Colour,” in *Clinical Imaging*, 3rd ed., D. Marchiori, Ed. St. Louis, MO, USA: Elsevier Mosby, 2014.
- [9] E. M. A. Hussein, “Mechanisms,” in *Radiation Mechanics*. Oxford, U.K.: Elsevier Science, 2007
- [10] C. V. More, Z. Alsayed, M. S. Badawi, A. A. Thabet, and P. P. Pawar, “Polymeric composite materials for radiation shielding: a review,” Jun. 01, 2021, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s10311-021-01189-9.
- [11] N. J. AbuAlRoos, N. A. Baharul Amin, and R. Zainon, “Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review,” Dec. 01, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108439.
- [12] O. P. Lakhwani, V. Dalal, M. Jindal, and A. Nagala, “Radiation protection and standardization,” Jul. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jcot.2018.08.010.
- [13] S. M. J. Mortazavi *et al.*, “Lead-free, multilayered, and nanosized radiation shields in medical applications, industrial, and space research,” in *Advanced Radiation*

- Shielding Materials: Radiation and Radiological Protection*, Elsevier, 2024, pp. 305–322. doi: 10.1016/B978-0-323-95387-0.00006-6.
- [14] A. Safari, P. Rafie, S. Taeb, M. Najafi, and S. M. J. Mortazavi, “Development of Lead-Free Materials for Radiation Shielding in Medical Settings: A Review,” May 01, 2024, *Shiraz University of Medical Sciences*. doi: 10.31661/jbpe.v0i0.2404-1742.
- [15] N. J. Abualroos, M. I. Idris, H. Ibrahim, M. I. Kamaruzaman, and R. Zainon, “Physical, mechanical, and microstructural characterisation of tungsten carbide-based polymeric composites for radiation shielding application,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-023-49842-3.
- [16] R. Mirji and B. Lobo, *24. Radiation shielding materials: A brief review on methods, scope and significance*. 2017.
- [17] S. Wu, W. Zhang, and Y. Yang, “Progress in Flexible and Wearable Lead-Free Polymer Composites for Radiation Protection,” Dec. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/polym16233274.
- [18] S. Joshi, S. Chandrasekaran, I. Vijayalakshmi, K. Sivasubramanian, and V. Jayaraman, “Epoxy-based Light Weight Gamma Ray Shielding Materials,” 2022.
- [19] X. Zhang, M. Yang, X. Zhang, H. Wu, S. Guo, and Y. Wang, “Enhancing the neutron shielding ability of polyethylene composites with an alternating multi-layered structure,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 150, pp. 16–23, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.06.007.
- [20] Z. Huo, S. Zhao, G. Zhong, H. Zhang, and L. Hu, “Surface modified-gadolinium/boron/polyethylene composite with high shielding performance for neutron and gamma-ray,” *Nuclear Materials and Energy*, vol. 29, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.nme.2021.101095.
- [21] S. A. M. Issa, A. W. Alrowaily, D. E. Abulyazied, E. S. Ali, and H. M. H. Zakaly, “Effects of WO<sub>3</sub> reinforcement on the properties of poly(lactic acid) composites for radiation shielding,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 212, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.radphyschem.2023.111121.
- [22] D. E. Abulyazied, S. A. M. Issa, A. W. Alrowaily, H. A. Saudi, H. M. H. Zakaly, and E. S. Ali, “Polylactic acid tungsten trioxide reinforced composites: A study of their thermal, optical, and gamma radiation attenuation performance,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 205, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.radphyschem.2022.110705.

- [23] E. Yazdankish, M. Nejatolahi, and S. Ghobadpouri, "Radiation protection: assessing the shielding performance of iron-reinforced polydimethylsiloxane in comparison to lead," *Phys. Scr.*, vol. 100, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.1088/1402-4896/ada2c5.
- [24] A. K. Al-Muttairi and N. A. Kabir, "Polyvinyl alcohol composites (PVA) with added Pb, Bi, and Sn: A study on radiation shielding and gamma ray attenuation," *Nuclear Analysis*, vol. 5, no. 1, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.nucana.2025.100203.
- [25] F. Kazemi, S. Malekie, and M. A. Hosseini, "A monte carlo study on the shielding properties of a novel polyvinyl alcohol (PVA)/WO<sub>3</sub> composite, against gamma rays, using the MCNPX code," *J. Biomed. Phys. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 465–472, Aug. 2019, doi: 10.31661/jbpe.v0i0.1114.
- [26] S. A. Issa, H. M. H. Zakaly, M. Pyshkina, M. Y. A. Mostafa, M. Rashad, and T. S. Soliman, "Structure, optical, and radiation shielding properties of PVA–BaTiO<sub>3</sub> nanocomposite films: An experimental investigation," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 180, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.radphyschem.2020.109281.
- [27] D. E. Abulyazied, H. A. Saudi, H. M. H. Zakaly, S. A. M. Issa, and A. M. A. Henaish, "Novel nanocomposites based on polyvinyl alcohol and molybdenum nanoparticles for Gamma irradiation shielding," *Opt. Laser Technol.*, vol. 156, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.optlastec.2022.108560.
- [28] R. H. Jabbar, I. H. Hilal, S. A. Ebrahiem, M. A. Abdulsattar, M. M. Mutter, and S. R. Hashim, "Fabrication of polymer nanocomposite (PbO and W<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) for gamma-ray attenuations," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2322/1/012064.
- [29] S. C. Kim, J. Hou, W. G. Jang, and H. S. Byun, "The Development of a Composite Thin Film Barrier of Tungsten Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-rGO (FerGO) for the Radiation Shielding of Medical Personnel," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.3390/polym16020215.
- [30] H. Al-Ghamdi *et al.*, "Impact of WO<sub>3</sub>-Nanoparticles on Silicone Rubber for Radiation Protection Efficiency," *Materials*, vol. 15, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/ma15165706.
- [31] S. Bhavsar, G. B. Patel, B. Singh, F. Singh, and N. L. Singh, "A comparative study on gamma and carbon ion irradiations induced modification in structural and electrical properties of PVA/H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> nanocomposite polymer electrolyte," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 192, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.radphyschem.2021.109916.

- [32] "Radiation Effects on Polymer Materials Commonly Used in Medical Devices Report of the 1st RCM for CRP F23035." [Online]. Available: <https://nucleus.iaea.org/sites/diif/Pages/Home.aspx>
- [33] Y. Liu, B. Liu, Y. Gu, S. Wang, and M. Li, "Gamma radiation shielding property of continuous fiber reinforced epoxy matrix composite containing functional filler using Monte Carlo simulation," *Nuclear Materials and Energy*, vol. 33, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.nme.2022.101246.
- [34] A. H. Alsaab and S. Zeghib, "Analysis of X-ray and gamma ray shielding performance of prepared polymer micro-composites," *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 16, no. 4, p. 100708, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jrras.2023.100708.
- [35] S. S. Türkaslan, Ş. S. Ugur, B. E. Türkaslan, and N. Fantuzzi, "Evaluating the X-ray-Shielding Performance of Graphene-Oxide-Coated Nanocomposite Fabric," *Materials*, vol. 15, no. 4, Feb. 2022, doi: 10.3390/ma15041441.
- [36] H. Al-Ghamdi *et al.*, "Impact of WO<sub>3</sub>-Nanoparticles on Silicone Rubber for Radiation Protection Efficiency," *Materials*, vol. 15, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/ma15165706.
- [37] A. Bijanu *et al.*, "Chemically bonded tungsten-based polymer composite for X-rays shielding applications," *Mater. Today Commun.*, vol. 32, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104100.

## Списък на публикации

1. N. Minev, K. Buchkov, N. Todorova, R. Todorov, V. Videva, **M. Stefanova**, P. Rafailov, D. Karashanova, Hr. Dikov, C. Trapalis, D. Dimitrov and V. Marinova “Atmospheric pressure TAC synthesis of 2D PtSe<sub>2</sub> layers and their integration in near infrared light shutters” ACS Omega 2024, 9, 14874–14886 (2024) <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08235>

Резултатите от настоящата дипломна работа бяха представени на постерна сесия на „89 Annual Conference of the DPG and DPG Spring Meeting of the Matter and Cosmos Section (SMuK)“, „Radiation and Medical Physics Division“, Erlangen 15 - 20 March 2026.