

## ОПЫТ СОЗДАНИЯ СЛОИСТЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕКСТИЛЬНОЙ ОСНОВЕ

---

*Павлов А.В., кандидат технических наук, доцент,  
Ярославский государственный технический университет,  
Подвальная Ю.В., аспирант,  
Институт проблем химической физики Российской академии наук,  
Адудин И.А., аспирант,  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева*

---

**Аннотация:** разработана технология создания радиационно-защитных свинцовых материалов на текстильной основе. Отработан способ электрохимического осаждения свинца на металлизированную ткань из борфтористоводородного электролита. Определено влияние роста калибра свинцового электрохимического покрытия на изменения плотности сетки и живого сечения металлизированной ткани. Произведена оценка эффективности радиационно-защитных свойств материала за счет определения линейного коэффициента ослабления гамма – квантов с энергией 0,662 МэВ из источника Cs-137 с использованием сцинтилляционного одноканального гамма – спектрометра. Отмечено, что за счёт пространственного расположения слоёв металлизированной ткани при оптимальном диапазоне калибров свинцовым покрытием от 75 до 100 микрометров, имеющих живое сечение не более 0,05%, происходит аномально сильное изменение интенсивности проникающего излучения. Показано, что при дублировании металлизированной ткани со свинцовым покрытием живое сечение дублированной конструкции является степенной функцией от количества слоёв металлизированной ткани. Отмечено, что металлизированная ткань со свинцовым покрытием в изучаемом диапазоне калибров имеет кратность ослабления  $\gamma$  – излучения Cs<sup>137</sup> ниже свинцовой пластины аналогичного калибра.

В полученном радиационно-защитном материале на текстильной основе реализованы как традиционные технологические подходы – использование свинца, так и инновационные, связанные с использованием многослойных материалов для реализации аномально сильного изменения интенсивности проникающего излучения.

**Ключевые слова:** слоистый радиационно-защитный материал, металлизированная ткань, свинцовое электрохимическое покрытие, радиационно-стойкие свойства

## EXPERIENCE IN CREATING LAYERED RADIATION- PROTECTIVE MATERIALS ON A TEXTILE BASIS

*Pavlov A.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,  
Yaroslavl State Technical University,  
Podval'naya Yu.V., Postgraduate,  
Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences,  
Adudin I.A., Postgraduate,  
D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology*

**Abstract:** *the technology of creating radiation-protective lead materials on a textile basis was developed. A method of electrochemical deposition of lead on a metallized fabric from a hydrogen borofluoride electrolyte was developed. The influence of the increase in the caliber of the lead electrochemical coating on the changes in the density of the mesh and the living cross-section of the metallized fabric is determined. The efficiency of the radiation-protective properties of the material is estimated by determining the linear attenuation coefficient of gamma quanta with an energy of 0.662 MeV from the Cs-137 source using a scintillation single-channel gamma spectrometer. It is noted that due to the spatial arrangement of the layers of metallized fabric with an optimal range of lead-coated calibers from 75 to 100 micrometers, having a live cross-section of no more than 0.05%, an abnormally strong change in the intensity of penetrating radiation occurs. It is shown that when duplicating a metallized fabric with a lead coating, the living cross-section of the duplicated structure is a power function of the number of layers of the metallized fabric. It is noted that the metallized fabric with a lead coating in the studied range of calibers has a multiplicity of attenuation of gamma-radiation Cs<sup>137</sup> below the lead plate of a similar caliber.*

*In the resulting radiation-protective material on a textile basis, both traditional technological approaches are implemented - the use of lead, and innovative ones associated with the use of multilayer materials to implement an abnormally strong change in the intensity of penetrating radiation.*

**Keywords:** *layered radiation-protective material, metallized fabric, lead electrochemical coating, radiation-resistant properties*

Создание гибких слоистых радиационно-защитных материалов входит в число приоритетных направлений развития техносферы, в частности развития радиационной и ядерной технологии [9], позволяющих осуществить переход к шестому технологическому укладу, характеризующий определенный уровень развития производства, связанный с ростом атомной промышленности и атомной энергетики [3].

Известные современные радиационно-защитные материалы выполнены или из металлических пластин свинца, вольфрама, бария, или из полимеров, в которые внедрены соединения вышеуказанных металлов [4, 12]. Чем выше радиационный фон, тем толще должен быть радиационно-защитный материал. Однако с ростом толщины материала растёт масса изделия, уменьшается пластичность и гибкость, что очень важно для созда-

ния средств защиты людей. Кроме того, вследствие высокой разности по массе полимеров и соединений тяжёлых металлов, используемых в качестве наполнителей, со временем происходит "выкрашивание" соединений тяжёлых металлов из полимерной матрицы, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик радиационно-защитного материала.

В связи с этим возникла необходимость в создании радиационной защиты виде тканого материала с высокой прочностью связи с текстильной основой. Для этой цели выбрана металлизированная ткань, соответствующая ТУ17РСФСР62-4504-77, обладающая высокой электропроводностью за счет мишурных нитей из меди, покрытых серебром. Мишурные нити обеспечивают высокую прочность связи со свинцом, который наносится на них электрохимическим способом. Нанесение свинца или другого тяжелого металла на текстильную основу другим способом, например газоплазменным напылением или методом магнетронного распыления, требует применение глубокого вакуума [5] и не обеспечивает равномерность покрытия и заданную прочность связи по сравнению с электрохимической технологией.

Применение электрохимической технологии нанесения свинца на текстильную основу позволяет создать оптимальный вариант, при котором сохраняется подвижность ткани и обеспечивается необходимый уровень радиационной защиты [1].

В работе исследовалась технология нанесения электрохимического свинцового покрытия на металлизированную ткань с высокой электропроводностью. Изучалось влияние технологических параметров нанесения электрохимическим методом свинца на физические и радиационно-стойкие свойства металлизированной ткани.

Из технологических параметров в качестве объекта исследования изучалось влияние роста толщины свинцового покрытия на металлизированной ткани, имеющей сетчатую структуру, на изменения плотности сетки и живого сечения ткани при заданной плотности тока.

Для оценки радиационно-стойких свойств полученного материала изучалось влияние количества слоёв металлизированной ткани со свинцовым покрытием на линейный коэффициент ослабления гамма – квантов с энергией 0,662 Мэв из источника Cs-137.

Нанесение свинцового покрытия на металлизированную ткань осуществлялось из борфтористоводородного электролита [8] при температуре  $25 \pm 5$  °С, рабочая плотность тока составляла  $200 \text{ А/м}^2$ , при соотношении анодной поверхности к катодной – 2:1. В качестве анода использовался свинец марки С<sub>1</sub>.

В табл. 1 представлены данные по влиянию калибра свинцового покрытия на живое сечение ткани и плотность сетки.

Живое сечение ткани [6], М, % определяется как процентное отношение площади ячеек в свету к общей площади сетки:

$$M = \frac{a^2}{(a+d)^2} \cdot 100\% \quad (1)$$

где:  $a$  – величина ячейки в свету;

$d$  – диаметр нити.

Плотность сетки, П, % определяется как отношение площади, занимаемой нитями ткани, к площади, занимаемой всей сеткой, выраженное в процентах:

$$П = \frac{(a+d)^2 - a^2}{(a+d)^2} \cdot 100\% \quad (2)$$

Таблица 1

## Влияние калибра свинцового покрытия на живое сечение ткани и плотность сетки

Калибр свинцового покрытия, мкм	Живое сечение ткани, М, %	Плотность сетки, П, %	Примечание
Исходная ткань	84,76	15,23	-
50	71,04	28,96	Ткань подвижна, коробления нет
75	65,29	34,71	Ткань подвижна, коробления нет
100	60,1	39,9	Ткань подвижна, коробления нет
150	51,2	48,8	Наблюдается коробление ткани, ткань теряет подвижность
200	43,84	56,16	Ткань потеряла подвижность, стала пластиной

С ростом калибра свинцового покрытия расстояние между соседними электропроводными нитями ткани сократилось, шаг сетки квадратной ячейки металлизированной освинцованной ткани уменьшился, а радиус металлизированной нити вырос.

Оптимальными технологическими параметрами обладает металлизированная ткань с толщиной свинцового покрытия от 0,75 до 1,00  $10^{-4}$  м или 75÷100 микрометров (мкм).

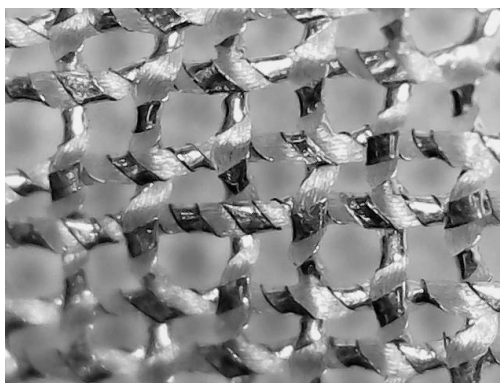
Оценка радиационно-стойких свойств полученного материала осуществлялась по определению линейного коэффициента ослабления гамма – квантов с энергией 0,662 МэВ из источника Cs-137, обусловленного наибольшим периодом полураспада радионуклида Cs-137 ( $1,1 \cdot 10^4$  суток). Определение линейного коэффициента ослабления гамма – квантов с энергией 0,662 МэВ из источника Cs-137 осуществлялось с использованием сцинтилляционного одноканального гамма – спектрометра [2]. Погрешность измерения линейного коэффициента ослабления носит статистический характер и определяется как погрешность измерения

дискретных величин, исходя из распределения Пуассона [10]. Относительная погрешность измерения интенсивности гамма-излучения  $\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{n}}$ , составляет  $\varepsilon \approx 4\%$  при числе отчетов за 1 секунду  $n=650$ .

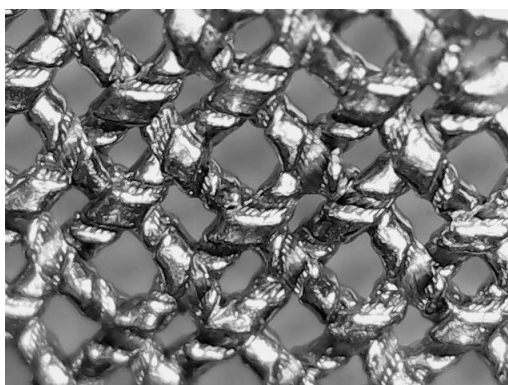
Определение линейного коэффициента ослабления металлизированной ткани с толщиной свинцового покрытия от 75 до 100 мкм показало, что это значение у всех образцов достаточно мало. Поэтому, для уменьшения погрешности измерения проводили исследования нескольких слоёв каждой металлизированной ткани, склеенной резиновым клеем горячего отверждения на основе синтетического каучука СКД.

В табл. 2 представлены технические характеристики слоистых материалов, в том числе металлизированной ткани с каландрованным резиновым свинец-содержащим покрытием, полученным по серийной технологии.

На рис. 1 представлены фотографии структуры исходной металлизированной ткани и структуры ткани со свинцовым покрытием.



Фотография структуры исходной металлизированной ткани (а)



Фотография структуры металлизированной ткани со свинцовым покрытием (б)

Рис. 1. Фотографии структуры металлизированной ткани исходной (а) и со свинцовым покрытием (б)

Поверхностная плотность радиационно-защитной части определяется отношением массы тела к площади его поверхности.

На рис. 2 представлены изменения закономерностей защитных характеристик исследуемых ма-

териалов в зависимости от толщины ( $x$ ) и интенсивности гамма – квантов, выраженных числом отсчётов за 1 секунду ( $n$ ).

Таблица 2

**Технические характеристики опытных образцов слоистого материала**

Наименование образца	Масса образца, г	Площадь образца, см <sup>2</sup>	Толщина образца, мм	Поверхностная плотность радиационно-защитной части, г/см <sup>2</sup>
Металлизированная ткань с резиновым каландрованным свинец-содержащим покрытием	58,67	120	2,41	0,49
Металлизированная ткань со свинцовым покрытием толщиной 100 мкм	23,84	102	0,43	0,23

Продолжение таблицы 2

Металлизированная дублированная ткань со свинцовым покрытием толщиной 75 мкм	42,84	120	0,91	0,35
--	-------	-----	------	------

Как видно из рис. 2 зависимость изменения защитных характеристик резинового радиационно-защитного материала от толщины  $n = f(x)$  носит линейный характер во всём диапазоне значений и может быть описана уравнением:

$$n = -9,43x + 686,82 \quad (3)$$

Для дублированной металлизированной ткани со свинцовым покрытием 75 мкм в диапазоне значений 0,9 до 9 мм (10 слоёв) зависимость изменения защитных характеристик также носит линей-

ный характер и может быть представлена уравнением:

$$n = -16,06x + 647,48 \quad (4)$$

Однако с последующим ростом количества слоёв ткани характер зависимости изменяется и может быть представлен следующим уравнением:

$$n = 1 - \alpha \cdot e^{\beta x} \quad (5)$$

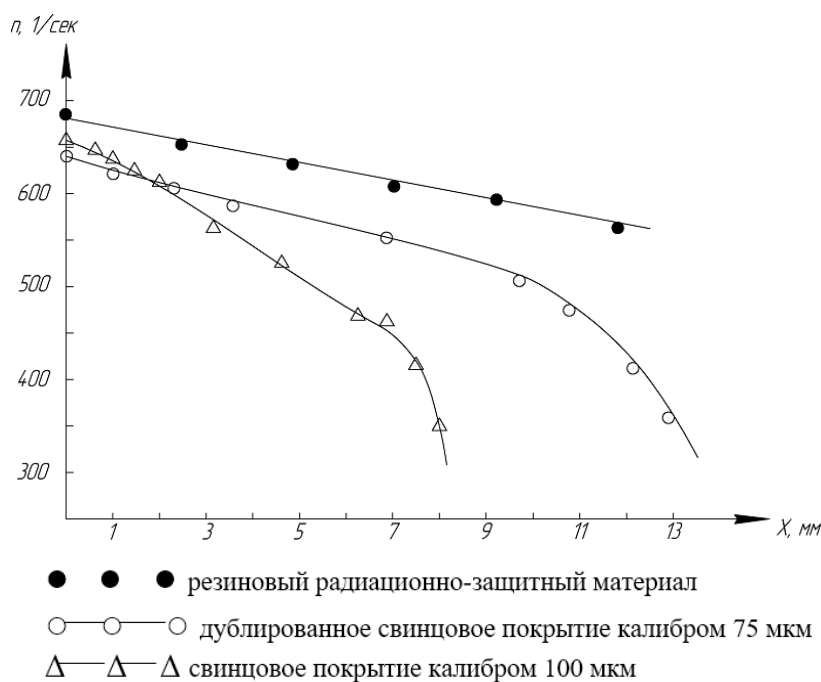


Рис. 2. Закономерности защитных характеристик материалов в зависимости от их толщины ( $x$ ) и интенсивности гамма-квантов, выраженных числом отсчётов за 1 секунду ( $n$ )

Интерпретация уравнения (5) позволяет сделать вывод, что с дальнейшим ростом слоёв (более 10) происходит не линейное изменение снижения интенсивности гамма-квантов.

Не линейное изменение снижения интенсивности гамма-квантов проявляется в способности аномально сильно (по сравнению с известной классической зависимостью Бугера) изменять интенсивность проникающего излучения [7].

$$J_x = J_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (6)$$

$$y = M^n \quad (7)$$

где:  $J_x$  – интенсивность излучения после прохождения слоя толщиной  $x$

$J_0$  – интенсивность падающего излучения

Известная зависимость Бугера, представленная уравнением (6), характеризует экспоненциальное ослабление узкого пучка квантов слоем радиационно-защитного материала. При этом масштаб изменения интенсивности проникающего излучения определяется степенью дисперсности, сегрегированностью и пространственным расположением частиц полидисперсной смеси. Степень дисперсности свинцового покрытия величина постоянная, которая характеризуется составом и кроющей способностью электролита и калибром. Сегрегированность не свойственна электрохимическим покрытиям. Поэтому изменение снижения интенсивности гамма – квантов связано с пространственным расположением частиц свинца на металлизированной ткани. При дублировании металлизированной ткани со свинцовым покрытием живое сечение дублированной конструкции ( $M$ ) является степенной функцией от количества слоёв металлизированной ткани ( $n$ ):

В табл. 3 приведены показатели живого сечения конструкций тканей в зависимости от слоёв и толщины покрытий.

Из табл. 3 следует, что аномально сильно снижается интенсивность проникающего излучения при прохождении через 11-14 слоёв дублированной металлизированной ткани со свинцовым покрытием калибром 75 мкм. Для металлизированной ткани со свинцовым покрытием толщиной 100 мкм аномально сильное изменение интенсивности проникающего излучения приходится на диапазон от 15 до 18 слоёв.

Можно предположить, что за счёт пространственного расположения слоёв металлизированной ткани со свинцовым покрытием, имеющих живое сечение не более 0,05%, происходит аномально сильное изменение интенсивности проникающего излучения, аналогичное пространственному расположению частиц полидисперсной смеси в полимере [11]. Однако металлизированная ткань со свинцовым покрытием в изучаемом диапазоне калибров ( $x$ ) имеет кратность ( $K$ ) ослабления  $\gamma$ -излучения  $Cs^{137}$  ниже свинцовой пластины аналогичного калибра, что следует из рис. 3.

Таблица 3

**Показатели живого сечения конструкции тканей ( $M$ , %) в зависимости от слоёв ( $n$ ) и толщины покрытия свинцом**

Количество слоёв ткани	Толщина свинцового покрытия, мкм					
	0	50	75	100	150	200
1	84,76	71,04	65,29	60,1	51,2	43,84
2	71,84	50,47	42,63	36,12	26,21	19,22
3	60,89	35,85	27,83	21,71	13,42	8,42
4	51,61	25,47	18,17	13,05	6,87	3,69
5	43,75	18,09	11,86	7,84	3,52	1,61

Продолжение таблицы 3

6	37,08	12,85	7,75	4,71	1,80	0,70
7	31,43	9,13	5,05	2,83	0,92	0,31
8	26,64	6,48	3,30	1,70	0,47	0,13
9	22,57	4,61	2,15	1,02	0,24	0,05
10	19,12	3,27	1,41	0,61	0,12	0,02
11	16,22	2,32	0,92	0,37	0,06	0,01
12	13,75	1,65	0,6	0,22	0,03	0,005
13	11,65	1,17	0,39	0,13	0,01	-
14	9,87	0,83	0,26	0,08	0,008	-
15	8,37	0,59	0,17	0,05	0,004	-
16	7,09	0,42	0,11	0,03	-	-
17	6,01	0,3	0,07	0,02	-	-
18	5,10	0,21	0,05	0,01	-	-

Результатами проделанной работы является разработка технологии нанесения свинца электрохимическим способом из водного раствора борфтористоводородного электролита на металлизированную электропроводную ткань с медными мишурными нитями, покрытыми серебром. Определено влияние роста толщины свинцового покрытия на изменения плотности сетки и живого

сечения металлизированной ткани. В полученном радиационно-защитном материале на текстильной основе реализуются как традиционные технологические подходы – использование свинца, так и инновационные, связанные с использованием многослойных материалов для реализации аномально сильного изменения интенсивности проникающего излучения.

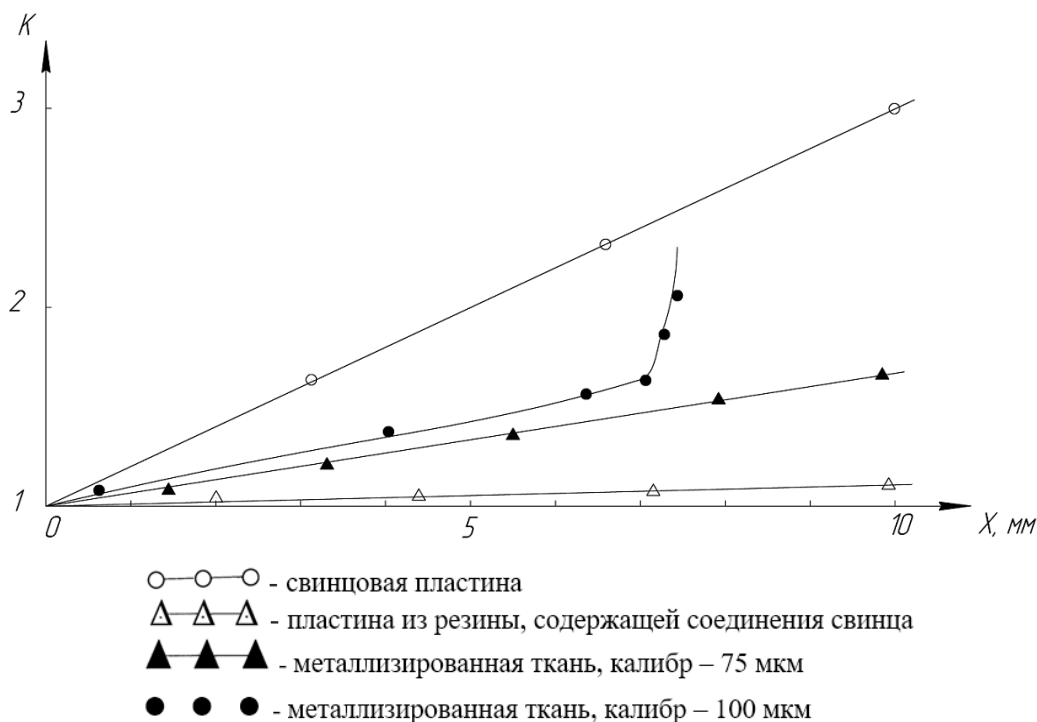


Рис. 3. Зависимость толщины защитного слоя (x) от кратности (K) ослабления  $\gamma$ -излучения  $Cs^{137}$

Отмечено, что за счёт пространственного расположения слоёв металлизированной ткани с оптимальным свинцовым покрытием (75-100 мкм), имеющих живое сечение не более 0,05%, происходит аномально сильное изменение интенсивности проникающего излучения.

### Литература

1. Адудин И.А., Павлов А.В., Звягин А.С., Сахновская О.Ю. Слоистый радиационно-защитный материал. Патент РФ №2681520. Бюл. 2017. № 34.
2. Алексеев В.П., Глушаков В.П. Ядерная физика. Лабораторный практикум. Ярославль: ЯрГУ, 2009. 236 с.
3. Афанасьев В.П., Ласкина Л.Ю. Проблемы и перспективы России в Шестом технологическом укладе // Аллея науки. Издательский Центр "Quantum". 2018. Т. 4. № 16. С. 258 – 264.
4. Воронин С.Д., Поляков А.Н. Эластичный материал для защиты от рентгеновского и гамма-излучения. Патент РФ 2364963. Бюл. 2009. №23.
5. Гольберг Б.Л., Иванов А.А., Мамонтов О.В. и др. Модифицирование текстильных материалов нанесением нанопокровов методом магнетронного ионно-плазменного распыления // Российский химический журнал. 2011. Т. 55. № 3. С. 7 – 13.
6. ГОСТ 3826-82 Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия. Введ. 1984. М.: Изд-во стандартов, 2003. 8 с.
7. Иванов В.А., Конюхов С.Н., Ткаченко В.И и др. Явление аномального изменения интенсивности потока квантов проникающего излучения моно- и многоэлементными средами // Сб. «Научные открытия ученых Украины». Киев, 2004. С. 64 – 65.
8. Мельников П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. М.: Машиностроение, 1991. 384 с.
9. Поручение Председателя Правительства Российской Федерации от 28.08.2012 г. № ДМ-П8-5060 «Об утверждении перечня инновационных территориальных кластеров» [Электронный ресурс]. [http://old.economy.gov.ru/minec/activity/sections/innovations/politic/doc20120907\\_02](http://old.economy.gov.ru/minec/activity/sections/innovations/politic/doc20120907_02)
10. Яноши Л. Теория и практика обработки результатов измерений. М.: Мир, 1968. 458 с.
11. Belous V.A., Dzhur E.A. et al. On the mechanism of creation of substances with increased radiation-protective properties // Voprosy atomicheskoy nauki i tekhniki. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science. 2005. № 3 (86). P. 188 – 189.
12. Ronald DeMeo, Miami FL (US); Joseph Kucherovsky, Philadelphia, PA (US) Multiple hazard protection articles and methods for making them. Patent No US 6841791B2. Date of Patent: Jan. 11, 2005.

## References

1. Adudin I.A., Pavlov A.V., Zvyagin A.S., Sahnovskaya O.YU. Sloistyj radiacionno-zashchitnyj material. Patent RF №2681520. Byul. 2017. № 34.
2. Alekseev V.P., Glushakov V.P. YAdernaya fizika. Laboratornyj praktikum. YAroslavl': YArGU, 2009. 236 s.
3. Afanas'ev V.P., Laskina L.YU. Problemy i perspektivy Rossii v SHestom tekhnologicheskom uklade. Alleya nauki. Izdatel'skij Centr "Quantum". 2018. T. 4. № 16. S. 258 – 264.
4. Voronin S.D., Polyakov A.N. Elastichnyj material dlya zashchity ot rentgenovskogo i gamma-izlucheniya. Patent RF 2364963. Byul. 2009. №23.
5. Gol'berg B.L., Ivanov A.A., Mamontov O.V. i dr. Modificirovanie tekstil'nyh materialov naneseniem nanopokrytij metodom magnetronnogo ionno-plazmennogo raspyleniya. Rossijskij himicheskij zhurnal. 2011. T. 55. № 3. S. 7 – 13.
6. GOST 3826-82 Setki provolochnye tkanye s kvadratnymi yachejkami. Tekhnicheskie usloviya. Vved. 1984. M.: Izd-vo standartov, 2003. 8 s.
7. Ivanov V.A., Konyuhov S.N., Tkachenko V.I i dr. YAvlenie anomal'nogo izmeneniya intensivnosti potoka kvantov pronikayushchego izlucheniya mono- i mnogoelementnymi sredami. Sb. «Nauchnye otkrytiya uchenyh Ukrainy». Kiev, 2004. S. 64 – 65.
8. Mel'nikov P.S. Spravochnik po gal'vanopokrytiyam v mashinostroenii. M.: Mashinostroenie, 1991. 384 s.
9. Poruchenie Predsedatelya Pravitel'stva Rossijskoj federacii ot 28.08.2012g. № DM-P8-5060 «Ob utverzhdenii perechnya innovacionnyh territorial'nyh klasterov» [Elektronnyj resurs]. [http://old.economy.gov.ru/minec/activity/sections/innovations/politic/doc20120907\\_02](http://old.economy.gov.ru/minec/activity/sections/innovations/politic/doc20120907_02)
10. YAnoshi L. Teoriya i praktika obrabotki rezul'tatov izmerenij. M.: Mir, 1968. 458 s.
11. Belous V.A., Dzhur E.A. et al. On the mechanism of creation of substances with increased radiation-protective properties. Voprosy atomicheskoy nauki i tekhniki. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science. 2005. № 3 (86). P. 188 – 189.
12. Ronald DeMeo, Miami FL (US); Joseph Kucherovsky, Philadelphia, PA (US) Multiple hazard protection articles and methods for making them. Patent No US 6841791B2. Date of Patent: Jan. 11, 2005.