

PACS: 81.05.Qk, 87.55K-, 87.55N-

RADIATION-SHIELDING PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS**E.M. Prokhorenko¹, V.F. Klepikov¹, V.V. Lytvynenko¹, A.A. Zakharchenko²,
M.A. Khazhmuradov², A.I. Morozov³, V.V. Kolesnikova⁴***1) Institute of Electrophysics & Radiation Technologies NASU
Chernyshevsky st., 28, 61002 Kharkiv, Ukraine**2) National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"
1, Akademicheskaya St., 61108 Kharkov, Ukraine**3) National University of Civil Protection of Ukraine
94 Chernyshevska Str. Kharkiv 61023 Ukraine**4) Donetsk National Technical University
2, Shybankova Square, Krasnoarmiysk 85300, Ukraine
e-mail: fort-58@mail.ru
Received March 23, 2015*

Radiation-protective properties of composition materials were investigated. Polystyrene, which was reinforced by an aluminum, was used as basic material. Also, tungsten powder was used as filling material. The composite was made in the form of spheres of 1-5 mm diameter. This allows to develop effective individual protection against gamma radiation without restricting mobility. The Monte Carlo method was used to investigate the energy dependence of the radiation-shielding characteristics of composite materials. We calculated relative attenuation of the absorbed dose of gamma rays for the protective layer with a different component mass composition and thickness of 10 mm.

KEY WORDS: composition materials, dose of radiation, radiation protection, Monte Carlo method, polystyrene, aluminum, tungsten

РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**Є.М. Прохоренко¹, В.Ф. Клепиков¹, В.В. Литвиненко¹, О.О. Захарченко², М.А. Хажмурадов²,
О.І. Морозов³, В.В. Колесникова⁴***1) Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України
вул. Чернишевського 28, 61002 Харків, Україна**2) Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"
вул. Академічна, 1, 61108 Харків, Україна**3) Національний університет цивільного захисту України
вул. Чернишевська, 94, Харків, 61023, Україна**4) Донецький національний технічний університет
пл. Шибанкова, 2, Красноармійськ 85300, Україна*

Вивчалися радіаційно-захисні властивості композиційних матеріалів. Їх основою був полістирол, який армували алюмінієм. Як наповнювач використовували порошок вольфрам. Композит був виготовлений у вигляді кульок діаметром 1-5 мм, що дозволяє створювати ефективний індивідуальний захист від гамма-випромінювання, не обмежуючи рухливість. Метод Монте-Карло використаний для дослідження енергетичної залежності радіаційно-захисних характеристик композиційних матеріалів. Розраховано відносне ослаблення поглиненої дози гамма-випромінювання для захисного шару з різним масовим складом компонент і товщиною 10 мм.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: полімер-матричний композиційний матеріал, доза-випромінювання, радіаційний захист, метод Монте-Карло, полістирол, алюміній, вольфрам

РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**Е.М. Прохоренко¹, В.Ф. Клепиков¹, В.В. Литвиненко¹, А.А. Захарченко², М.А. Хажмурадов²,
А.И. Морозов³, В.В. Колесникова⁴***1) Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины
ул. Чернышевского 28, Харьков 61002, Украина**2) Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"
ул. Академическая 1, Харьков 61108, Украина**3) Национальный университет гражданской защиты Украины
ул. Чернышевская, 94, Харьков 61023, Украина**4) Донецкий национальный технический университет
пл. Шибанкова, 2, Красноармейск 85300, Украина*

Изучались радиационно-защитные свойства композиционных материалов. Их основой являлся полистирол, который армировали алюминием. В качестве наполнителя использовали порошок вольфрам. Композит был изготовлен в виде шариков диаметром 1-5 мм, что позволяет создавать эффективную индивидуальную защиту от гамма-излучения, не ограничивая подвижность. Метод Монте-Карло использован для исследования энергетической зависимости радиационно-защитных характеристик композиционных материалов. Рассчитано относительное ослабление поглощенной дозы гамма-излучения для защитного слоя с различным массовым составом компонент и толщиной 10 мм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимер-матричный композиционный материал, доза-излучения, радиационная защита, метод Монте-Карло, полистирол, алюминий, вольфрам

Важным условием безопасности ядерных объектов является радиационная защита персонала и оборудования. Для создания эффективной защиты от ионизирующего излучения необходимо наличие специальных материалов [1-4]. Помимо высоких радиационно-защитных характеристик данные материалы должны обладать рядом специфических свойств в зависимости от типа защиты (стационарная, индивидуальная и т.д.) и условий её эксплуатации. Особое внимание необходимо уделять проблеме радиационной стойкости материалов противорадиационной защиты, поскольку структура материала может изменяться под воздействием ионизирующего излучения [3-4].

В последнее время значительный интерес проявляется к созданию индивидуальных защитных комплектов (ИЗК), которые предназначены для защиты биологических объектов от воздействия ионизирующего излучения. Такие ИЗК могут применяться на объектах ядерной энергетики и ядерной медицины, а также в горно-спасательной службе. Поэтому в материалах, используемых в ИЗК, высокая эффективность поглощения ядерных излучений должна сочетаться с такими качествами, как сравнительно низкая плотность материала (ограничение ИЗК по весу) и низкая теплопроводность (ИЗК должен защищать от перегрева). От ИЗК также требуется, чтобы он в минимальной степени ограничивал подвижность и в то же время конструкция защитного комплекта должна оставаться достаточно прочной. Также важным требованием является простота технологий изготовления и обработки композитного материала.

В этой работе мы представляем результаты исследования радиационно-защитных свойств разработанных нами композиционных материалов в зависимости от их компонентного состава. Основой изученных композиционных материалов служил полистирол, армированный алюминием. В качестве наполнителя был использован порошковый вольфрам. Ранее мы представляли исследования физических свойств вольфрам-алюминиевых композитных материалов на основе полистирола, таких как твердость, сила трения и прочность в зависимости от размера частиц металлических компонент [1,2].

Основной целью данной работы было изучение эффективности ИЗК на основе вышеуказанных материалов от ионизирующего излучения. Мы использовали метод математического моделирования для сравнения дозы гамма-излучения, которая может быть поглощена биологическим объектом, в зависимости от массового состава компонент защитного композиционного материала. На основе полученных данных были предложены варианты использования разработанных нами композиционных материалов радиационной защиты.

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Композиционные материалы с добавками алюминия и вольфрама уже использовались ранее для защиты от ионизирующих излучений [5,6]. Алюминий используется для армирования материала (повышения прочности изготавливаемой конструкции) [5], вольфрам же увеличивает поглощающую способность основы композиционного материала. В данной работе мы использовали полистирол в качестве материала основы. Полистирол имеет низкую теплопроводность, слабую химическую активность и высокую прочность. Также к числу его преимуществ можно отнести наличие отлаженных промышленных технологий изготовления изделий из полистирола. Однако, температура плавления полистирола находится в диапазоне 190-200 °С. Поэтому применять композитные материалы на базе полистирола можно только в так называемой «теплой» зоне.

В работе [7] мы, используя методы математического моделирования, проанализировали радиационно-защитные характеристики ИЗК, в котором защитный слой изготовлен из чистого полистирола. Для предельной толщины сплошного защитного слоя в 10 мм ИЗК может обеспечить защиту от гамма-квантов с энергией ниже ≈ 60 кэВ. Для гамма-квантов с более высокими энергиями ожидаемое снижение поглощенной дозы гамма-излучения не превышает 10%. Поэтому для повышения поглощающей способности гамма-излучения у разрабатываемого композита мы использовали добавку вольфрама.

Изготовление композитного материала проводилось на стандартном промышленном оборудовании. Для поддержания необходимой температуры расплава нами была разработана система контроля производства композитного материала, которая базируется на использовании методов ИК-радиометрии [2]. Для улучшения теплозащитных свойств ИЗК композит изготавливался в виде шариков. Идея создания сыпучего защитного слоя является оригинальной и позволяет решить значительное число практических задач (например, быстрое создание временных защитных конструкций различной геометрии при локализации источников радиоактивного загрязнения). Размеры шариков были подобраны таким образом, чтобы обеспечить пластичность защитного слоя ИЗК при допустимом значении теплопроводности. Возможный диаметр композитных шариков при изготовлении составлял 1,5-2 мм либо 3,5-4 мм. При их изготовлении использовался порошок алюминия с характерными размерами частиц 10-20 мкм либо 30-40 мкм. Размер частиц в вольфрамовом порошке мог быть выбран 50-60 мкм либо 200-210 мкм.

Мы исследовали радиационно-защитные характеристики разработанных композиционных материалов методом Монте-Карло при помощи универсального пакета моделирования взаимодействия ядерных излучений с веществом Geant 4 v4.9.6p04 [8]. Выбор метода исследования обусловлен тем, что моделирование позволяет существенно уменьшить затраты времени на получение и анализ результатов для множества вариантов состава разрабатываемых композиционных материалов.

В качестве критерия эффективности защиты из композитного материала нами была выбрана величина

относительного уменьшения поглощенной дозы гамма-излучения в тканеэквивалентном фантоме, который располагался после защитного слоя толщиной 10 мм. Данная толщина защитного слоя выбрана для исследования, поскольку разработанные композиционные материалы предназначены для применения в индивидуальных защитных комплексах, для которых существуют ограничения на предельный вес и габариты. Поскольку насыпной защитный слой из шарообразных элементов содержит внутри полости, то в расчетах плотность композита выбиралась с учетом коэффициента заполнения объема.

Моделирование ослабляющих характеристик было проведено для трех групп композиционных материалов, массовый состав которых приведен в табл. 1. Все они были изготовлены с использованием алюминиевого порошка с характерным размером частиц 10-20 мкм и вольфрамового порошка с размером частиц 50-60 мкм. Внутри каждой группы композиционные материалы имели одинаковое объемное содержание полистирола и суммарное объемное содержание металлических компонент. Соотношение между алюминием и вольфрамом варьировалось внутри каждой группы для выбора наиболее эффективного материала, который может быть использован в ИЗК.

Таблица 1.

Массовый состав композиционных материалов

Material	Полистирол, (PS), масс. %	Вольфрам, (W), масс. %	Алюминий, (Al), масс. %
Группа 1			
C050010	16,9	0,4	83,7
C050109	11,2	39,3	49,5
C050505	4,8	83,5	11,7
C050901	3,1	95,3	1,6
C051000	2,5	97,1	0,4
Группа 2			
C080601	6,9	91,0	2,1
C080403	9,4	82,0	8,6
C080304	11,4	74,7	13,9
C080106	19,9	43,6	36,5
Группа 3			
C100401	11,7	82,5	5,8
C100302	14,8	77,9	7,3
C100203	19,1	66,9	14,0
C100104	26,8	46,9	26,3

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты математического моделирования представлены на рис. 1–3.

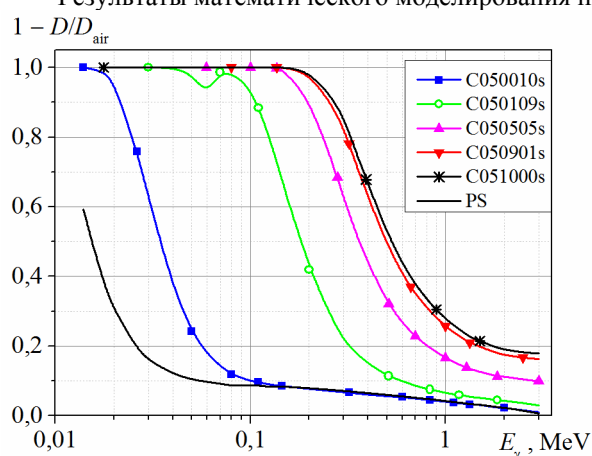


Рис. 1. Зависимость относительного ослабления поглощенной дозы гамма-излучения защитным слоем композитного материала первой группы от энергии гамма-квантов.

На зависимостях ослабления дозы излучения у композитов с низкой плотностью наблюдается скачок поглощения в области K -края поглощения вольфрама. Для материалов с высокой плотностью этот эффект незаметен из-за практически полного поглощения гамма-излучения в этой области энергий.

В композитах первой группы суммарный объем металлической фракции составлял 66,7% от полного

Расчетная доза, которую поглощает тканеэквивалентный фантом при отсутствии защиты, обозначена как D_{air} . D – расчетная доза, которую поглощает тканеэквивалентный фантом, расположенный после слоя защиты. Величина $1 - D/D_{air}$, в свою очередь, характеризует относительное ослабление поглощенной дозы гамма-излучения защитным слоем из композиционного материала. Для сравнения на рис. 1–3 также представлен график ослабления поглощенной дозы для чистого полистирола. Он обозначен сплошной линией без маркеров. Поскольку, как уже упоминалось ранее [7], ослабляющие свойства чистого полистирола не позволяют его использовать в ИЗК, то для наглядности при расчете его относительного ослабления поглощенной дозы мы исследовали сплошной слой (т.е. коэффициент заполнения объема для чистого полистирола равен 1). Маркеры на графиках предназначены только для улучшения восприятия

объема исходной смеси. Как видно из данных рис. 1, наилучший показатель эффективности в первой группе демонстрирует композитный материал C051000, в который входит более 97 масс.% вольфрама. Как свидетельствуют данные рис. 2 и 3, защитные характеристики материала C051000 оказались наилучшими в данном исследовании. Также близкие характеристики эффективности поглощения показал материал C050901. Двукратное ослабление дозы эти материалы могут обеспечить для энергии гамма-квантов 0,5 МэВ. Однако применение этих композитов в индивидуальных защитных комплексах малоперспективно из-за высокой плотности (более 12–13 г/см³), что сильно утяжеляет ИЗК. Поэтому данные материалы целесообразно использовать только для объектов стационарной защиты, где нет жестких ограничений на общий вес конструкции. Материал C050505 обеспечивает половинное ослабление поглощенной дозы при энергиях гамма-квантов 350 кэВ, а композит C050109 – при энергии около 200 кэВ. Хотя эти два композитных материала значительно легче C051000 (их плотность 5,5–7,7 г/см³), однако их применение также может привести к превышению предельно допустимого веса ИЗК. Радиационно-защитные характеристики материала C050010, в котором не используется вольфрам, незначительно превышает характеристики чистого полистирола и его применение в ИЗК не рекомендуется. Таким образом, все образцы первой группы с хорошими радиационно-защитными характеристиками имеют значительный вес и в большей степени подходят для изготовления стационарных насыпных защитных конструкций. Высокая твердость и значительный коэффициент трения между отдельными элементами насыпной защиты, которые характерны для композитов первой группы, упрощает поддержание заданной геометрической формы защиты.

В композициях второй группы суммарный объем металлической фракции составлял 46,7% от полного объема исходной смеси. Твердость и коэффициент трения между отдельными элементами для материалов второй группы ниже, чем для первой группы. В то же время теплопроводность материалов второй группы была выше на 5%, что несколько уменьшает допустимое время непрерывного пребывания в ИЗК. Энергетические зависимости ослабления дозы излучения для композитов второй группы представлены на рис. 2.

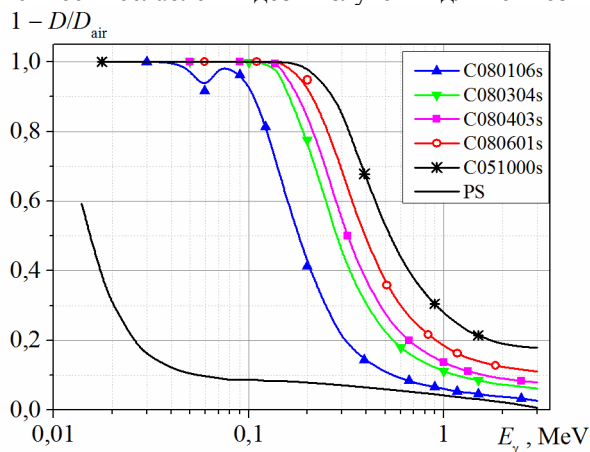


Рис. 2. Зависимость относительного ослабления поглощенной дозы гамма-излучения защитным слоем композитного материала второй группы от энергии гамма-квантов.

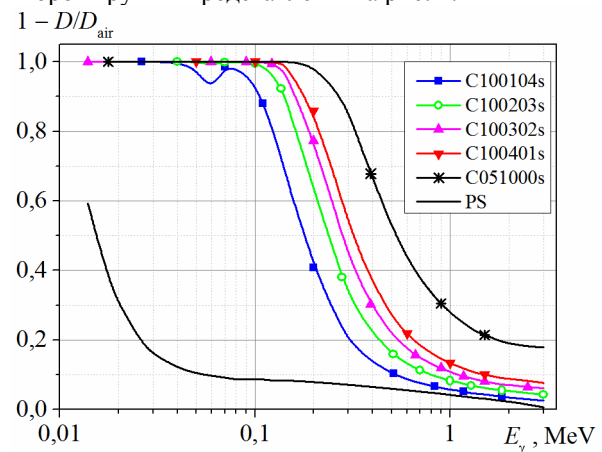


Рис. 3. Зависимость относительного ослабления поглощенной дозы гамма-излучения защитным слоем композитного материала третьей группы от энергии гамма-квантов.

Как следует из рис. 2, разброс величины ослабления поглощенной дозы и, следовательно, эффективности защиты для композитов второй группы несколько меньше по сравнению композиционными материалами первой группы. Образцы C080304, C080403 и C080601 показали достаточно близкие эффективности ослабления при том, что плотность материала C080601 (8,5 г/см³) на треть превышает плотность материала C080304 (5,2 г/см³). Двукратное ослабление поглощенной дозы достигается в области энергий гамма-квантов от 300 кэВ (C080304) до 400 кэВ (C080601).

В композиционных материалах третьей группы суммарный объем металлических компонент составлял 33,3% от полного объема исходной смеси. Для этих композитов твердость, коэффициент трения и коэффициент теплопроводности на 10% превышает соответствующие величины для чистого полистирола. Кривые энергетических зависимостей относительного ослабления дозы гамма-излучения для материалов третьей группы располагаются на графике еще более плотно, чем для материалов второй группы (рис. 3). Двукратное ослабление дозы излучения достигается в области энергий гамма-квантов от 250 кэВ (C100203) до 350 кэВ (C100401).

Как следует из данных моделирования, при использовании в ИЗК большинство материалов может обеспечить снижение дозовой нагрузки не менее чем на 80% в интервале энергий от 0 до 130 кэВ. Это позволяет рекомендовать их для защиты от излучения медицинских и промышленных рентгеновских установок, для которых максимальная энергия излучения составляет около 120 кэВ. Массовая доля вольфрама в таких композициях может быть на уровне около 40% (рис. 4). C100104 является наиболее легким из подходящих материалов с плотностью 2,7 г/см³.

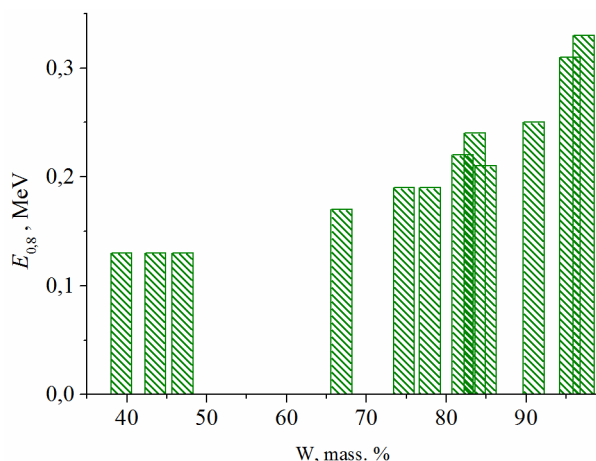


Рис. 4. Зависимость энергии гамма-квантов, при которой достигается пятикратное ослабление дозы излучения, от массового содержания вольфрама в композите.

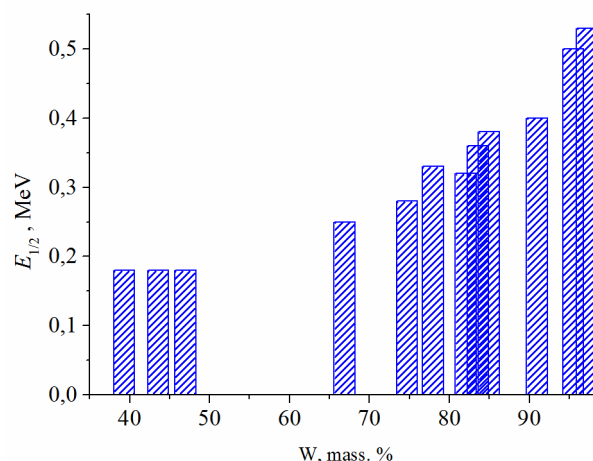


Рис. 5. Зависимость энергии гамма-квантов, при которой достигается двукратное ослабление дозы излучения, от массового содержания вольфрама в композите.

В области более высоких энергий гамма-квантов эффективность защитного слоя толщиной 10 мм быстро снижается и заметного эффекта можно достичь только для тяжелых композитов, где массовая доля вольфрама составляет более 90% (рис. 4 и 5). Как видно из рис. 4, самые тяжелые из исследованных композитов могут обеспечить для ИЗК пятикратное снижение поглощенной дозы при максимальной энергии гамма-квантов менее 0,35 МэВ. Двукратное снижение поглощенной дозы возможно для энергий гамма-квантов около 0,5 МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено сравнение радиационно-защитных свойств трех групп разработанных нами композиционных материалов на основе полистирола, армированного алюминием. Вольфрам был выбран в качестве добавки, обеспечивающей основную долю гамма-излучения. Данные композитные материалы разработаны для использования в индивидуальных защитных комплектах. Исходя из расчетных значений относительного ослабления поглощенной дозы гамма-излучения, можно сделать вывод, что для достижения пятикратного ослабления дозы излучения при помощи насыпного защитного слоя толщиной 10 мм в области энергий гамма-квантов до 130 кэВ, массовая доля вольфрама в композите должна составлять не менее 40%. Такой композит можно использовать для защиты от излучения медицинских и промышленных рентгеновских установок, для которых максимальная энергия излучения составляет ≈ 120 кэВ. Среди исследованных образцов минимальную плотность (менее 3 г/см^3) имеют материалы C080106 и C100104.

Более тяжелые композиты могут быть рекомендованы для использования в стационарных системах защиты от ионизирующего излучения, где нет жестких весовых ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prohorenko E.M., Klepikov V.F., Lytvynenko V.V. et al. Improving of characteristics of composite materials for radiation biological protection // Problems of atomic science and technology. – 2013. – No.6/(88). – P. 240-243.
2. Prohorenko E.M., Klepikov V.F., Lytvynenko V.V. et al. Metal containing composition materials for radiation protection // Problems of atomic science and technology. – 2014. – No.4/(92). – P. 125-129.
3. Klepikov V.F., Kruchinin S.P., Novikov V.E., Kruchinin D.S. Nonlinear current oscillations in the fractal Josephson junction // Material Science Poland. – 2005. – Vol. 23. – No.4. – P. 1009-1013.
4. Dubinko V.I., Klepikov V.F. The influence of non-equilibrium fluctuation on radiation damage and recovery of metals under irradiation. // Journal of Nuclear Materials. – 2007. – Vol. 362. – P. 146-151.
5. Marakin O.A., Pavlenko V.I., Kiriya I.I. et al. Composite material for radiation protection // Application for the invention of the Russian Federation 2001119709/06 (020835), МРК7 G21F 1/10. Application 2001119709/06; appl. 16.07.2001; publ. 20.02.2002. ВІРМ 5.
6. Gulbin V.N. Development of the composite materials modified by nano powders, for radiation protection in atomic engineering // Nuclear physics and engineering. – 2011. – Vol. 2. – No.3. – P.272-286.
7. Prohorenko E.M., Klepikov V.F., Lytvynenko V.V. et al. Improvement of characteristics of composite materials for biological protection from nuclear radiation // Abstracts of the XXIII International conference on accelerating of the charged particles, Alushta, on September, 08-14. – 2013. – P.158.
8. Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H. et al. Geant4 developments and applications // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – Vol.53. – P. 270-278.