

С. В. Габелков, А. А. Ключников, Е. Е. Олейник, П. Е. Пархомчук,
Г. Ф. Чемерский, В. Н. Щербин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова 36а, Чернобыль, 07270, Украина

НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПОРОВЫЕ КАНАЛЫ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ЛАВООБРАЗНЫХ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Проведено изучение порового пространства лавообразных топливосодержащих материалов (ЛТСМ) объекта «Укрытие» с использованием нового метода определения объемов открытых поровых каналов по удалению рабочей жидкости из них при ее испарении. Поровое пространство ЛТСМ состоит из крупных газовых пор (значительно более 10 мкм), малых газовых пор (~10 мкм), трещин (толщина 2 - 2,5 мкм) и наноразмерных поровых каналов (диаметр 40 - 60 нм). Наноразмерные поровые каналы и, возможно, трещины соединяют газовые поры в сплошной каркас открытых каналов. Газовые поры сформировались на заключительной стадии аварии 4-го блока ЧАЭС за счет уменьшения растворимости газов в силикатной стекломатрице при снижении температуры, трещины, по-видимому, за счет увеличения объема кристаллических включений оксидов урана и быстрого охлаждения поверхностных слоев ЛТСМ, наноразмерные поровые каналы - результат накопления радиационных дефектов при самооблучении ЛТСМ за счет α -распада трансурановых элементов.

Ключевые слова: лавообразные топливосодержащие материалы, поровое пространство, газовые поры, трещины, наноразмерные поровые каналы.

Введение

Лавообразные топливосодержащие материалы (ЛТСМ) содержат основную часть радионуклидов и в силу этого определяют ядерную, радиационную и экологическую безопасность объекта «Укрытие». Для прогнозирования поведения ЛТСМ в будущем необходимо знать их структурные характеристики [1]. За время, прошедшее после аварии 4-го блока ЧАЭС, достаточно полно изучены кристаллические включения и силикатная стекломатрица ЛТСМ. Определены содержание, фазовый состав и размеры кристаллических включений, элементный состав силикатной стеклофазы, распределение урана между кристаллическими включениями и силикатной стеклофазой [2 - 4].

Известны данные по открытой пористости ЛТСМ, коричневой и черной керамики [2 - 3]. В ЛТСМ присутствуют поры двух физически существенно различающихся масштабов: макроскопические и ультрамикropоры [5]. Макроскопические поры являются следствием коалесценции газовых пузырей и сформировались при охлаждении ЛТСМ за счет уменьшения растворимости газов в ЛТСМ при понижении температуры. Это поры округлой формы широкого интервала размеров от нескольких микрон до десятков сантиметров. При получении силикатных стекол такие поры являются закрытыми [6]. Микropоры образованы естественными пустотами внутри силикатных циклов и, по-видимому, имеют характерные размеры 0,26 нм [5, 7 - 9].

Поровое пространство ЛТСМ и его составляющие (открытые поровые каналы и закрытые поры) являются элементами структуры ЛТСМ и требуют более углубленного изучения. Данные по количеству совокупностей открытых поровых каналов, объемному содержанию каждой совокупности и диаметру открытых поровых каналов имеют особенно важное значение. По открытым поровым каналам может происходить поступление воздуха и воды в ЛТСМ, оказывая существенное влияние на процессы деградации их структуры и свойств.

Целью работы было исследование порового пространства ЛТСМ и определение характеристик его составляющих, открытых поровых каналов, для использования при долгосрочном прогнозировании изменения структуры и физико-химических свойств ЛТСМ.

Методика эксперимента

Исследовались образцы черной, коричневой и полихромной керамики, которые характерны для помещений 305/2 и 304/2, парораспределительного коридора и помещения 305/2 соответственно.

При исследованиях использовался метод определения объемов каждой из имеющихся в пористом теле совокупностей открытых поровых каналов по удалению рабочей жидкости из них при ее испарении [10, 11]. Образцы ЛТСМ в виде пластин с размерами (3 - 3,5) × (20 - 30) × (30 - 40) мм по-

© С. В. Габелков, А. А. Ключников, Е. Е. Олейник,
П. Е. Пархомчук, Г. Ф. Чемерский, В. Н. Щербин, 2014

мещали в вакуумную камеру. Проводили откачку до давления $6 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. для удаления воздуха из поровых каналов и заполняли их рабочей жидкостью - дистиллированной водой. Затем проводили контролируемую сушку для удаления рабочей жидкости при ее испарении и определяли зависимость массы системы от времени при постоянной температуре.

Микроструктуру материалов исследовали методом керамографии.

Кажущуюся плотность образцов ЛТСМ определяли методом гидростатического взвешивания, пикнометрическую – методом водной пикнометрии.

Экспериментальные результаты

Образцы коричневой, черной и полихромной керамики имели кажущуюся плотность 2,39, 1,66 и 2,73 г/см³, открытую пористость – 13, 20 и 0 % соответственно. Образцы полихромной керамики открытой пористости не имели.

Коричневая керамика содержит поры, близкие к сферической форме, с диаметрами в трех диапазонах размеров: 100 - 200, 40 - 50 и ~10 мкм (рис. 1).

Зависимость массы системы «коричневая керамика - вода» от времени при температуре 36 - 37 °С, представлена на рис. 2. Масса системы с течением времени убывает. Зависимость содержит пять линейных участков: четыре наклонных и один, параллельный оси абсцисс. Она является ломаной линией, которая может быть представлена как сумма пяти линейных зависимостей. Прямые, продолжающие линейные участки до пересечения с осью ординат, отсекают на последней величины масс, разности которых ($m_0 - m_1$), ($m_1 - m_2$), ($m_2 - m_3$) и ($m_3 - m_4$) численно равны объемам четырех совокупностей поровых каналов различного диаметра. Их относительные объемы представлены в табл. 1. Величина массы, соответствующая пятому участку, численно равна массе твердой фазы.

Абсциссы точек последовательного пересечения этих прямых друг с другом дают значения продолжительностей стадий испарения воды из каждой совокупности поровых каналов. Продолжительности четырех стадий и их нормированные на толщину образца продолжительности представлены в табл. 1.

Зависимость массы системы «черная керамика – вода» от времени при температуре 41,5 °С имеет также один участок параллельный оси абсцисс и четыре наклонных линейных участка и подобна таковой для системы «коричневая керамика – вода» (см. рис. 2). Относительные объемы, продолжительности стадий и нормированные на толщину образца продолжительности стадий представлены в табл. 2.

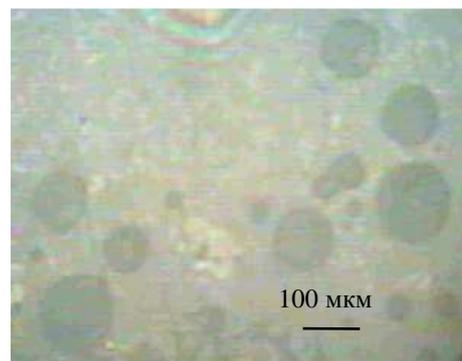


Рис. 1. Микрофотография коричневой керамики.

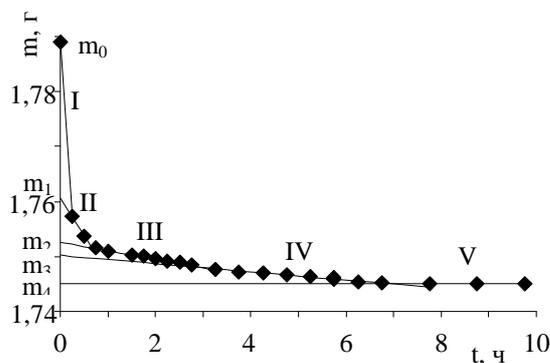


Рис. 2. Зависимость массы системы «коричневая керамика - вода» от времени сушки.

Таблица 1. Относительные объемы, продолжительности стадий и нормированные продолжительности стадий поровых каналов в коричневой керамике ЛТСМ

Характеристики	I	II	III	IV
Относительный объем, % об	10,7	1,3	0,3	0,7
Продолжительность стадий, ч	0,25	0,66	3	6,94
Нормированная продолжительность стадий, ч/см	1,7	4,4	20,0	46,3

Примечание. Температура контролируемой сушки составляла 36 - 37 °С; I – IV - стадии.

Таблица 2. Относительные объемы, продолжительности стадий и нормированные продолжительности стадий поровых каналов в черной керамике ЛТСМ

Характеристики	I	II	III	IV
Относительный объем, % об	15,3	2,04	1,32	1,35
Продолжительности стадий, ч	0,6	3,2	7,3	24,4
Нормированные продолжительности стадий, ч/см	3,0	16,0	36,5	122,0

Примечание. Температура контролируемой сушки составляла 41 - 42 °С; I - IV - стадии.

Обсуждение результатов

Рассмотрим данные, характеризующие коричневую керамику. Опыт применения метода определения объемов каждой из имеющихся в пористом теле совокупностей поровых каналов свидетельствует о том, что нормированную продолжительность 46,3 ч/см имеют поровые каналы с эффективным диаметром не более 40 - 60 нм [11]. Стадия IV соответствует удалению воды из наноразмерных поровых каналов. Нормированные продолжительности ~4 ч/см имеют поровые каналы с диаметром 5 - 15 мкм. Стадия II соответствует удалению воды из газовых пор с диаметром ~10 мкм. Из поровых каналов большим диаметром (значительно больше 10 мкм) вода испаряется относительно быстро и при нормированной продолжительности 1,7 ч/см стадия I соответствует порам с диаметрами 100 - 200 и 40 - 50 мкм.

Известно, что при использовании метода определения объемов поровых каналов по удалению рабочей жидкости при ее испарении [10, 11] средний диаметр каналов d при вязком течении водяного пара в поровых каналах зависит от нормированной продолжительности удаления воды из канала следующим образом [12]

$$d = \frac{a}{t_n^{1/2}} + b, \quad (1)$$

где t_n - нормированная продолжительность удаления воды из поровых каналов; a и b - константы.

Принимая $d_1 = 10$ мкм, $d_2 = 40$ нм и $t_{n1} = 4,4$ ч/см, $t_{n2} = 46,3$ ч/см, найдем значения $a = 30202,7$ нм/(ч/см) и $b = -4398,7$ нм. Тогда по формуле (1) получим, что стадия III с нормированной продолжительностью 20 ч/см соответствует каналам с диаметром 2,3 мкм. Принимая во внимание диаметр этих каналов, можно утверждать, что объектами с такими характеристиками вполне могут быть трещины. При их оценочной длине 100 - 200 мкм их средняя толщина вполне может соответствовать 2,3 мкм [13].

Поровое пространство коричневой керамики ЛТСМ представлено четырьмя совокупностями поровых каналов: газовые поры с диаметром значительно больше 10 мкм, газовые поры с диаметром ~10 мкм, трещины со средней толщиной ~2,3 мкм и каналы с диаметром не более 40 - 60 нм. Относительный объем составляющих порового пространства в ряду «большие газовые поры - малые газовые поры - трещины» уменьшается и составляет 10,7; 1,3 и 0,3 % соответственно. Относительный объем наноразмерных поровых каналов составляет 0,7 % (см. табл. 1).

Как большие (более 10 мкм), так и малые (~10 мкм) газовые поры имеют округлую, близкую к сферической, форму (см. рис. 1). Такая форма характерна для закрытых пор [6]. Тот факт, что газовые поры входят в состав доступной извне открытой пористости, однозначно указывает на то, что они соединены между собой и с поверхностью образцов ЛТСМ. Соединять их могут только другие составляющие порового пространства, например наноразмерные поровые каналы и, возможно, трещины.

У черной керамики относительный объем составляющих порового пространства в ряду составляющих, соответствующих I, II и III стадиям, также уменьшается (см. табл. 2), но он имеет большие значения, чем у соответствующих стадий коричневой керамики (см. табл. 1). Значительно большие значения продолжительностей стадий удаления воды из поровых каналов черной керамики (см. табл. 2), несмотря на большую температуру контролируемой сушки, свидетельствуют о принципиально другом состоянии порового пространства, чем у коричневой керамики. Поровое пространство черной керамики требует дополнительного изучения.

Трещины в ЛТСМ, по всей видимости, являются результатом увеличения объема кристаллических включений за счет окисления оксида урана, а наноразмерные каналы - результат накопления радиационных дефектов в ЛТСМ при их самооблучении.

Известен [14] метод определения активности образцов материалов, содержащих α -активные радионуклиды, основанный на регистрации треков α -частиц на поверхности специально подготовленных силикатных стекол. Травлением выявляются, а затем подсчитываются треки α -частиц, вышедших из образцов, помещенных на силикатное стекло. Эти данные дают основания считать, что наноразмерные поровые каналы сформировались при накопления дефектов в результате взаимодействия α -частиц, образовавшихся при α -распаде радионуклидов, с материалом [15], так как основным физическим механизмом, определяющим динамику радиационных повреждений ЛТСМ, является излучение α -частиц [16].

Исследования, проведенные ранее [5, 7 - 9], указывали на наличие только двух совокупностей поровых каналов, одной из которых назывались газовые поры. Возможно, 15 лет назад ЛТСМ и имели только две совокупности поровых каналов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что поровое пространство коричневой керамики ЛТСМ состоит из четырех составляющих: 1) крупных газовых пор (значительно более 10 мкм), малых газовых пор (~10 мкм), трещин (средняя толщина 2 - 2,5 мкм) и наноразмерных поровых каналов (диаметром 40 - 60 нм). Наноразмерные поровые каналы и, возможно, трещины соединяют газовые поры в сплошной каркас открытых поровых каналов порового пространства.

Газовые поры сформировались при охлаждении ЛТСМ на заключительной стадии аварии 4-го блока ЧАЭС за счет понижения растворимости газов в силикатной стекломатрице при снижении температуры.

Основная часть трещин сформировались, по-видимому, за счет увеличения объема кристаллических включений, например оксидов урана при их окислении. Меньшая часть трещин имеет термическое происхождение за счет быстрого охлаждения поверхностных слоев ЛТСМ.

Наноразмерные поровые каналы, несомненно, являются результатом накопления дефектов при самооблучении ЛТСМ. Дефекты сформировались при взаимодействии материала с α -частицами, образовавшимися при α -распадах трансурановых элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключников А.А., Краснов В.А., Рудько В.М., Щербин В.Н. Объект «Укрытие»: 1986 – 2006. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2006. – 167 с.
2. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. – М.: Наука, 2010. – 240 с.
3. Изучение физико-химических свойств ядерно-опасных делящихся материалов объекта "Укрытие", влияющих на степень ядерной, радиационной и радиэкологической безопасности объекта «Укрытие»: (Отчет о НИР) / ИПБ АЭС НАН Украины; Руководитель В. И. Краснов. – ДР 0101U002568; Инв. № 3970. – Чернобыль, 2007.
4. Пазухин Э.М. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования // Радиохимия. – 1994. – Вып. 2. – С. 97 - 142.
5. Жидков А.В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их свойств // Проблемы Чернобиля. – 2001. – Вып. 7. – С. 23 - 40.
6. Кузьмина О.В. Химическая технология стекла и ситаллов: учебное пособие. – Томский политехнический университет, 2012. – 184 с.
7. Жидков А.В., Гончар В.В., Веклич Е.Л., Горин В.М. и др. Исследования физико-химических свойств топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» // Проблемы Чернобиля. – 1998. – Вып. 3. – С. 33 - 35.
8. Исследование взаимодействия лавообразных топливосодержащих материалов объекта "Укрытие" с водой и атмосферой: (Отчет о НИР) / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины; Руководитель А. В. Жидков. – ДР 0195U003875. – Инв. № 3651. – Чернобыль, 1997.
9. Доступная пористость и молекулярно-ситовые свойства лавообразных топливосодержащих материалов объекта "Укрытие": (Отчет о НИР) / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины; Руководитель А. В. Жидков. – ДР 0195U003875. – Инв. № 3723. – Чернобыль, 1998.
10. Габелков С.В. Макаренко В.В., Миронова А.Г. и др. Определение объема поровых каналов пористых материалов по удалению из них воды при испарении // Огнеупоры и техническая керамика. – 2006. – № 12. – С. 41 - 47.
11. Габелков С.В. Физические основы и опыт применения метода определения объемов совокупностей поровых каналов в порошках и пористых телах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые металлы и сверхпроводники. – 2011. – № 6. – С. 71 - 75.

12. Габелков С.В., Тарасов Р.В., Миронова А.Г., Литвиненко Л.М. Эволюция структурной организации ксерогеля при получении наноразмерного порошка оксида циркония // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2008. – Т. 6. – Вып. 4. – С. 1315 - 1330.
13. Вивчення фізичних механізмів дії внутрішніх і структурних чинників, відповідальних за процеси деградації паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття» в період його переведення в екологічно безпечну систему: (Звіт про НДР) / МНТЦ «Укриття» НАН України; Керівник С. В. Габелков. – ДР 0108U001773. – Інв. № 4007. – Чорнобиль, 2012.
14. Дюрани С., Бал Р. Твердотельные ядерные детекторы / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 264 с.
15. Габелков С.В., Ключников А.А., Олейник Е.Е. и др. Наноразмерные поровые каналы в лавообразных топливосодержащих массах объекта «Укрытие» // Тез. Докл. 4-й Междунар. конф. «HighMatTech», 7 - 11 октября 2013, г. Киев, Украина. – С. 197.
16. Радиационные повреждения в лавообразных топливосодержащих материалах объекта «Укрытие» / В. Г. Баряхтар, В. В. Гончар, А. В. Жидков, А. А. Ключников - Чернобыль, 1998 - 17 с. - (Препр. / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 98-12).

С. В. Габелков, О. О. Ключников, Є. Є. Олійник, П. Є. Пархомчук, Г. Ф. Чемерський, В. М. Щербін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

НАНОРОЗМІРНІ ПОРОВІ КАНАЛИ ЯК СКЛАДОВА ПОРОВОГО ПРОСТОРУ ЛАВОПОДІБНИХ ПАЛИВОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

Проведено дослідження порового простору лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ) об'єкта «Укриття» з використанням нового методу визначення об'ємів відкритих порових каналів за видаленням робочої рідини з них при її випаровуванні. Поровий простір ЛПВМ складається з великих газових пор (значно більших 10 мкм), малих газових пор (~10 мкм), тріщин (товщина 2 - 2,5 мкм) і нанорозмірних порових каналів (діаметр 40 - 60 нм). Нанорозмірні порові канали й, можливо, тріщини з'єднують газові пори в суцільний каркас відкритих каналів. Газові пори сформувалися на заключній стадії аварії 4-го блока ЧАЕС за рахунок зменшення розчинності газів у силікатній скломатриці при зниженні температури, тріщини, очевидно, за рахунок збільшення об'єму кристалічних включень оксидів урану та швидкого охолодження поверхневих шарів ЛПВМ, нанорозмірні порові канали - результат накопичення радіаційних дефектів при самопромінненні ЛПВМ за рахунок α -розпаду трансуранових елементів.

Ключові слова: лавоподібні паливовмісні матеріали, поровий простір, газові пори, тріщини, нанорозмірні порові канали.

S. V. Gabelkov, O. O. Kliuchnykov, Ye. Ye. Oliynyk, P. E. Parkhomchuk, G. F. Chemersky, V. M. Shcherbin

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

NANOSIZED PORE CHANNELS AS A COMPONENT OF PORE SPACE OF LAVA-LIKE FUEL-CONTAINING MATERIALS OF «UKRYTTYA» OBJECT

We used a new method for determining the volume of the open pore channels by evaporating the liquid from them to study of the pore space of the lava-like fuel-containing materials (LFCM) of the "Shelter" object. The pore space of the LFCM consists of large gas pores (significantly bigger than 10 microns), small gas pores (~10 microns), cracks (with thickness of 2 - 2.5 microns), and nanosized pore channels (diameter 40 - 60 nm). Nanosized pore channels, and possibly cracks, interconnect the gas pores into a continuous structure of open channels. Gas pores were formed because of the lowering of the solubility of gases in a silicate glass matrix when the temperature dropped in the final phase of the accident of the 4-th block of Chernobyl NPP. The formation of the cracks was apparently caused by the increase of the volume of the crystalline inclusions of uranium oxide and the rapid cooling of the surface layers of the LFCM. The nanosized pore channels are the result of the accumulation of the radiation defects during self-irradiation of LFCM, at the expense of α -decay of transuranium elements.

Keywords: lava-like fuel-containing materials, pore space, gas pores, cracks, nanosized pore channels.

REFERENCES

1. Kluchnikov A.A., Krasnov V.A., Rudko V.M., Shherbin V.N. «Shelter» object 1986 – 2006. – Chornobyl: IPB AES NAS of Ukraine, 2006. – 167 p. (Rus)
2. Arutyunyan R.V., Big L.A., Borovoy A.A., Velikhov E.P. Nuclear fuel into «Shelter» object of Chornobyl' atomic power station. – Moskva: Nauka, 2010. – 240 s. (Rus)
3. Study of physicochemical properties of fuel-containing materials of «Shelter» object, which influence on degree nuclear, radiative and radio-ecological safety of «Shelter» object: (Report o NIR) IPB AES NAS of Ukraine; Research manager. V. I. Krasnov. – Dr 0101U002568; Inv. № 3970. – Chornobil, 2007. (Rus)

4. *Pazuxin E.M.* Lava-like fuel-containing mass of 4th block of Chernobyl NPP: topography, physicochemical properties, generation script // *Radioximiya*. – 1994. – Iss. 2. – P. 97 - 142. (Rus)
5. *Zhidkov A.V.* Fuel containing materials "Shelter" object today: actual physical properties and the ability to project their properties // *Problemy Chornobylya*. – 2001. – Iss. 7. – P. 23 - 40. (Rus)
6. *Kuzmina O.V.* Chemical technology of glass and ceramics: a tutorial. - Tomsk Polytechnic University, 2012. – 184 p. (Rus)
7. *Zhidkov A.V., Gonchar V.V., Veklich E.L., Gorin V.M.*. Study of physical and chemical properties of fuel-containing materials "Shelter" object // *Problemy Chornobylya*. – 1998. – Iss. 3. – P. 33 - 35. (Rus)
8. *Investigation of the interaction of lava-like fuel-containing materials of "Shelter" object with the water and the atmosphere: (Report o NIR) ISTC «Ukrytie»; Research manager. A. V. Zhidkov. – Dr 0195U003875. – Inv. № 3651. – Chornobyl, 1997. (Rus)*
9. *Accessible porosity and molecular sieve properties lava-like fuel materials "Shelter" object: (Report o NIR) ISTC «Ukrytie»; Research manager. A. V. Zhidkov. – Dr 0195U003875. – Inv. № 3723. – Chornobyl, 1998. (Rus)*
10. *Gabelkov S.V., Makarenko V.V., Mironova A.G. at al.* Determination of the volume of the pore channels of porous materials to remove them from the water by evaporation // *Ogneupory i texnicheskaya keramika*. – 2006. – № 12. – P. 41 - 47. (Rus)
11. *Gabelkov S.V.* Physical basis and experience of the method for determining the volume of total pore channels in powders and porous solids // *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser. Vacuum, pure metals and superconductors*. – 2011. – № 6. – P. 71 - 75. (Rus)
12. *Gabelkov S.V., Tarasov R.V., Mironova A.G., Litvinenko L.M.* Evolution of the structural organization of the xerogel in obtaining nano-sized zirconia powder // *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotehnologii*. – 2008. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 1315 - 1330. (Rus)
13. *Study of the physical mechanisms of internal and structural factors, which was responsible for the degradation of fuel-containing materials "Shelter" object during its conversion to an environmentally safe system: (Report NDR) ISTC «Ukrytyta»; Research manager. S. V. Gabelkov. – Dr 0108U001773. – Inv. № 4007. – Chornobyl, 2012. (Ukr)*
14. *Duran C., P Ball.* Solid state nuclear detectors, transl. froms english. – Moskva: Energoatomizdat, 1990. – 264 p. (Rus)
15. *Gabelkov S.V., Kliuchnykov A.A., Olejnik E.E., at al.* Nanoscale pore channels in the lava-like fuel masses "Shelter" object // Report 4-th International. konf. «Highmattech», 7 - 11 october 2013, Kyiv, Ukraine. – P. 197. (Rus)
16. *Radiation damage in the lava-like fuel materials of "Shelter" object / V. G. Bar'yakhtar, V. V. Gonchar, A. V. Zhidkov A. A. Kliuchnykov. - Chornobyl, 1998 - 17 p. - (Prepr. / NAS of Ukraine. ISTC "Ukrytie"; 98-12). (Rus)*

Надійшла 19.02.2014
Received 19.02.2014