

УДК 621.039.56

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.06

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСТИРАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ИОНИЗИРУЮЩЕМ ИЗЛУЧЕНИИ

А. И. КОМИР¹, Н. П. ОДЕЙЧУК¹, В. И. ТКАЧЕНКО^{1,2*}

¹ НПК «ВИЭРТ», Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, УКРАИНА

² ФЭФ, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, УКРАИНА

*email: tkachenko@kipt.kharkov.ua

АННОТАЦИЯ Для анализа пылеобразования при истирании однотипных углеродных материалов выполнены их трибологические испытания при температурах 400-600 °С в окислительной среде под воздействием ионизирующего излучения. Показано, что скорость увеличения массы порошка графита в логарифмическом масштабе пропорциональна температуре испытаний. Определено, что при температурах испытаний и под воздействием электронного пучка графиты марки МПГ подвержены истиранию в большей степени, чем графиты марок АРВ, ГСП, УУКМ. Установлено, что для пор диаметром порядка микрона износ меньше, чем для наноразмерных пор. Показано, что для наноразмерных пор истираемость пропорциональна их размеру. Предложена физическая модель истирания углеродных материалов.

Ключевые слова: ядерный графит; трибологические испытания; окисление; электронные пучки; истирание

TRIBOLOGICAL TESTS AND PHYSICAL MODEL OF ERASING OF CARBON MATERIALS IN THE OXIDATIVE MEDIUM AT HIGH TEMPERATURES AND IONIZING RADIATION

А. КОМИР¹, А. ОДЕЙЧУК¹, В. ТКАЧЕНКО^{1,2*}

¹ SPE «RESST», National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology», Kharkiv, UKRAINE

² School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT In this paper, we describe the tribological tests of carbon materials at high temperatures (400-600 °C), in an oxidizing medium and under the influence of ionizing radiation. The aim of the study is to analyze the dust formation during erasing of the same type of graphite samples. In experiments used the method developed earlier, a rapid analysis of the dependence of the change in mass of graphite powder on attrition time was carried out. It is shown that, on a logarithmic scale, the rate of change in mass of the graphite powder can be considered as linear dependence on temperature. It has been experimentally determined that with increase of experiments temperature, and under the influence of the electron beam, the graphite of MPG grade is most vulnerable to erasing wear. Grades of graphite ARV, GSP, UUKM have less wear compared to grade of graphite MPG. It is concluded that for pores of large diameters (of the order of a micron) wear is less than for nanoscale pores. It is shown that in nano-sized range of pores the smaller the pore size, the less the erasing. On the basis of the experimental data obtained, a physical model is proposed for describing the time dynamics of reactor graphites erasing at different temperatures and under the influence of an electron beam. The physical model of nuclear graphite erasing is based on a simplified scheme of reactor graphite attrition process, which considers the process of destruction of graphites in contact boundary layer with a thickness of order of the double mean diameter of the prevailing pores. Under the assumption of an insignificant change in temperature as a result of friction, as well as the effect of an electron beam, an equation for the change in the mass of the graphite powder in time is obtained.

Keywords: nuclear graphite; tribological tests; oxidation; electron beams; erasing

Введение

Проблема истирания ядерного графита привлекает пристальный интерес исследователей в связи с необходимостью обеспечения длительного, безаварийного его использования в конструктивных материалах ядерной энергетики. К настоящему времени эта проблематика является актуальной, но недостаточно хорошо изученной [1, 2].

Для определения истираемости реакторных графитов в активной зоне ядерного реактора предпочтительным методом исследования являются реакторные испытания, т.к. они являются наиболее объективными и приближенными к реальным условиям. Однако, в то же время, они являются и

самыми дорогостоящими. Поэтому перед исследователями стоит задача проведения экспрессных исследований трибологических свойств реакторных графитов на более доступной, и экономически выгодной основе. В качестве методики, способной замедлить реакторные испытания предложена методика, в которой исследуемые образцы подвергаются истиранию при высоких температурах в окислительной среде и при воздействии электронного пучка [3]. Роль электронного пучка заключается в обеспечении эффектов, связанных, например, с уменьшением энергии активации окислительных процессов, а также с увеличением скорости диффузии дефектов.

Разработанный и описанный в [3] стенд позволяет проводить трибологические испытания с одновременным воздействием на исследуемые образцы высокой температуры, окислительной среды и ускоренных электронов.

Цель работы

Целью работы является проведение трибологических испытаний и создание модели истирания углеродных материалов при высоких температурах (400-600 °С), в условиях окислительной среды и при воздействии ионизирующего излучения.

Экспериментальная установка и результаты опытов

Трибологические испытания углеродных материалов проводились в потоке кислорода при давлении 0,1 МПа при нагрузке 29,4 Н, которая осуществлялась с помощью калиброванного груза. Скорость вращения истирающего образца составляла 30 об./мин (47,1 мм/с пройденного пути).

Точность измерения температуры при использовании термопар хромель-алюмель составляла $\pm 2,5$ °С. Термопары помещены в истираемый и истирающий образцы и закреплены вблизи области облучения. Такая схема размещения термопар обеспечивает достаточный контроль температуры образцов, в том числе и температуры вблизи площади контакта, на которую был сфокусирован электронный пучок. Температура испытаний образцов охватывает интервал от 400 °С до 600 °С.

Взвешивание образцов производилось с помощью аналитических весов АД-200, точность взвешивания – 0,5 мг. Линейные размеры образцов измерялись с помощью штангельциркуля 0-200 мм, точность измерения – 0,05 мм, микрометра 0-25 мм, точность измерения – 0,01 мм.

Исследование коррозионных и трибологических свойств углеродных материалов проводилось в потоке кислорода в течение 1 и 3 часов при параметрах пучка электронов: энергия электронов – 2,5 МэВ, ток пучка электронов – до 1000 мкА.

Для исследования коррозионных и трибологических свойств углеродных материалов по описываемой методике использовались экспериментальные образцы (размер 2х3х40 мм) следующих марок графитов и композиционных материалов: АРВ (плотность 1,63 г/см³), МПГ (плотность 1,69 г/см³), ГСП (плотность 1,77 г/см³) и УУКМ (плотность 1,49 г/см³).

В Таблице 1 приведены результаты по износу указанных углеродных материалов в кислороде без облучения и при облучении электронами при температуре 400 °С и 600 °С в течение 1 часа.

Как видно из данных Таблицы 1, облучение электронами увеличивает скорость износа углеродных материалов в кислороде при температуре

400 °С в 3-4 раза в режиме «трение со скольжением», а при температуре 600 °С – на один-два порядка в режиме «трение с большим износом», по сравнению со скоростью износа при 400 °С без облучения. Это обусловлено, как влиянием окислительной среды (кислород), так и структурными изменениями в углеродных материалах, обусловленные влиянием ионизирующего излучения (электроны).

Наличие структурных изменений, связанных с воздействием ионизирующего излучения, подтверждено рентгеноструктурными исследованиями, проведенными на исходных и облученных образцах [4].

Таблица 1 – Удельная скорость износа графитовых образцов при облучении электронами в кислородной среде при разных температурах

Материал / ρ - плотность (г·см ⁻³)	Удельная скорость износа, $\times 10^{-5}$ мг/(мм ² ·с)		
	$T_{\text{экспер.}} \sim$ 400 °С	$T_{\text{экспер.}} \sim$ 400 °С	$T_{\text{экспер.}} \sim$ 600 °С
МПГ / 1,69	0,12	0,45	35,6
АРВ / 1,63	0,69	2,60	3,70
ГСП / 1,77	3,39	10,2	36,6
УУКМ / 1,49	2,81	11,7	176,8

* Без облучения

Площадь контакта истираемого образца равна $S_0 = 3 \times 2 = 6$ мм², где первая и вторая цифры соответствуют длине и ширине образца. При радиусе цилиндрического истирающего тела 60 мм, испытание на истирание можно рассматривать в плоской геометрии, т.е. границу контакта считать плоской.

Плоская граница контакта истираемого и истирающего графитов характеризуется существенной неровностью отдельных ее участков.

Упрощенная схема и физическая модель истирания реакторного графита

Для простоты рассмотрения полагаем, что высота и расстояние таких отклонений от плоскости сравнимы и определяются максимальной величиной диаметра преобладающих пор, т.е. размером макропор [5].

Например, для реакторных графитов АХФ, IG - 50, АТJ преобладающий максимальный размер пор составляет величину $d = 0,55$ мкм, $d = 1,04$ мкм, $d = 4,71$ мкм соответственно [6].

По данным [7], при давлении прессования 1 МПа средний радиус преобладающих пор, в зависимости от гранулометрического состава, составляет величину от 5,8 мкм (непрерывный гранулометрический состав) до 11,2 мкм (монофракция).

Процесс разрушения графитов при трении с образованием порошка происходит в контактном пограничном слое (КПС) толщиной порядка двойного среднего диаметра преобладающих пор. Обобщая данные [6, 7], будем считать толщину КПС равной нескольким микронам.

В контактном слое трущихся участков реакторного графита, несмотря на малое приложенное давление P : $P \ll E$, где E – модуль продольной упругости реакторного графита, наблюдается процесс его деформации и разрушения. Такое разрушение трущихся поверхностей графита может быть объяснено, по-видимому, эффектом, аналогичным квазиплавлению малых металлических частиц [8].

Упрощенная схема процесса истирания реакторного графита приведена на Рис. 1.

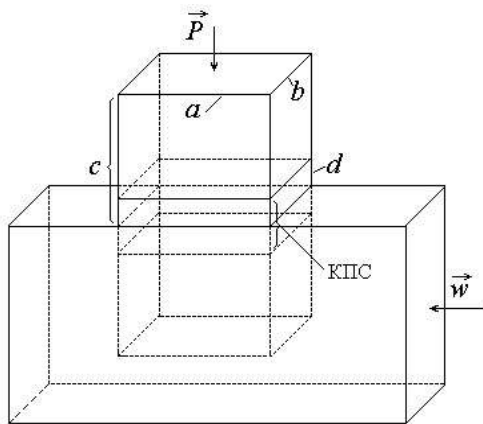


Рис. 1 – Схематическое изображение процесса истирания реакторного графита

Исходя из приведенной на Рис. 1 схемы, сформулируем физическую модель истирания реакторного графита. Для этого определим изменение в единицу времени массы истираемых образцов объема V_0 :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{M}{V_0} w S_{\perp}, \quad (1)$$

где $M = 2(M_0 - m)$ – масса двух одинаковых истираемых образцов графита с общим объемом $V_0 = 2abc$, M_0 – начальная масса истираемого образца, m – масса порошка графита, образуемого одним образцом, $S_{\perp} = 2bd$ – поперечная к направлению скольжения площадь образцов графитов, $b = 2$ мм – ширина истираемого образца графита, c – высота истираемого образца графита, $d (d \ll c)$ – преобладающий максимальный диаметр пор, $w = 47,1$ мм/с – скорость истирающего образца графита.

Из (1) получим уравнение изменения массы порошка во времени:

$$\frac{dm^*}{dt^*} = 2(1 - m^*) \frac{wt_0 d}{ac}, \quad (2)$$

где $m^* = \frac{m}{M_0}$ – безразмерная масса порошка графита, $t^* = \frac{t}{t_0}$ – безразмерное время, $t_0 = 1$ с. Решение уравнения (2) имеет вид:

$$m^* = (1 - \exp(-\lambda t^*)), \quad (3)$$

$$\lambda = 2 \frac{wt_0 d}{ac}$$

Из (3) следует, что масса порошка графита с течением времени изменяется от нуля, и стремится к начальной массе образца, т.е. исходные образцы графита истираются полностью.

Скорость изменения массы порошка графита определяется выражением:

$$\frac{dm^*}{dt^*} = 2(1 - m^*) \frac{wt_0 d}{ac} = \lambda \exp(-\lambda t^*). \quad (4)$$

Используем выражение (4) для интерпретации приведенных выше результатов трибологических испытаний графитовых образцов при облучении электронами в кислородной среде при температуре 400 °С и 600 °С в течение 1 часа.

При этом необходимо отметить следующие два фактора.

Первый фактор. При трибологических испытаниях температура поверхности соприкосновения может отличаться в большую сторону от поддерживаемой в эксперименте из-за работы силы трения поверхностей, а также экзотермичности реакции окисления углерода [9].

Однако это отличие по температуре во всех опытах являлось малым и одного порядка. Поэтому в дальнейших расчетах его можно не учитывать.

Второй фактор. Влияние сфокусированного на поверхность истирания электронного пучка может приводить также к отклонению заданной температуры в большую сторону. Однако и это отклонение мало в силу высокой теплопроводности реакторного графита, и отсутствия, в рамках допустимых погрешностей, отклонения температуры опытов от заданной.

Учтем влияние температуры опыта на истираемость исследуемых образцов.

В выражении (4) единственным, зависящим от температуры опыта параметром, является средний диаметр преобладающих пор $d = d(T)$. Поэтому переопределим параметр λ , выделив в нем

зависимость от температуры в виде:

$$\lambda = 2 \frac{wt_0 d_{T_0}}{ac} \frac{d}{d_{T_0}} = \lambda_{T_0} \frac{d}{d_{T_0}},$$
 где d_{T_0} – средний характерный диаметр преобладающих пор.

Будем интересоваться в первую очередь случаем, когда масса образованного порошка значительно меньше массы исходного графита. Это означает, что в правой части исходного уравнения (4) можно пренебречь m^* по сравнению с единицей. Тогда (4) принимает вид:

$$\frac{dm^*}{dt^*} = 2 \frac{wt_0 d}{ac} = \lambda_{T_0} \frac{d}{d_{T_0}}. \quad (5)$$

Прологарифмируем выражение (5), и выделим зависимость от температуры:

$$\ln\left(\frac{dm^*}{dt^*}\right) = \ln(\lambda_{T_0}) + \ln\left(\frac{d}{d_{T_0}}\right). \quad (6)$$

Известно, что средний коэффициент линейного расширения увеличивается с ростом температуры [10]. Поэтому полагаем, что средний диаметр пор также увеличивается с ростом температуры по закону $d(T) = d_{T_0} \exp\left(\alpha \frac{T - T_0}{T_0}\right)$, где α – константа, T_0 – температура опыта.

С учетом сделанного предположения, выражение (6) принимает вид:

$$\ln\left(\frac{dm^*}{dt^*}\right) = \ln(\lambda_{T_0}) + \ln\left(\frac{d}{d_{T_0}}\right) = \ln(\lambda_{T_0}) + \alpha \frac{T - T_0}{T_0} = \beta + \alpha \frac{T}{T_0}. \quad (7)$$

где $\beta = \ln(\lambda_{T_0}) - \alpha$.

Из (7) следует, что в логарифмическом масштабе скорость изменения массы порошка графита линейно зависит от температуры.

Обсуждение полученных результатов

Вывод о линейной зависимости от температуры изменения массы порошка графита хорошо согласуется с изображенными на Рис. 2 экспериментальными данными, взятыми из Таблицы 1.

На Рис. 2 разными маркерами показаны экспериментально полученные данные зависимости скорости изменения массы порошка графита от температуры для разных марок графитов.

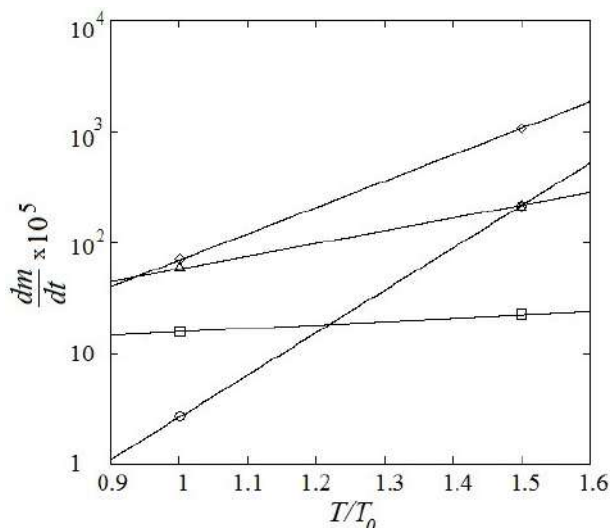


Рис. 2 – Зависимость скорости изменения массы порошка графита для марок графитов: \circ – МПГ; \square – АРВ; Δ – ГСП; \diamond – УУКМ

Прямые линии на Рис. 2 соответствуют определяемой выражением (7) аналитической интерпретации экспериментальных данных. Методом подгонки прямых линий к экспериментальным точкам определены константы, задающие расположение прямых на плоскости (см. Таблицу 2).

Из Рис. 2 следует, что с увеличением температуры опытов, и при воздействии электронного пучка, из указанных марок графитов наиболее подвержены износу на истирание графиты марки МПГ. Остальные марки графитов (АРВ, ГСП, УУКМ) имеют износ, меньший по сравнению с маркой графита МПГ. С повышением температуры опыта увеличение износа для тестируемых марок графитов, как показано в [11], связано с изменением режима трения со скольжением на режим трения с большим износом.

В абсолютном измерении, как это следует из Рис. 2, скорость износа марок графитов на истирание с увеличением температуры возрастает в порядке следования: АРВ, ГСП, УУКМ.

Таблица 2 – Параметры аналитической аппроксимации зависимости скорости изменения массы порошка графита от температуры опыта

Материал	Аналитическая аппроксимация: $\frac{dm}{dt} \times 10^5 = 2w\rho b d_{T_0} e^{-\alpha} e^{\frac{\alpha T}{T_0}}$ (мг/с)	
	α	d_{T_0} (μм)
МПГ	8,8	$8,3 \cdot 10^{-2}$
АРВ	0,7	0,508
ГСП	2,65	$1,726 \cdot 10^{-3}$
УУКМ	5,48	$2,458 \cdot 10^{-3}$

Из Таблицы 2 следует, что для пор больших диаметров (порядка микрона) износ меньше, чем для наноразмерных пор. В наноразмерном диапазоне пор наблюдается следующая зависимость истираемости графитов от температуры: чем меньше размер пор, тем меньше истираемость.

Выводы

Исследование направлено на анализ пылеобразования при истирании однотипных графитовых образцов. В качестве истираемого тела использовался графитовый параллелепипед с линейными размерами 2x3x40 мм, а в качестве истирающего тела - цилиндр из того же материала, в котором выполнены технологические углубления для размещения датчиков температуры. В экспериментах по разработанной ранее методике проводился экспресс-анализ изменения массы графитового порошка за время истирания при воздействии высоких температур, ионизирующего излучения и окислительной среды. Проведенные экспериментальные исследования показали, что в логарифмическом масштабе скорость изменения массы порошка графита можно рассматривать, как линейно зависящую от температуры. Экспериментально определено, что с увеличением температуры опытов, и при воздействии электронного пучка наиболее подвержены износу на истирание графиты марки МПГ. Остальные марки исследуемых графитов (АРВ, ГСП, УУКМ) имеют меньший износ по сравнению с маркой графита МПГ. Сделан вывод о том, что для пор больших диаметров (порядка микрона) износ меньше, чем для наноразмерных пор. Показано, что в наноразмерном диапазоне пор истираемость тем меньше, чем меньше размер пор. На основании полученных экспериментальных данных предложена физическая модель, которая описывает временную динамику истирания реакторных графитов при разных температурах и при воздействии электронного пучка.

Список литературы

1. **Burchell, T.** Milestone Report on the "Workshop on Nuclear Graphite Research" / **T. Burchell, N. Gallego, M. Srinivasan** // *Oak Ridge National Laboratory*. – 2009. – 20 p.
2. **Hiruta, M.** Experimental study of dust generation from nuclear grade graphite spheres in frictional contact under a pressurized inert atmosphere at elevated temperatures, Master's Thesis / **M. Hiruta** // *University of Idaho, Idaho Falls, ID*. – 2013.
3. **Комир, А. И.** Методика и результаты трибологических испытаний углеродных материалов при воздействии ионизирующего излучения и окислительной среды / **А. И. Комир, Н. П. Одейчук, В. К. Яковлев** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, серия «Новые решения в современных технологиях». – 2018. – №9 (1285). – С. 62-69. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.09.

4. **Komir, A. I.** X-ray diffraction analysis of irradiated ARV and MPG nuclear grade graphite / **A. I. Komir, M. P. Odeychuk, A. A. Nikolaenko** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – № 6/5 (78). – P. 12-16. – doi:10.15587/1729-4061.2015.55465.
5. **Lawrence, R.** Porosity, pore size distribution, microstructure / **R. Lawrence, Y. Jiang** // *Bio-aggregates Based Building Materials. RILEM State-of-the-Art Reports*. – 2017. – Vol 23. – P. 39-71. – doi:10.1007/978-94-024-1031-0_2.
6. **Mays, T. J.** Gaseous diffusion and pore structure in nuclear graphite. Graphite moderator lifecycle behavior / **T. J. Mays, B. McEnaney, B. T. Kelly** // *Proceedings of a specialists meeting held in Bath, United Kingdom*, 24-27 September 1995. – P. 329-335.
7. **Островский, В. С.** Искусственный графит / **В. С. Островский, Ю.С. Виргильев, В.И. Костиков, Н.Н. Шипков** // *М.: Металлургия*. – 1986. – 272 с.
8. **Нагаев, Э.Л.** Малые металлические частицы / **Э.Л. Нагаев** // *УФН*. – 1992. – Т. 162. – № 9. – С. 49-124. – doi:10.3367/UFN.0162.199209b.0049.
9. **Канторович, Б. В.** Основы горения и газификации твердого топлива / **Б. В. Канторович** // *М.: Изд-во АН СССР*. – 1958. – 600 с.
10. **Чиркин, В. С.** Тепло-физические свойства материалов ядерной техники / **В. С. Чиркин** // *Справочник. Атомиздат. М.* – 1968. – 484 с.
11. **Tokuhiro, A.** Experimental study and computational simulations of key pebble bed thermomechanics issues for design and safety / **A. Tokuhiro** // *Nuclear Energy University Programs*. – 2013. – 83 p. – doi:10.2172/1157564.

Bibliography (transliterated)

1. **Burchell, T., Gallego, N., Srinivasan M.** Milestone Report on the "Workshop on Nuclear Graphite Research" *Oak Ridge National Laboratory*, 2009, 20 p.
2. **Hiruta, M.** Experimental study of dust generation from nuclear grade graphite spheres in frictional contact under a pressurized inert atmosphere at elevated temperatures, Master's Thesis. *University of Idaho, Idaho Falls, ID*, 2013.
3. **Komir, A. I., Odeychuk, N. P., Yakovlev, V. K.** Metodika i rezultaty tribologicheskikh ispytaniy uglerodnih materialov pri vozdeystvii ioniziruyushogo izlucheniya i oksidatnoy sredy. *Vestnik NTU «HPI», seriya «Novye resheniya v sovremennykh tehnologiyah»*, 2018, **9** (1285), 62-69, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.09.
4. **Komir, A. I., Odeychuk, M. P., Nikolaenko, A. A.** X-ray diffraction analysis of irradiated ARV and MPG nuclear grade graphite. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **6/5** (78), 12-16, doi:10.15587/1729-4061.2015.55465.
5. **Lawrence, R., Jiang, Y.** Porosity, pore size distribution, micro-structure. *Bio-aggregates Based Building Materials. RILEM State-of-the-Art Reports*, 2017, **23**, 39-71, doi:10.1007/978-94-024-1031-0_2.
6. **Mays, T. J., McEnaney, B., Kelly, B. T.** Gaseous diffusion and pore structure in nuclear graphite. Graphite moderator lifecycle behavior. *Proceedings of a specialists meeting held in Bath, United Kingdom*, 24-27 September 1995, 329-335.
7. **Ostrovskij, V. S., Virgilev, Yu.S., Kostikov, V.I., Shipkov, H.H.** Iskusstvennyj grafit. *М.: Metallurgiya*, 1986, 272.

8. **Nagaev, E.L.** Malye metallicheskie chasticy. *UFN*, 1992, **162** (9), 49-124, doi: 10.3367/UFNr.0162.199209b.0049
9. **Kantorovich, B. V.** Osnovy goreniya i gazifikacii tverdogo topliva. *M.: Izd-vo AN SSSR*, 1958, 600.
10. **Chirkin, V. S.** Teplo-fizicheskie svojstva materialov yadernoj tehniki. *Spravochnik. Atomizdat*, 1968, 484.
11. **Tokuhiro, A.** Experimental study and computational simulations of key pebble bed thermomechanics issues for design and safety. *Nuclear Energy University Programs*, 2013, 83, doi:10.2172/1157564.

Сведения об авторах (About authors)

Комір Антон Ігоревич – младший научный сотрудник, НПК «ВИЭРТ», Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: anton.komir@gmail.com.

Anton Komir – junior researcher, SPE «RESST», National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology», Kharkiv, Ukraine; e-mail: anton.komir@gmail.com.

Одейчук Николай Петрович – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, НПК «ВИЭРТ», Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: odeychuk@kipt.kharkov.ua.

Mykola Odeychuk – Senior Scientist, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), SPE «RESST», National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology», Kharkiv, Ukraine; e-mail: odeychuk@kipt.kharkov.ua.

Ткаченко Виктор Иванович – доктор физ.-мат наук, профессор, директор НПК «ВИЭРТ», ННЦ «Харьковский физико-технический институт»; Физико-энергетический факультет, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, зав. кафедрой Нетрадиционных энерготехнологий и экологии, г. Харьков, Украина; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

Viktor Tkachenko – Doctor of Science, Professor, Director of SPE RESST, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”; Head of the Department of Physics of Innovation Energy and Technology and Ecology, School of Physics and Energy, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: tkachenko@kipt.kharkov.ua.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Комір, А. І. Трибологічні випробування та модель истирання вуглецевих матеріалів при впливі високих температур, іонізуючого випромінювання та окислювальної середовища / **А. І. Комір, Н. П. Одейчук, В. І. Ткаченко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 41-46. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.06.

Please cite this article as:

Komir, A., Odeychuk, M., Tkachenko, V. Tribological tests and physical model of erasing of carbon materials in the oxidative medium at high temperatures and ionizing radiation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 41-46., doi:10.20998/2413-4295.2018.16.06.

Будь ласка, посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Комір, А. І. Трибологічні випробування та фізична модель стирання вуглецевих матеріалів в окислювальному середовищі при високих температурах та іонізуючих випромінюваннях / **А. І. Комір, М. П. Одейчук, В. І. Ткаченко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 41-46. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.06.

АНОТАЦІЯ Для аналізу пилоутворення при стиранні однотипних вуглецевих матеріалів виконано їх трибологічні випробування при температурах 400-600 °С в окислювальному середовищі під впливом іонізуючого випромінювання. Показано, що швидкість збільшення маси порошку графіту в логарифмічному масштабі пропорційна температурі випробувань. Визначено, що при температурах випробувань та під впливом електронного пучка графіти марки МПГ схильні до стирання в більшій мірі, ніж графіти марок АРВ, ГСП, УУКМ. Встановлено, що для пір діаметром близько мікрона знос менше, ніж для нанорозмірних пір. Показано, що для нанорозмірних пір стирання пропорційне їх розміру. Запропоновано фізичну модель стирання вуглецевих матеріалів.

Ключові слова: ядерний графіт; трибологічні випробування; окислення; електронні пучки; стирання

Поступила (received) 02.05.2018