

УДК 662.87:533.92:532.5

**Холявченко Л.Т.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Демченко С.В.**, магистр,  
**Назаров А.Е.**, магистр  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ЭРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ СОВМЕЩЕННОГО ТИПА**

**Холявченко Л.Т.**, канд. техн. наук, ст. науч. співр.,  
**Демченко С.В.**, магістр,  
**Назаров О.Є.**, магістр  
(ІГТМ НАН України)

## **ЕРОЗІЙНІ ПРОЦЕСИ В ПЛАЗМОХІМІЧНИХ РЕАКТОРАХ СУМІСНОГО ТИПУ**

**Kholiavchenko L.T.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,  
**Demchenko S.V.**, M. S. (Tech.),  
**Nazarov A.E.**, M. S. (Tech.)  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **EROSION PROCESSES IN COMBINED PLASMACHEMICAL REACTORS**

**Аннотация.** Рассмотрены процессы в плазмохимических реакторах совмещенного типа, влияющие на эрозионный износ электродов, изготовленных из рядового электродного графита марки ЭГ - 0. Определена скорость эрозионного износа анода из графита, находящегося в электрических и магнитных полях регулируемой величины.

Установлено влияние скорости вращения катодного пятна на весовую скорость эрозии электродов в различных окислительных средах. Выявлено влияние окислительной среды в реакционной камере (воздушная, углеродсодержащая) на весовую скорость эрозионного износа графитовых электродов.

Представлены зависимости весовой скорости эрозионного износа электродов от тока дугового разряда и скорости его вращения, находящейся в прямой зависимости от индукции магнитного поля соленоида.

**Ключевые слова:** газификация, реактор, плазма, электрод, эрозия, ресурс, температура.

**Введение.** Основными более энергонагруженными элементами конструкций плазменных генераторов являются электроды (катод, анод), необходимые для ввода энергии в реакционную зону через электродуговой разряд, горящий между этими электродами. Существование мощных сосредоточенных источников тепла, каковыми являются катодное и анодное пятна дугового разряда, приводят к возникновению сильно нагретых локальных областей на поверхности электродов, где температура может достигать температуры кипения материала, из которого сделан электрод или даже превышать ее [1]. В месте расположения пятна дугового разряда тепловые потоки в тело электрода могут достигать 100 - 1000 Вт/м<sup>2</sup> [2]. Такой мощности нагрев может привести не только к испарению и уносу материала, а и к возникновению значительной величины термо-

упругих напряжений, вызывающих хрупкое разрушение материала электрода [3]. Все же основной причиной разрушения электродов в контрагированном дуговом разряде является термическое воздействие, где само существование пятен дугового разряда приводит к интенсивному массопереносу в приэлектродных областях. В работе [4] показано, что при малых токах на толстостенных электродах пятно привязки дуги к катоду располагается на торце электрода, а форма привязки контрагированная. Разрушение в этом случае протекает как путем электрической эрозии испарением под катодным пятном, так и отделением мелких частичек графита в месте привязки дуги на электроде. С ростом тока происходит разогрев электрода и контрагированная привязка дуги меняется на диффузионную. Эта форма ее привязки характеризуется высокой стабильностью тока и напряжения на дуге, а главной причиной эрозии графитового электрода становится окисление. Пороговое значение величины тока, при котором осуществляется переход от контрагированной к диффузионной привязке дуги, зависит от площади, поперечного сечения, массы катода, условий теплопереноса. Причем, в контрагированном разряде при небольших токах, особенно в отсутствии принудительного перемещения дугового разряда газовым дутьем или магнитным полем, эрозия анода существенно меньше эрозии катода [5].

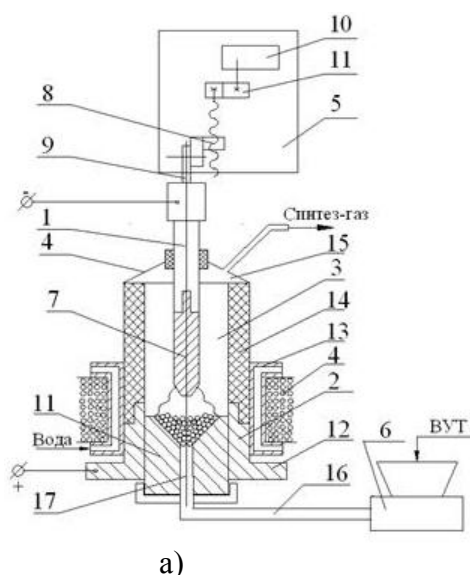
Проблемы эрозионного износа электродов многократно обостряются средой, в которой они находятся. В процессах пароплазменной газификации углеродсодержащих сред, к электродной группе электродугового реактора предъявляются особые требования. Зачастую эти требования противоречивые - низкая работа выхода при высокой температуре плавления и кипения, низкая скорость испарения и высокая химическая стойкость, стабильность структуры поверхности при высокой химической, механической и термической прочности.

Наименьшее значение скорости эрозионного износа, из целого ряда материалов таблицы Менделеева, присуще графиту и угольным электродам [5]. Эти материалы наиболее полно отвечают требованиям, находя широкое применение в электродуговых устройствах, в т. ч. плазмотронах. Графит обладает достаточной тугоплавкостью, тепло- и электропроводностью, легко поддающейся механической обработке, наиболее дешевый и массово доступный. Кроме того, графит не загрязняет продукты газификации, характер его износа идентичен процессу газификации угля, а продуктами своего термического разложения дополняет выходной продукт газификации [6].

**Целью данной работы** является изучение эрозионного износа электродов плазмохимических реакторах совмещенного типа, изготовленных из графита марки ЭГ - 0, в окислительной атмосфере воздушной и углеродсодержащих сред при плотностях тока от 0,1 до 0,5 А/мм<sup>2</sup>, что находится в пределах общепринятых значений.

**Изложение основного материала.** Исследования эрозионного износа энергонапряженных элементов плазменно-дугового реактора проводились на установке [7], схема которой представлена на рисунке 1. Установка представляет собой единый комплекс, включающий: катодный 1 и анодный 2 узлы, цилиндрическую реакционную камеру 3, наружная поверхность которой охвачена со-

леноидом 4, механизм регулирования тока дугового разряда 5, устройство 6 для моделирования среды в реакционной камере.



1 - катодный узел; 2 - анодный узел; 3 - реакционная камера; 4 - катушка соленоида; 5 - механизм регулирования тока дугового разряда; 6 - устройство для моделирования среды в реакционной камере; 7 - катод; 8 - винт-гайка; 9 - штанга; 10 - реверсивный привод; 11 - анод; 12 - водоохлаждаемый держатель; 13 - обечайка; 14 - изоляционная прокладка (магнезит); 15 - газосборная камера; 16 - коллектор; 17 – сопло

Рисунок 1 - Схема станда (а) и станд (б) для исследований эрозионного износа электродов

Работа станда заключается в следующем. В начальный момент катод 7 с помощью катодного узла опускается на анод 11 до непосредственного их контакта. В полость реакционной камеры через сопловую часть 17 подается окислительная среда (воздух, пар, водоугольная суспензия и т. д.). Окислительная среда в зоне дугового разряда создается следующим образом. Через сопловой ввод 17 в нижней части анододержателя в анод подается воздух или насыщенный пар (температура 110°-115° С) определенного расхода. Водоугольная суспензия вводится через патрубок-шнек 16 анододержателя с помощью шнекового питателя. После этого от преобразователя тока на электроды реактора подается напряжение. При возникновении тока дугового разряда (после поджига дуги) катод удаляется от анода с помощью механизма регулирования тока 5 на расстояние, определяемое длиной дугового разряда и током дуги. Длина дугового разряда измеряется длиной линейного перемещения катода (по линейке), а ток амперметром на пульте управления. Последовательно в цепь дугового разряда включена обмотка соленоида 4, которая формирует магнитное поле в зоне горения дуги. От взаимодействия электрического поля дуги и поперечной составляющей магнитного поля соленоида дуговой разряд вращается. Причем, заметное круговое движение производит дуговой разряд своим опорным пятном на аноде, описывая окружность определенного диаметра. Противоположное его катодное пятно остается практически неподвижным. От вращения дугового

разряда образуется энергетический конус с вершиной на катоде и основанием на аноде. Скорость вращения и диаметр окружности на аноде зависит от величины тока дугового разряда, его длины и индукции магнитного поля соленоида. Величина магнитного поля регулируется количеством витков соленоида и величиной тока в его витках, равного току дугового разряда. Обмотка соленоида включена последовательно в цепи дугового разряда, что определяет равенство дуги и соленоида. Время работы ( $t_p$ ) реактора с момента поджига дугового разряда до его погашения путем снятия напряжения с нагрузки фиксируется с помощью секундомера типа «Агат».

Эрозионный износ или потеря веса электрода (катода, анода) в результате его эрозии  $\Delta m$  определялся на лабораторных весах с точностью 0,02 г. В процессе работы, под действием дугового разряда, вес электрода изменяется в зависимости от  $I_g$ , времени его воздействия на электрод и среды, в которой горит дуговой разряд. Изменение этого веса есть эрозионный износ или потеря веса. Весовая скорость эрозионного износа электродов определяется отношением потери веса катодом (анодом) к току и времени горения дуги [4]

$$\bar{G} = \Delta m / I \cdot t, \text{ г/Кл.}$$

Результаты экспериментальных исследований весовой скорости эрозионного износа электродов паро-плазменного газогенератора в воздушной и углеродсодержащей средах (углерод + водяной пар) представлены в таблицах 1 и 2.

Анализируя полученные таблицы (1 и 2) можно сделать вывод, что с увеличением тока дуги в рассматриваемых средах виден рост весовой скорости эрозии графитового анода, причем в углеродсодержащей среде (углерод + водяной пар), он происходит в меньшей степени.

Определение эрозии графитовых электродов проводились расчетным путем по формуле [8]

$$G = \frac{q \cdot d \cdot v \cdot \tau_{ucn}}{r} J, \text{ кг/с,}$$

где  $q = \Delta U \cdot j$  - удельный тепловой поток в приэлектродном пятне вращающегося дугового разряда, Вт/м<sup>2</sup>;  $d = 0,08 \frac{I^{0,6}}{H^{0,2} \cdot \delta^{0,2}}$  - ширина следа приэлектродного пятна при повторных пробеганиях дугового разряда, м;

$v = 35,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{I \cdot B^2}{(1 + 0,4B^{0,3})^2}}$  - скорость дугового разряда, м/с;  $\tau_{ucn} = \frac{(T_{ucn} - T_2)^2 \cdot \lambda^2}{4 \cdot a \cdot q}$  -

время достижения температуры испарения материала электрода, с;  $r$  - удельная теплота испарения материала электрода, Дж/кг;  $J$  - значение интеграла [6].

Таблица 1 – Эрозия графитового анода в воздушной среде

Ток дуги $I$ , А	Время горения дуги $\tau$ , с	Потеря веса электрода $\Delta m$ , г	$\Delta G \cdot 10^{-6}$ , г/Кл
120	60	0,6	87
120	60	0,75	108
140	60	0,75	93
140	60	1,4	173
140	60	3,75	464
150	60	1,5	173
150	60	1,78	205
160	60	1,8	195
160	60	2	216
170	60	2,2	224
170	60	2,75	280
180	60	1,49	146
180	60	2,8	270
190	60	2,75	251
190	60	3,2п	292
200	60	1,2	104
200	60	1,25	108
200	60	3	260
200	60	3,5	303
200	60	3,6	312

Таблица 2 – Эрозия графитового анода в углеродсодержащей среде (углерод + водяной пар)

Ток дуги $I$ , А	Время горения дуги $\tau$ , с	Потеря веса электрода $\Delta m$ , г	$\Delta G \cdot 10^{-6}$ , г/Кл
140	180	5,8	24
160	180	6,9	25
160	180	12,4	45
180	180	18,7	60
200	180	25,6	74
200	180	34,6	100
220	180	38	100
240	180	54	130

Индукция магнитного поля соленоида  $B$ , Тл зависит от количества витков катушки соленоида  $W$  и тока дугового разряда  $I$ . Ток измерялся регулярно амперметром на пульте управления. Максимальная индукция на оси внутреннего диаметра соленоида  $B = \mu_0 \cdot H$ , Тл; где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость среды;  $H$  – напряженность магнитного поля соленоида, А/м. которая определяется следующим образом:  $H = \frac{I \cdot W}{L_k}$ ,  $L_k$  – длина соленоида, м.

На рисунке 2 приведены полученные зависимости весовой скорости эрозионного износа графитового анода от скорости вращения дугового разряда в воздушной и углеродсодержащей средах. На нем наблюдается уменьшение весовой скорости эрозии анода при увеличении скорости вращения катодного пятна. Так увеличение скорости вращения пятна с 30 м/с до 60 м/с в воздушной среде дает уменьшение скорости эрозии с  $120 \cdot 10^{-6}$  г/Кл до почти  $60 \cdot 10^{-6}$  г/Кл.

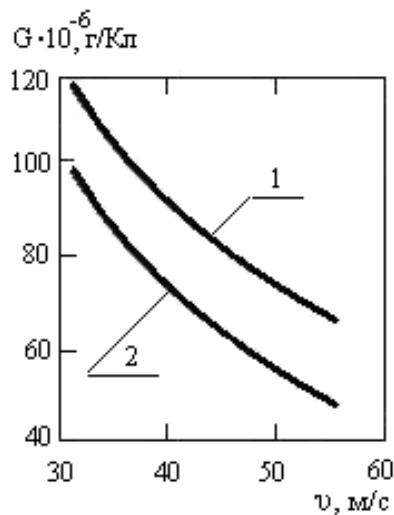


Рисунок 2 - Зависимости весовой скорости эрозии анода от скорости вращения дугового разряда плазмохимического реактора совмещенного типа в: 1 - воздушной среде; 2 - углеродсодержащей среде (углерод + водяной пар)

На рисунках 3 и 4 показаны зависимости весовой скорости анода  $G$  от величины тока дугового разряда плазмохимического реактора совмещенного типа в воздушной и углеродсодержащей средах.

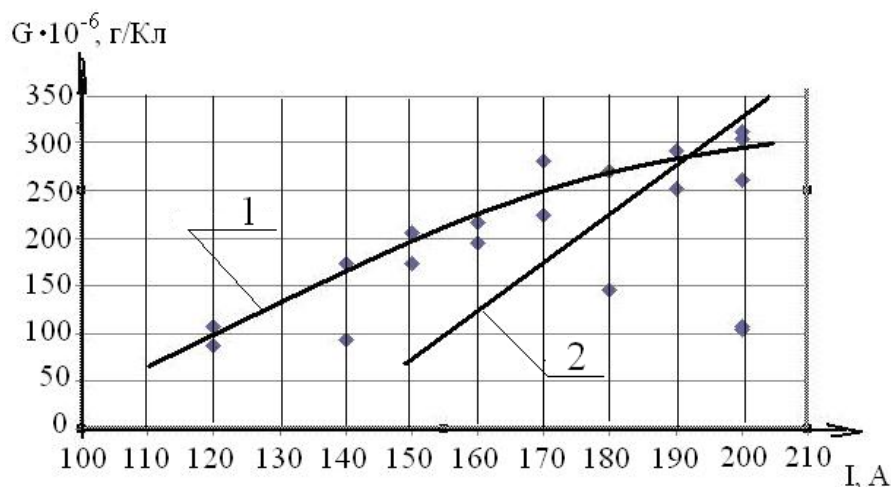


Рисунок 3 - Зависимости весовой скорости эрозии анода в воздушной среде от тока дугового разряда плазмохимического реактора совмещенного типа, полученные: 1 - экспериментальными исследованиями; 2 - теоретическими исследованиями

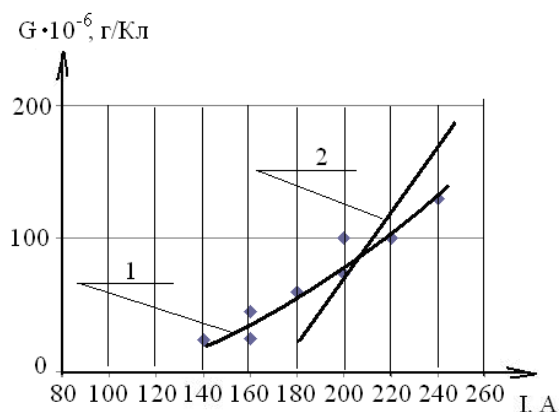


Рисунок 4 - Залежності масової швидкості ерозії графітового анода в вуглеродсодержащій середі від величини струму дугового розряду плазмохімічного реактора суміщеного типу, отримані: 1 - експериментальними дослідженнями; 2 - теоретичними дослідженнями

Аналіз отриманих теоретичних і експериментальних залежностей масової швидкості ерозії графітового анода від величини струму дуги плазмохімічного реактора суміщеного типу (рисунки 3 і 4) при кількості витків соленоїда  $W=21$ , його довжині  $L_k=0,031$  м і зміні струму дугового розряду в діапазоні 100 - 250 А дозволило встановити:

- в досліджуваному діапазоні ерозія анода в повітряній середі лінійно зростає від величини струму і становить максимум 3,5 г при струмі 200 А за 1 хвилину;

- крива залежності масової швидкості анода в вуглеродсодержащій середі (рисунок 4, крива 1) від сили струму має слабкий позитивний нахил при струмах, менших 200 А. Однак при подальшому збільшенні струму суттєву роль починає грати джоулево тепло, що виділяється в об'ємі анода. Це тепло викликає перерозподіл профілю температури по довжині анода, збільшення поверхні випаровування і, відповідно, зростання масової швидкості ерозії;

- в розглянутих діапазонах струмів масова швидкість ерозії графітових електродів коливається від 50 до  $400 \cdot 10^{-6}$  г/Кл (для повітряної середі) і від 20 до  $200 \cdot 10^{-6}$  г/Кл (для вуглеродсодержащій середі). При порівнянні теоретичних і експериментальних залежностей відносна похибка не перевищує 20%;

- експерименти і в першому і в другому випадках показують більш плавне наростання уносу з збільшенням струму, на відміну від теоретичних досліджень. Це, по-видимому, пов'язано з нерівномірною швидкістю переміщення плями. Результати теоретичних досліджень задовільно збігаються з відповідними експериментальними даними з відносною похибкою не більше 25%.

Аналіз ерозійного износу енергонагружених конструктивних елементів плазмохімічного реактора суміщеного типу, що працюють в умовах дугового розряду і високотемпературних агресивних серед, дозволяють зробити наступні **ВИВОДИ**:

1. Степінь износу графітового анода залежить від густоти струму дуги, швидкості обертання дугового розряду в магнітному полі соленоїда, часу його го-

рения, общей температуры и вида реакционной смеси и может изменяться в пределах  $50 \cdot 10^{-6}$  до  $400 \cdot 10^{-6}$  г/Кл.

2. Применение в плазмохимических реакторах совмещенного типа в качестве окислительной атмосферы углеродсодержащей среды открывает новые перспективы повышения надежности и эрозионной стойкости графитовых электродов.

3. С целью увеличения общего ресурса работы плазмохимических реакторов анод рекомендуется изготавливать из графита, конструктивно устроенного по принципу постоянно изнашиваемого и заменяемого в непрерывающемся процессе.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кесаев, И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – М.: Наука, 2008. – 144 с.
2. Урюков, Б.А. Теория эрозии электродов в нестационарных пятнах электрической дуги / Б.А. Урюков // Экспериментальные исследования плазмотронов / Наука Сибирское отделение. – Новосибирск, 2001. – С. 371-382.
3. Раховский, В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме / В.И. Раховский. – М.: Наука, 2000. – 115 с.
4. Лакомский, В.И. Эрозия графитовых катодов электрической дуги в азотно-кислородной газовой смеси / В.И. Лакомский, А.Я. Таран, С. И. Замковой // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. - 2004. - Вып. 1. - № 4. – С. 113-120.
5. Раховский, В.И. Эрозия электродов в контрагированном разряде / В.И. Раховский // Известия Сиб. отд. АН СССР. - 2003. - Вып. 1. - №3. - С. 11-27.
6. Pierson, O.H. Hand book of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes Properties, Processing and Applicatio/ O.H. Pierson. - Park Ride, New Jersey, USA: NoesPublications, 2003. - 419 p.
7. Расчёт конструктивных параметров реакционной камеры плазменно-дугового реактора для переработки углеродсодержащих сред / Е.Ю. Пигида, Л.Т. Холявченко, С.Л. Давыдов, С.В. Демченко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 98. – С. 193-200.
8. Коротеев, А.С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет / А.С. Коротеев, В.М. Миронов, Ю.С. Свирчук. - М.: Машиностроение, 1993. - 296 с.

---

#### REFERENCES

1. Kesaev, I.G. (2008), “*Katodnye processy elektricheskoy dygi*” [Cathodic processes arcing], Science Moscow, Russia.
2. Uryukov, B.A. (2001), “Theory of electrode erosion in non-stationary spots of electric arc”, “*Eksperimentalnye issledovaniya plazmotronov*”, Science Siberian Branch, Novo-Siberian, pp. 371-382.
3. Rakhovsky, V.I. (2000), “*Fizicheskie osnovy kommutatsii elektricheskogo toka v vakuume*” [Physical basis of switching the electric current in a vacuum], Science, Moscow, Russia.
4. Lakomskiy, V.I., Taran, A.Ya. and Zamkovoy, S.I. (2004). “Erosion graphite cathodes electric arc in a nitrogen-oxygen gas mixture”, *Izvestiya SO AN SSSR, Seriya tekhnicheskikh nauk*, vol 1, no. 4, pp. 113-120.
5. Rakhovsky, V.I. (2003), “Erosion of electrodes in the constricted discharge”, *Izvestia Sibirskogo otdeleniya AN SSSR*, vol. 1, no. 3, pp. 11-27.
6. Pierson, O.H. (2003), *Hand book of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applicatio*, NoesPublications, Park Ride, New Jersey, USA.
7. Pigida, E.Y., Kholiavchenko, L.T., Davydov, S.L. and Demchenko, S.V. (2012), “The calculation of the form factor of arc plasma reaction chamber for convecion of carbon-bearing medium”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 98, pp. 193-200.
8. Koroteev, A.S., Mironov, V.M. and Svirchuk, Yu.S. (1993), “*Plazmotrony: konstruksii, kharakteristiki, raschyet*” [Plasma torches: design, performance, calculation], Mechanical Engineering, Moscow, Russia.



---

### Об авторах

**Холявченко Леонид Тимофеевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник в отделе проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [demchik@bk.ru](mailto:demchik@bk.ru).

**Демченко Сергей Вячеславович**, магистр, младший научный сотрудник в отделе проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [demchik@bk.ru](mailto:demchik@bk.ru).

**Назаров Александр Евгеньевич**, магистр, инженер в отделе проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [demchik@bk.ru](mailto:demchik@bk.ru).

### About the author

**Kholiavchenko Leonid Timofeevich**, Candidat of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [demchik@bk.ru](mailto:demchik@bk.ru).

**Demchenko Sergey Vyacheslavovich**, Master of Science, Junior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [demchik@bk.ru](mailto:demchik@bk.ru).

**Nazarov Aleksandr Evgenyevich**, Master of Science, Engineer of Department of Rock Breaking Problems, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [demchik@bk.ru](mailto:demchik@bk.ru).

---

**Анотація.** Розглянуто процеси в плазмохімічних реакторах сумісного типу, що впливають на ерозійний знос електродів, виготовлених з рядового електродного графіту марки EG - 0. Визначена швидкість ерозійного зносу анода з графіту, що знаходиться в електричних і магнітних полях регульованою величиною.

Встановлено вплив швидкості обертання катодної плями на вагову швидкість ерозії електродів в різних окисних середовищах. Встановлено вплив окислювального середовища в реакційній камері (повітряна, вуглецевмісна) на вагову швидкість ерозійного зносу графітових електродів.

Представлені залежності вагової швидкості ерозійного зносу електродів від струму дугового розряду і швидкості його обертання, що знаходиться в прямій залежності від індукції магнітного поля соленоїда.

**Ключові слова:** газифікація, реактор, плазма, електрод, ерозія, ресурс, температура.

**Abstract.** The article describes processes which occur in combined plasmachemical reactors and which affect erosive wear of electrodes made of ordinary electrode graphite, grade EG – 0. Rate of such graphite anode erosive wear in electric and magnetic fields with controllable value is specified.

It is stated that rate of cathode spot rotation has an effect on the mass flow rate of electrode erosion in different oxidizing medium, and an oxidizing medium in the reaction chamber (air, carbon-containing) has an effect on the mass flow rate of graphite electrode erosion.

It is specified that dependences exist between mass flow rate of electrode erosion, arc current and rate of the electrode rotation, and direct dependence exists between the rate of electrode rotation and magnetic field of solenoid.

**Keywords:** gasification, reactor, plasma, electrode, erosion, resource temperature.

*Статья поступила в редакцию 03.10.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. Л.М. Васильевым*