

Динамика электродных пятен в реакторе для очистки сточных вод от тяжелых металлов

*Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
ГП ХМЗ «ФЭД»*

Экспериментально показана возможность исследования динамики параметров электродных пятен: время жизни пятна, плотность тока в пятне, ток в пятне, скорость перемещение пятна, количество электродных пятен на аноде и катоде с применением «Лупы времени» типа ЛВ-04.

Ключевые слова: катодные и анодные пятна, очистка сточных вод от тяжелых металлов, реактор, плотность тока, ток, скорость перемещения пятна.

Принцип построения экспериментальной установки базируется на возможности оптического исследования и сверхскоростной фотографии слабосветящихся и быстропротекающих процессов: исследование свечения плазмы в термоядерных установках, регистрация треков в люминесцентных камерах, исследование искр и других физических процессов прибором «Лупа времени» типа ЛВ-04.

Введение

Теоретическое рассмотрение процессов в электродных пятнах затруднено без наличия достоверных данных о времени жизни пятна, плотности тока в нем, переносимого тока в пятне, скорости его перемещения и количества электродных пятен в каждый исследуемый момент времени на катоде и аноде [1–3]. Наличие этих данных позволит определить массоунос материала с окатышей и оценить возможность протекания реакций по получению осадка из солей тяжелых металлов в реакторе. Все это говорит об важности и актуальности задачи исследования, которая позволяет существенно сократить время эксперимента по выбору эффективных режимов очистки сточных вод.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины "Новые ресурсосберегающие и технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе" (подсекция 13), "Аэрокосмическая техника и транспорт" и по темам "Создание физико-технических основ повышения качества материала аэрокосмических конструкций" и "Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники и (подсекции 6) материаловедение тела", а также в рамках хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса

Практические работы по созданию реакторов по очистке сточных вод проводились ранее при создании установок «Искра» в НПО «Ротор», но к сожалению, экспериментальному исследованию процессов в разрядке не было уделено достаточно внимания, тогда как вопрос динамики процессов в пятне важен для оценки производительности процесса очистки, а следовательно, и возможностей установки по промышленной очистке сточных вод.

1. Приборы и методика исследования параметров электродных пятен

В качестве объекта исследования исследована модель реактора, включающая в себя корпус из оргстекла (прозрачный), в котором вмонтированы электроды. Межэлектродное пространство заполнялось остальными шариками различных диаметров, стружкой и заливалось обычной водой до уровня заполнения шихты. На электроде подавалось напряжение от высоковольтного генератора. При этом заряжалась емкость источника питания до напряжения 1000 В. Нагрузкой генератора, как уже отмечалось выше, служил разрядный промежуток между положительными и отрицательными электродами, заполненными соприкасающимися друг с другом в водяной среде шихтой (шариками, стружкой и т.д.). За счет того, что сопротивление разрядного промежутка очень мало, при включении генератора происходит быстрый разряд емкости. Это вызывает проскакивание искр между электродами, шариками, стружкой.

Для исследования динамики развития электродных пятен была создана экспериментальная установка (рис. 1).

Экспериментальная установка состоит из: рабочей камеры с окатышами и стружкой; блока питания и управления и «Лупы времени ЛВ-04 с».

Блок питания позволяет изменять емкость батарей в диапазоне 4-3000 мкФ. Варьирование возможно дискретными значениями 4, 150 и далее через 150 мкФ до 3000 мкФ. Напряжение можно варьировать в диапазоне 10...1000 В. Индуктивность изменялась дискретно 0,5; 1; 1,5 мГн. Энергия импульса достигает 1,5 кДж.

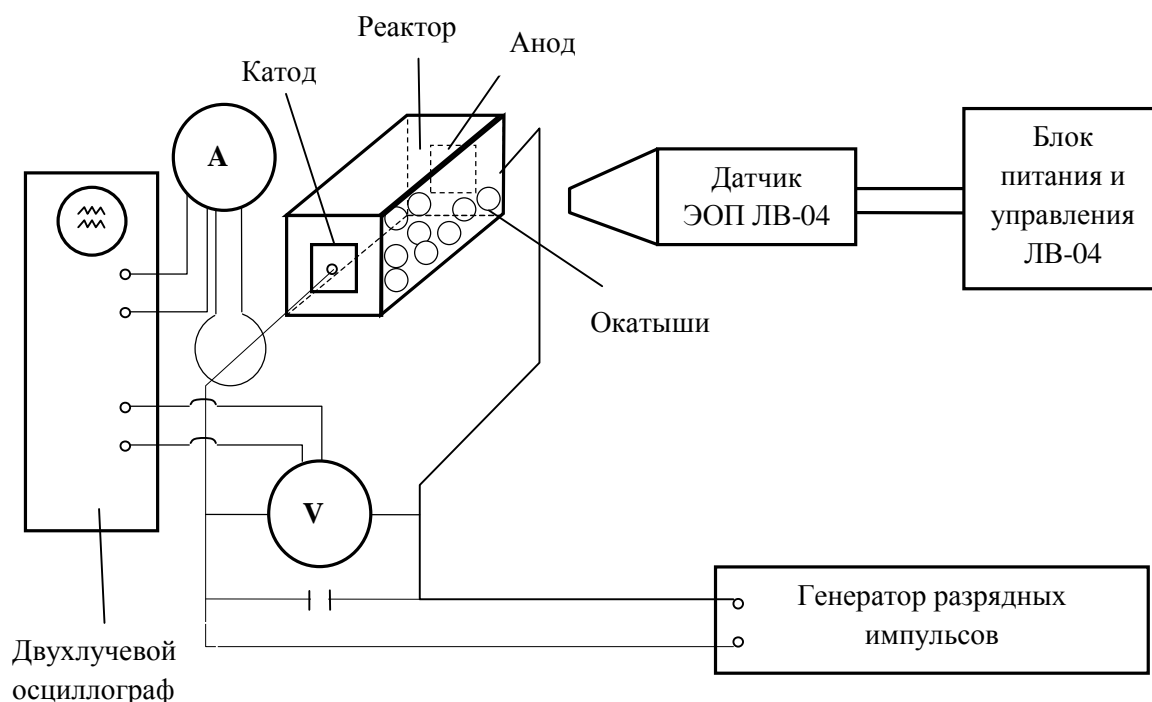


Рис. 1. Схема установки для изучения динамики электродных пятен в зоне реактора на окатышах

2. Принцип действия экспериментальной установки

Установка включает в себя:

- объект исследования – модель реактора;
- высоковольтный источник питания (генератор разрядный импульсов);
- «Лупу времени» типа ЛВ-04, управляемую стойками управления 1 и 2;
- запоминающий осциллограф для регистрации осциллограмм тока и напряжения на разрядном промежутке;
- схему одиночного запуска и синхронизации момента включения генератора, «Лупы времени» и осциллографа;
- источник питания постоянного тока +5 В для питания логической части схемы синхронизации и одиночного запуска 11 (127 В) для запитки выходного каскада этой же схемы.

На объект свечения, а точнее на точку соприкосновения первого шарика с положительным электродом был направлен входной объектив «Лупы времени», так как вероятность появления искр вблизи положительного электрода в начальный момент протекания разряда наибольшая. В «земляной» провод, т.е. на отрицательный вывод генератора был смонтирован шунт, напряжение с которого подавалось на нижний дифференцированный усилитель двухлучевого запоминающего осциллографа С8-14. Этот сигнал был пропорционален току, протекающему в разрядном промежутке. На другой дифференцированный усилитель подавалась информация о напряжении на электродах.

Через делитель напряжения, стоящий непосредственно на выходных клеммах генератора и делящий сигнал на 3 и внешний делитель 1:10 самого осциллографа С8-14.

В целях исследования процесса с начала его протекания и срабатывания «Лупы времени» и осциллографа от первого импульса схемы управления тиристорного преобразователя высоковольтного генератора и недопуска срабатывания ЛВ-04 от последующих импульсов была разработана схема синхронизации и одиночного запуска «Лупы времени» и осциллографа от момента включения генератора. Сигналы с выходного каскада усилителя постоянного тока данной схемы подавались на вход «внешнего запуска» ЛВ-04 и вход «синхронизации 1:10» осциллографа С8-14. «Лупа времени» и осциллограф были включены в ждущем режиме внешнего запуска. Импульсы запуска схемы синхронизации и одиночного запуска снимались через разделительный трансформатор (намотанный на тороидальный сердечник) с первичной обмоткой выходного трансформатора схемы управления поджигом тиристорного генератора импульсов.

Блок-схема блока синхронизации и одиночного запуска изображена на рис. 2.

Импульсы после развязывающего трансформатора поступали на вход одновибратора, выполненного на микросхеме К155АП3, после которого одиночный импульс поступал на формирователь для получения прямоугольного сформированного импульса. Усиленный транзисторным усилителем, в коллектор которого подавалось напряжение 127 В, выходной сигнал с амплитудой сигнала данного уровня подавался на вход внешнего запуска «Лупы времени» и осциллографа. Сигнал такой амплитуды нужен был для запуска лупы, так как она срабатывает от импульса с амплитудой не ниже 50 В. На осциллограф данный импульс подавался в режиме ждущей синхронизации через делитель 1:10.

120

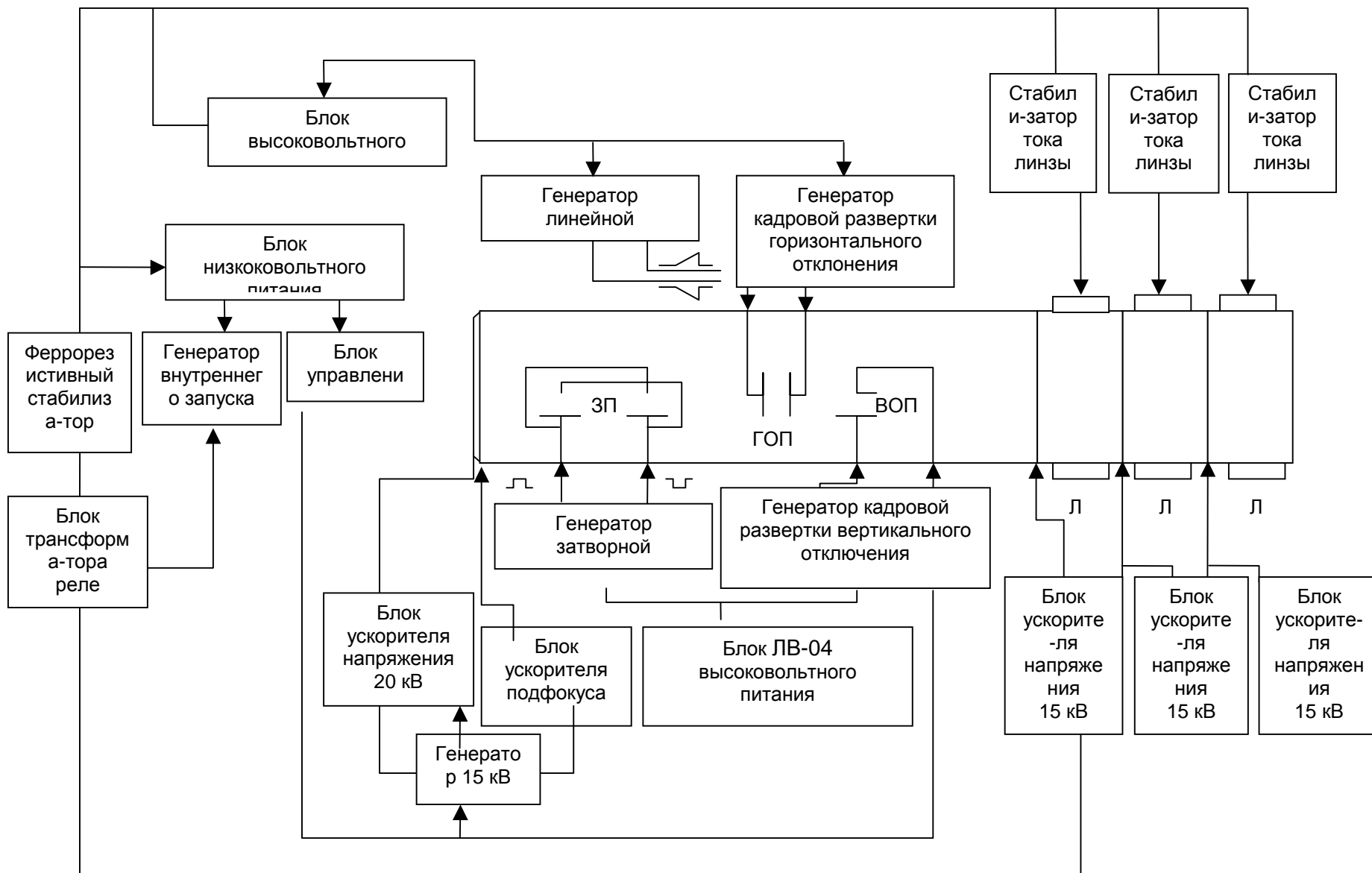


Рис. 2. Блок-схема ЛВ-04

Таким образом, «Лупа времени» и осциллограф регистрировали начальный момент инициирования искры и не было наложения изображения на ЭОП-граммах, полученных с помощью «Лупы времени».

2.1. «Лупа времени»

ЛВ-04 допускает работу в двух режимах с использованием электронно-оптического преобразователя (ЭОП). В режиме кадровой съемки изображение с 16 кадрами в 1-й серии (для нашего случая) или 4-й серии по 4 кадра. Отдельные кадры следуют через промежутки времени 1, 5, 10, 100, 300, 500 мкс. Длительность экспозиции отдельных кадров 1, 5 мкс – 100 мкс. Временная задержка между отдельными сериями кадров 0, 50, 500 мкс. При этом длительность экспозиции равна длительности развертки. Задержка между отдельными развертками 0, 50 – 500 мкс. Достижимое время разрешения в этом режиме $1 \cdot 10^{-7}$ с.

Разрешающая способность установки не менее 18 линий на один миллиметр для ЭОП. Частота повторения изображения в режиме внутренней синхронизации 0,125; 0,5; 5; 12,5 Гц.

Прибор обеспечивает регулировку задержки срабатывания относительно начала запускающего импульса от 0 до 3,2 мкс ступенями через 0,2 ... 3 до 10 мкс – плавно. В нашем случае, так как процесс был довольно коротким, регистрация производилась практически без задержки (была установлена задержка 2 мкс для учета задержки срабатывания схемы синхронизации).

Регистрация изображения с экрана «JG» производилась фотокамерой «Зенит-5» с объективом «Р-Гелиос-100». Так как невозможна синхронизация импульсов инициирования разряда и срабатывания затвора фотоаппарата, регистрация производилась по такому алгоритму: сначала открывался затвор в режиме «ручной выдержки времени» нажатием на спусковую кнопку, а затем инициировался разряд. После регистрации изображения затвор закрывался. Изображение осциллограмм на экране осциллографа регистрировалось также фотоаппаратом «Зенит».

Фокусировка изображения с экрана ЭОП производилась сменными объективами РО2-2М, МИР-1.

Прибор «Лупа времени» состоит из четырех основных частей: электронно-оптического преобразователя с юстировочным устройством и пультом на тележке, двух радиотехнических стоек управления и тележки для стабилизаторов напряжения типа СН 0,75.

Принцип работы прибора заключается в следующем. С помощью объектива на фотокатод (ФК) проектируется оптическое изображение исследуемого объекта. Под действием света фотокатод имитирует электроны, которые ускоряются приложением к камере ЭОП ускоряющим напряжением и фокусируется на люминесцентный экран с помощью электростатической линзы.

Таким образом, на люминесцентном экране возникает оптическое изображение, имеющее яркость большую, чем яркость изображения на фотокатод. Яркость пропорциональна приложенному ускоряющему напряжению.

Полученное изображение попадает на фотокатод следующей камеры ЭОП, где происходит аналогичный процесс. Наличие нескольких камер в ЭОП позволяет на его выходном экране изображение с необходимой яркостью.

Временные соотношения в приборе, определяющие длительности управляющих импульсов, формируются блоком управления 1, ускоряющие напряжения, запитка электростатических линз осуществляются блоком управления № 2.

В силу того, что разряд имеет длительность 20...30 мкс, снятие ЭОП-грамм производилось только в режиме регистрации с длительностью ступени 1...10 мкс и экспозицией 2...7 мкс. Регистрация осциллограмм и ЭОП-грамм производилась при различных межэлектродных расстояниях модели разрядного промежутка $d = 10, 13, 40$ мм и различных диаметрах шариков (8, 10 мм). Эксперимент по исследованию разряда с шариками $\varnothing = 3$ мм не дал результатов, так как организовать разряд между двумя шариками такого диаметра технически не было возможным (для данной модели реактора), а при заполнении большим количеством шариков межэлектродного пространства, равного 40 мм (или даже 10 мм), не удалось зарегистрировать процесс «Лупой времени» в пространстве.

2.2. Масштабирование изображения

Для исследования масштаба изображения была использована регистрация свечения двух лампочек накаливания в режиме внутренней синхронизации «Лупы времени». По заранее известному расстоянию между центрами нитей накаливания лампочек определялся масштаб на экране «Лупы» между свечением двух лампочек.

При тестировании получено изображение двух лампочек с частотой повторения 5 Гц. Это изображение свидетельствует о том, что «Лупа времени» отрегулирована полностью, так как присутствуют все 16 кадров изображения 4×4. Расстояние между нитями равнялись 9,88 мм, а среднее значение расстояния между изображениями лампочек – 9,69 мм. Масштаб равнялся 1:1.

2.3 Экспериментальные ЭОП-граммы и осциллограммы разряда

На рис. 3–5 показаны осциллограммы тока и напряжения разряда, а также ЭОП-граммы разряда с результатами обработки основных величин. Показана площадь пятна во времени, что позволяет получить все основные параметры пятна по методике, изложенной в следующем разделе, и, зная эти параметры, по методике, изложенной во втором разделе, получим эрозионные характеристики материала.

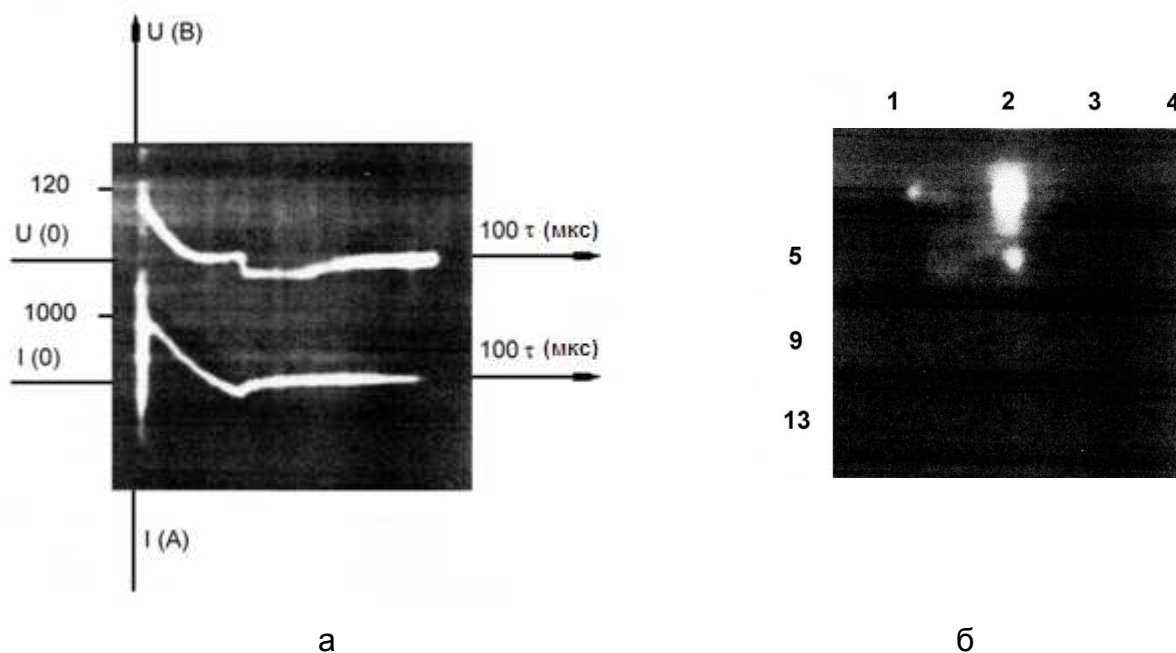


Рис. 3. Осциллограмма напряжения и тока разряда во времени (а) и ЭОП-граммы разряда в реакторе (16 экспозиций) с железными шариками ($d = 8$ мм), время задержки 2 мкс, время экспозиции 7 мкс, $t_{CT} = 10$ мкс

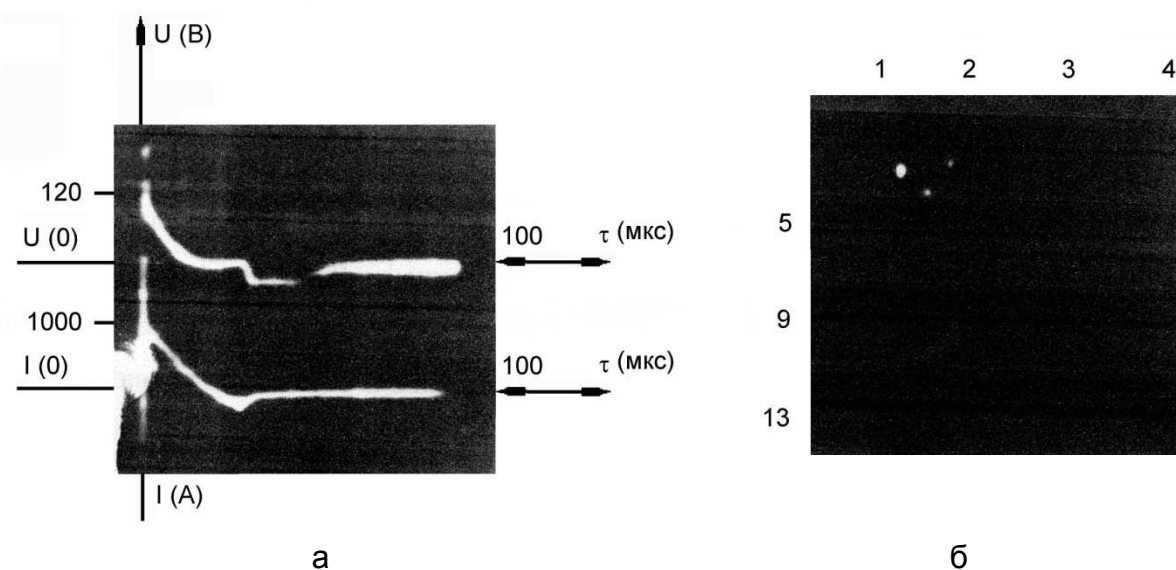


Рис. 4. Осциллограмма напряжения и тока во времени развития разряда в реакторе (а) и ЭОП-граммы (16 экспозиций) с железными шариками ($d = 10$ мм) время задержки 10 мкс, время экспозиции 7 мкс, $t_{CT} = 10$ мкс

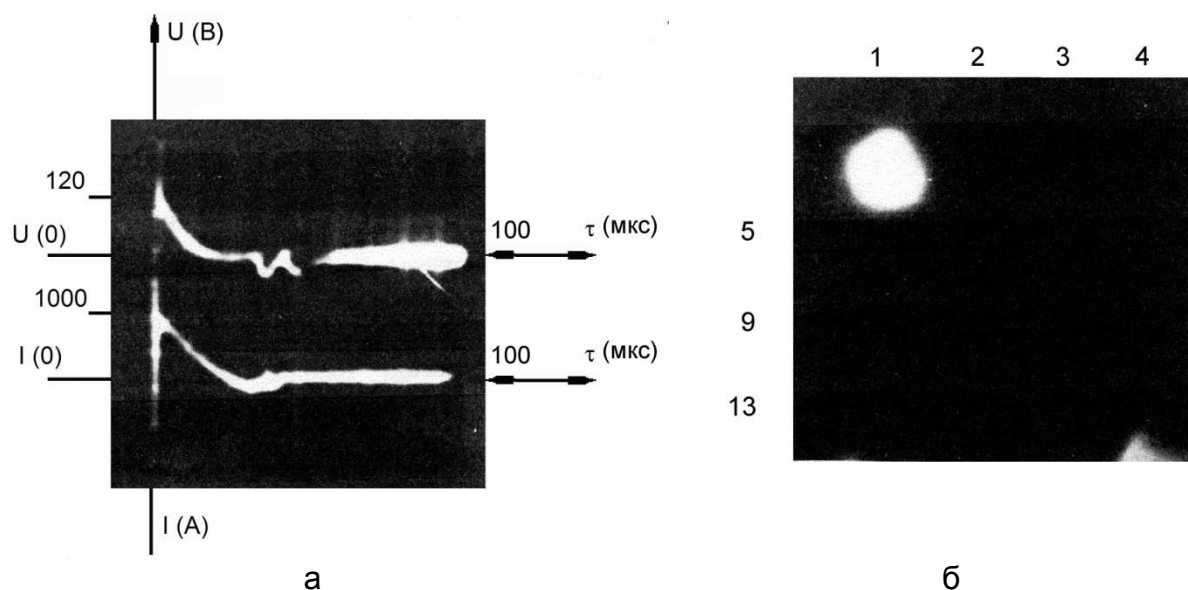


Рис. 5. Осциллограмма напряжения и тока I во времени развития разряда (а) и ЭОП-граммы (16 экспозиций) с железными шариками ($d = 10$ мм), время задержки 2 мкс, время экспозиции 7 мкс, $t_{CT} = 10$ мкс

3. Методика исследования параметров электродных пятен

Как показано в работах [1–4], модель расчета массоуноса в электродных пятнах требует знания таких параметров пятен, как плотность тока, величина приэлектродного падения потенциала, скорость перемещения пятна и площадь пятна. Все это позволит решить вопрос о стойкости электродов и ресурсе установки с разрядом в воде при наличии диспергированного материала.

В результате проведенных экспериментов можно определить такие параметры электродных пятен: плотность тока в пятне, ток пятна, скорость перемещения, площадь, ток и количество электродных пятен, величины мощности переносимого пятном.

Методика совместной обработки ЭОП-грамм, осциллограмм была такой. ЭОП-граммы позволяют получить зависимость площади анода S_A и площади катода S_K , занятые привязками разряда в зависимости от времени, т.е. $S_A = f(t)$ и $S_K = f(t)$, а также площадь отдельных пятен на катоде $S_{ПК} = f(t)$ и аноде $S_{ПА} = f(t)$ в динамике.

Используя осциллограмму тока, дающую зависимость $I(t) = f(t)$, получим изменение плотности тока от времени

$$J_A(t) = \frac{I(t)}{S_A(t)} \text{ и } J_K(t) = \frac{I(t)}{S_K(t)}. \quad (1)$$

По величине плотности тока и площади пятна определяется динамика тока в пятне

$$I_{ПК_i}(t) = j_k(t) \cdot S_{ПК_i}(t) \text{ и} \quad (2)$$

$$I_{ПА_i}(t) = j_k(t) \cdot S_{ПА_i}(t).$$

ЭОП-граммы дают также возможность оценить величину времени жизни пятна:

$$\tau_{ЖП_i} \geq nt_K + t_{3K}(n-1), \quad (3)$$

где n – количества кадров ЭОП-граммы, в которых наблюдается исследуемое пятно; t_K – длительность кадров; t_{3K} – задержка между кадрами ЭОП-граммы (см. рис. 3).

Скорость перемещения пятна во времени можно определить из выражения

$$V_{ni} = \frac{\Delta l_{ni}}{t_K + t_{3K}}, \quad (4)$$

где Δl_{ni} – перемещения пятна, наблюдаемые при переходе от одного кадра ЭОП-грамма к другому.

Подставив в соответствие полученным значениям V_{ni} , времени, соответствующие переходу от одного кадра к другому, получим зависимость скорости перемещения пятна от времени.

ЭОП-граммы позволяют найти и зависимость количества электродных пятен на катоде N_K и аноде от времени разряда.

Из осциллограмм напряжения разряда оценивается динамика изменения величины катодного U_K и анодного U_A падений напряжения

$$\begin{aligned} U_K(t) &= U(t) - E_{cp}(R-r) - \bar{U}_A; \\ U_A(t) &= U(t) - E_{cp}(R-r) - \bar{U}_K, \end{aligned} \quad (5)$$

где \bar{U}_A и \bar{U}_K – усредненное значение анодного и катодного падения напряжения; E_{cp} – среднее значение анодного и катодного падения напряжения; R – внутренний радиус наружного электрода; r – наружный радиус внутреннего электрода инжектора.

Зная динамику тока в пятне, можно определить динамику количества мощности, выделяющейся в пятне

$$q_K = j_K \cdot U_K \alpha_K; \quad (6)$$

$$q_A = j_A \cdot U_A. \quad (7)$$

Величину заряда, переносимого в пятне, можно получить таким образом:

$$q = j_i \cdot S_i \cdot \tau_n. \quad (8)$$

Величина эродирующей массы определялась весовым методом, по которому находилась величина коэффициента эрозии

$$K_{\text{Э}} = \frac{m_0 - m_{\text{Э}}}{c \cdot U \cdot N}, \quad (9)$$

где c – емкость цепи; U – напряжение импульса разряда; N – количество импульсов, за которое произошло эрозионное действие; m_0 – начальная масса окатышей; $m_{\text{Э}}$ – масса окатышей после действия N -импульсов.

Приведена обработка ЭОП-грамм и осциллограмм тока и напряжения позволила получить параметры электродного пятна получить параметры электродного пятна, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры катодного и анодного пятен

№ п/п	Γ_k , мкс	Γ_a , мкс	J_k , А/м ²	J_a , А/м ²	U_k , В	U_a , В	V_k , м/с	V_a , м/с	K_k , кг/кл	K_a , кг/кл
1	10^{-7}	10^{-5}	10^8	$5 \cdot 10^4$	45	20	10^2	30	10^{-10}	$2 \cdot 10^{-9}$
2	$2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^4$	42	21	$2 \cdot 10^2$	41	$4 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$
3	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^4$	43	23	$1,7 \cdot 10^2$	38	$3 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$

Вывод

Анализ результатов экспериментов говорит о том, что времени жизни и скорость перемещения пятна практически такие же как в вакууме [4], тогда как плотность тока катодных и анодных падений напряжения несколько ниже чем в вакууме, коэффициент электропереноса практически сохраняется, что говорит о том, что в зоне пятна образуется паровая зона, где влияние жидкости практически не сказывается.

Показана возможность получить параметры электродных пятен: время жизни пятна, плотность тока в пятне, ток в пятне, скорость перемещения пятна, количество электродных пятен и коэффициент электропереноса на аноде и катоде обработкой ЭОП-грамм, полученных с помощью «Лупы времени» типа ЛВ-04.

Список литературы

1. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 596 с.
2. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 482 с.
3. Белан, Н.В. Физические основы стойкости электродов плазменных ускорителей и технологических плазменных устройств [Текст]: учеб. для вузов / Н.В. Белан, Г.И. Костюк, Е.П. Мышелов – Х.: Минвуз СССР, 1986. – 207 с.
4. Раховский, В.И. Физические основы коммуникации электрического тока в вакууме [Текст] / В.И. Раховский. – М.: Наука, 1970. - 536 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 19.09.2013

Динаміка електродних плям в реакторі для очищення стічних вод від важких металів

Доведено можливість дослідження динаміки параметрів електродних плям: час життя плями, густина струму в плямі, струм у плямі, швидкість переміщення плями, кількість електродних плям на аноді і катоді із залученням «Лупи часу» типу ЛВ-04.

Ключові слова: катодна і анодна плями, очищення, термін життя, густина струму, швидкість переміщення плями.

The dynamics of the electrode spots in the reactor for wastewater treatment from heavy metals

Shown experimentally possible to study the dynamics of parameters of the electrode spots: the lifetime of spots, the current density in the macula, the current spot rate of movement of spots, the number of spots on the electrode anode and cathode using "loupes time" type of LP-04.

Keywords: anode and cathode spots wastewater from heavy metals, the reactor, the current density, the current speed of the spot.