

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИНТЕЗА НАНОУГЛЕРОДА ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В РАСТВОРАХ ОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ. Часть II. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Л.З. Богуславский, Н.И. Кускова, А.П. Малюшевская, А.А. Смалько, С.А. Хайнацкий

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, boguslavsky@mail.ru, iipt@iipt.com.ua*

В первой части работы определены условия получения нанокристаллических композитов при электрическом разряде в растворах органических кислот, включающие в себя требования к виду разряда и особенностям его реализации, выбору рабочей жидкости и параметров энергоузла. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований возможности зажигания коронного разряда в растворах органических кислот и зависимости свойств и количества получаемых материалов от различных параметров и факторов.

Методика проведения эксперимента. В опытах использовался генератор импульсных токов с емкостным накопителем энергии, в качестве коммутирующего устройства – управляемый воздушный разрядник. В процессе разряда накопителя на нагрузку осциллографировались ток и напряжение с помощью двухлучевого запоминающего осциллографа С8-17, датчиком тока служил коаксиальный шунт, напряжением – омический делитель. Для измерения сопротивления рабочего промежутка и сравнительного анализа удельного сопротивления растворов электролитов применялся реохордный мост Р-38. Фоторегистрация разряда проводилась камерой Sony Cyber-Shot DSC-H7.

Микроструктура полученных в результате электроразрядной обработки растворов органических кислот наноматериалов исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6490LV, оборудованного энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 Premium с кремниевым дрейфовым детектором, спектрометром с волновой дисперсией INCA Wave 500 и детектором дифракции обратно отраженных электронов HKL Channel 5 EBSD. Концентрации элементов по полученным спектрам рассчитывались методом матричных исправлений. Ряд микрофотографий получен с помощью просвечивающего электронного микроскопа JSM-6700F.

Для проведения экспериментов нами были разработаны реакторы (разрядные камеры цилиндрической формы) пяти типов. Их основные характеристики приведены в табл. 1. Токотвод в изоляторе располагался по оси цилиндра, наконечники электродных систем различной формы во всех случаях имели положительную полярность. Такой выбор был обусловлен тем, что, как уже указывалось в I части статьи, при прочих равных условиях коронный разряд развивается предпочтительно с положительного электрода.

Таблица 1. Характеристики реакторов для электроразрядного синтеза нанокристаллического углерода

№ п/п	Материал камеры	D_k , мм	H_k , мм	Тип эл. системы		Характеристики анода				Расположение п/э	l_p , мм
				(+)	(-)	d_e , мм	h_e , мм	s_e , мм	l_e , мм		
1	Стекло	150	170	О	О	1	3	-	10	↙	50
2	Фторопласт	100	150	Д	П	8	3	-	8	⊙	42
2а	- « -	100	150	О	П	1	3	-	10	↙	40
2б	- « -	100	150	С	П	35	1	3	35	⊙	33
3	- « -	65	210	О	П	3	3	-	3	⊙	30
4	Полиэтилен	145	300	О	П	3	3	-	3	↓	110
5	Сталь	130	300	Д	П	60	2		1	⊙	35
5а	- « -	130	300	О	П	3	2		1,5	↓⊙	60

Здесь D_k и H_k – диаметр и высота разрядной камеры, (+) – анод, (–) – катод, d_e – диаметр неизолированной части анода, h_e – толщина (стержня, диска, спирали и т.п.) анода, s_e – ширина (спирали), l_e – длина выступающей (неизолированной) части анода, \lrcorner – катод сбоку (на стенке камеры), \downarrow – катод снизу (на днище камеры), \odot – коаксиальные электроды, l_p – длина межэлектродного промежутка, O – острие, Π – плоскость, D – диск, C – спираль, п/э – противоэлектрод. Материал камеры 1 позволял производить фоторегистрацию разряда, а 2–4 – визуально контролировать зажигание разряда по свечению в прианодной области. Поскольку камеры 1–4 выполнены из изолирующих материалов, противоэлектроды в камере № 1–3 были сделаны в виде алюминиевых фрагментов цилиндра на стенках камеры, а в камере № 4 – в виде титановой пластины $d = 115$ мм на днище камеры. Варианты исполнения разрядных камер (2а, 2б и т.п.) касались типа исполнения электродных систем. К примеру, для разрядной камеры № 2 использовались «упрощенные» электродные системы, где «острие» было образовано кромкой металлической пластины либо кромкой спирали.

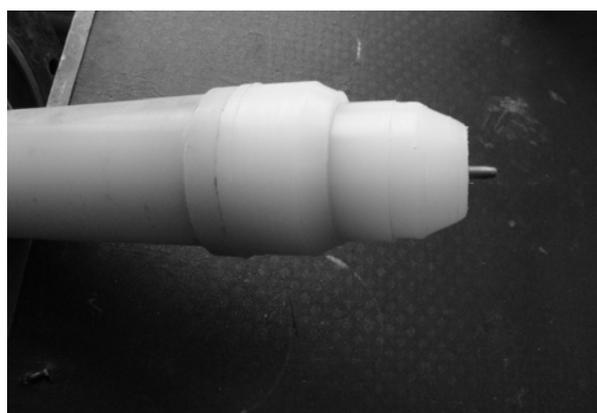
Камера 5 представлена на рис. 1. Корпус камеры стальной. На рис. 2 представлены варианты исполнения электродных систем для этой камеры.



Рис. 1. Внешний вид разрядной камеры 5



а



б

Рис. 2. Варианты исполнения электродных систем для камеры 5: а – дисковый электрод; б – острие

Для увеличения объема жидкости, подверженной объемному электроразрядному воздействию путем реализации импульсного коронного разряда (ИКР) или лидерного пробоя с большим количеством лидеров, в качестве рабочих жидкостей нами в основном использовались растворы органических кислот, обладающих относительно высокой (до 8 См/м – см. часть I статьи) удельной электропроводностью. В этой части статьи представлены результаты исследования разряда в растворах щавелевой и лимонной кислот, для остальных кислот, указанных в табл. 1 (см. I часть статьи), результаты близки к указанным выше (к той или иной).

Параметры разрядного контура выбирались в соответствии с полученными в I части статьи соотношениями для зависимости размеров плазменного поршня от внешних регулируемых параметров. Примерный набор параметров в опытах приведен в табл. 2.

Таблица 2. Параметры опытов

№ п/п	№ оп.	Параметры раствора			Параметры опыта					Вид разр.	R, Ом	m ₂ , г
		В-во	Растворитель	Конц., г/л	U ₀ , кВ	C, мкФ	L, мкГн	f, Гц	N			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	Щ	Вода	70	10	0,1	3	-	100	+	-	-
2	2	Щ	“-“	70	20	0,1	3	-	100	+	-	-
3	2а	Щ	“-“	70	12,5	0,1	3	-	100	+	-	-
4	2б	Щ	“-“	70	15	0,1	3	-	100	+	-	-
5	3а	Щ	“-“	70	24	0,1	3	-	100	к	-	-
6	3б	Щ	“-“	70	18	0,1	3	-	100	к	-	-
7	3	Щ	“-“	100	14	0,1	3	2	500	к	-	0,6
8	3	Щ1	Этанол	150	14	0,1	3	2	500	л	-	1,4
9	4	NaCl	Вода	50	5	106	10	-	10	к	17	-
10	4	Щ	“-“	70	5	106	10	-	10	к	17	-
11	4	Л	“-“	50	5	106	10	-	10	к	370	-
12	5а	Щ3	“-“	70	10	23	4	4	1000	к	23	0,8
13	5	Щ7	“-“	100	26	3	4	5	1000	к	13	1,35
14	5	Л8	“-“	200	26	9	4	5	1000	к	120	3,6
15	5а	Щ9	“-“	100	26	3	4	4	1000	к	36	1,6
16	5а	Л10	“-“	200	26	9	4	4	1000	к	300	4,3
17	5	Щ11	Этанол	100	27	3	4	5	1000	л	115	6,4
18	5а	Щ12	“-“	200	27	3	4	4	1000	л	90	6,9

Во втором столбце таблицы указан номер опыта в соответствии с табл. 1, где представлены характеристики разрядной камеры, тип электродной системы и т.п. В столбцах 3, 4 и 5 представлены некоторые параметры рабочих жидкостей, использовавшихся в опытах, в частности тип растворителя и растворяемое вещество, концентрация раствора. В таблице используются обозначения: Щ – щавелевая кислота H₂C₂O₄*2H₂O, при этом Щ1 (Л1) и т.п. – код образца, прошедшего полный цикл исследований, начиная с электрофизических и заканчивая электронно-оптическими или дифрактометрическими; Л – лимонная кислота C₆H₈O₇.

Электрофизические параметры представлены в столбцах 6–8. Напряжение на конденсаторной батарее U₀ изменялось от 3 до 35 кВ с шагом 2,5–5 кВ, поэтому в столбце 6 указано только одно из начальных напряжений в опыте; емкость накопителя C – от 0,25 до 200 мкФ; индуктивность разрядного контура L была равной примерно 3 мкГн, за исключением случаев, когда она искусственно увеличивалась до больших значений. Буквой f обозначена частота разрядов, N – общее их количество в опыте. Вид разряда определялся либо визуальным по наличию свечения (обозначено в таблице значком +), либо приборно – по характеру осциллограмм тока и напряжения. Для обозначения вида разряда в таблице использованы символы «к» – коронный разряд и «л» – лидерный пробой промежутка. Для определения характера разряда по соотношениям, приведенным в I части статьи, использовалось также измерение низковольтного сопротивления рабочего промежутка R, приведенное в некоторых случаях в столбце 12.

После проведения серии электрических разрядов рабочую жидкость, содержащую продукты разряда в растворе и в виде взвеси наночастиц, сливали из разрядной камеры и центрифугировали в течение двадцати минут. Полученный после центрифугирования материал сушили при умеренных температурах (до 400 К) до образования сухого порошка. Нерастворимый в воде порошок промывали в органических растворителях, фильтровали, сушили и взвешивали. Масса сухого порошка в таблице обозначена как m₂.

Результаты экспериментальных исследований. Исследования возможности зажигания разряда в насыщенном водном растворе щавелевой кислоты (опыты 1–7) показали, что разряд реализуется в камерах I–4-го типа для всех электродных систем, представленных в табл. 1, начиная с напряжений 10 кВ при C = 0,1 мкФ. Материал камеры и ее конструктивные особенности – такие, как размеры камеры, конструкция анода, тип и расположение катода, не оказывают определяющего значе-

ния на условия зажигания разряда и его вид. Влияние оказывает только площадь катода. Замеры сопротивления промежутка в камере № 5 с изолированными боковыми стенками показали, что оно примерно в 5 раз больше, чем без изоляции. Наличие изолирующей вставки может существенно повлиять на характер разряда.

В опыте 8 нами проверена возможность зажигания разряда в насыщенном растворе щавелевой кислоты в этаноле. При указанных параметрах разряд имеет характер лидерного пробоя с сильно развита кистевой лидерной ветвью, то есть объем плазмы, формирующейся в процессе такого разряда, существенно больше, чем при разряде в этаноле. В чистом этаноле при прочих равных условиях такой промежуток начинает пробиваться при напряжениях 25–30 кВ, при этом формируется одиночный лидер практически без ветвления.

Влияние количества атомов углерода в молекулах органических жидкостей на массу получаемых материалов исследовалось в двух группах опытов. Так, в опытах 7 и 8, кроме рабочей среды, все остальные параметры были одинаковые. В качестве рабочей среды в опыте 7 использовался 10% водный раствор щавелевой кислоты, для приготовления которого в 900 мл дистиллированной воды растворяли 100 г кристаллической (71,4 безводной) щавелевой кислоты. Для каждого опыта раствор готовился непосредственно перед ним, поскольку он разлагается на свету при доступе кислорода. В опыте 8 использовался 15% раствор щавелевой кислоты в этаноле, приготовленный аналогично. Масса сухого порошка, полученного в этих опытах, соотносится как 1:2,3, что хорошо коррелирует с результатами, полученными ранее в [1] для разряда в органических жидкостях с количеством атомов углерода в молекулах 2 и 6. Там это отношение составляет 1:1,8. Увеличение этого отношения для разряда в растворах щавелевой кислоты, как и общее увеличение «выхода» углеродных наноматериалов, в нашем случае можно связать с увеличением объема плазмы канала разряда при реализации коронного разряда или лидерного разряда в жидкости с проводимостью, большей на 7–8 порядков.

Опыты 9–11 проводились с целью определения влияния состава электролита на характер разряда. В ряде работ (см., например, [2]) показано, что состав солей электролита не влияет на характеристики пробоя. Однако в этих работах преимущественно использовались растворы сильных электролитов, свойства которых, как указывалось выше, существенно отличаются от свойств слабых электролитов в наших опытах. Кроме того, опыты там проводились при достаточно малых концентрациях солей или кислот, то есть практически при бесконечном разбавлении (исследовались в основном «идеальные» электролиты), в то время как в наших опытах используются насыщенные растворы кислот.

На рис. 3 представлены осциллограммы тока (нижняя кривая) и напряжения при разряде в пятипроцентных водных растворах поваренной соли и лимонной кислоты и 7% щавелевой. Концентрация щавелевой кислоты выбиралась такой, чтобы совпали удельные электропроводности растворов NaCl и $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$ и соответственно интегральные сопротивления рабочих промежутков. Масштабы напряжения $m_U = 1 \text{ V/d}$; тока $m_I = 0,2 \text{ V/d}$ и времени $m_t = 1 \text{ ms/d}$ при коэффициентах деления $K_U = 5000 \text{ V/V}$; $K_I = 4,76 \text{ kA/V}$. Разряды в растворе NaCl производились для того, чтобы мы имели возможность сравнить характеристики разряда в растворах щавелевой и лимонной кислот с достаточно хорошо известными нам результатами для NaCl. На рис. 3,2 представлена «рабочая» осциллограмма разряда, параметры которого специально подбирались.

Сравнение осциллограммы тока и напряжения при разряде в растворах щавелевой кислоты и поваренной соли показывает, что развитие разряда происходит в них примерно одинаково. Для лимонной кислоты не удается подобрать такую концентрацию раствора, при которой ее проводимость тоже совпала бы с раствором NaCl, поскольку она значительно ниже при любых концентрациях. Исследования качественной зависимости сопротивления рабочего промежутка R для 5% водных растворов органических кислот и NaCl от длины промежутка l_p свидетельствуют о том, что удельное сопротивление растворов лимонной кислоты, по-видимому, как минимум на порядок выше, чем для поваренной соли и щавелевой кислоты. В то же время разница между сопротивлениями для двух последних растворов не так уж и велика. Сопротивление промежутка от его длины для пятипроцентных водных растворов поваренной соли и щавелевой кислоты растет примерно по логарифмическому закону, при этом значения сопротивления для раствора соли почти в полтора раза меньше. Соответствующие значения сопротивления промежутка с раствором лимонной кислоты выше более чем на порядок. Это дает основание считать, что для растворов щавелевой кислоты можно реализовать коронный разряд примерно для тех же параметров, при которых он зажигался в растворах поваренной соли. Например, при $C = 6 \text{ }\mu\text{F}$, $U_0 = 10 \text{ kV}$, $L = 21 \text{ }\mu\text{H}$ и $l_p = 110 \text{ mm}$ осциллограммы тока и напряжения разряда в насыщенном растворе щавелевой кислоты имеют почти «классический» для коронного разряда куполообразный вид (рис. 3,2).

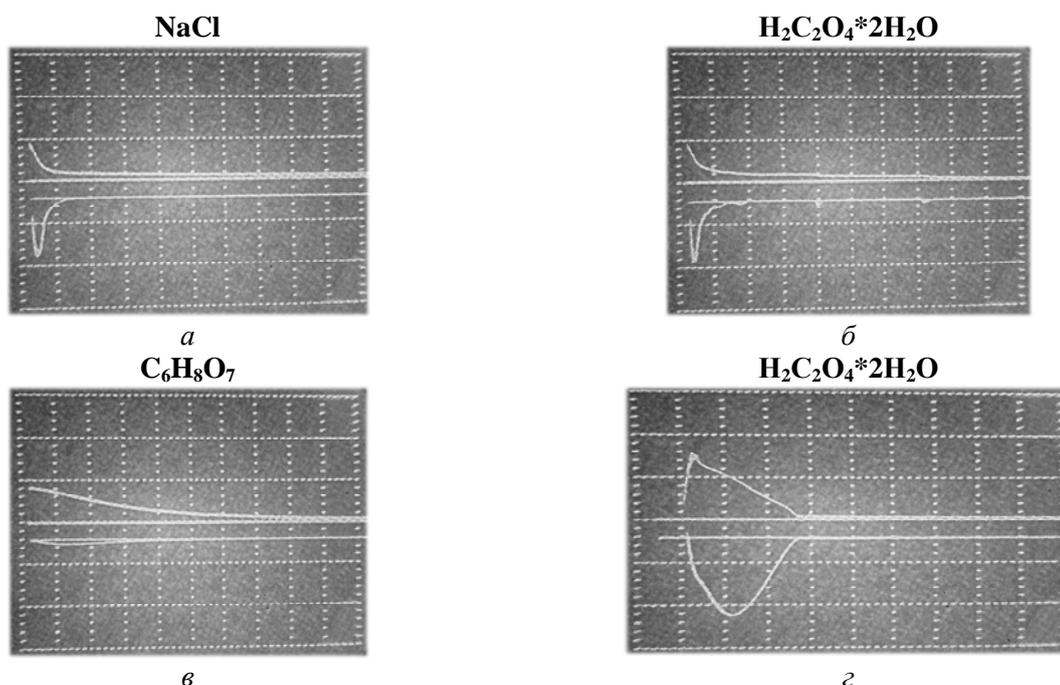


Рис. 3. Осциллограммы тока (нижняя кривая) и напряжения при разряде в водных растворах поваренной соли, щавелевой и лимонной кислот

Зависимость массы получаемых материалов от длины рабочего промежутка исследовалась в следующей серии опытов (№ 12 в табл. 2). Все другие параметры разряда, камеры и рабочей среды фиксировались. Межэлектродный промежуток увеличивался от 20 до 110 мм с шагом 10 мм. Зависимость растет по степенному закону, при длине промежутка $l_p = 90$ мм выходит на насыщение, то есть дальнейшее увеличение промежутка не приводит к приросту массы получаемых продуктов. Это может свидетельствовать о том, что на прирост массы оказывает влияние не только амплитуда тока или напряжения, но и длительность разряда.

В опыте 13 исследовалось влияние запасаемой энергии на количество получаемой массы при изменении емкости конденсаторной батареи, которая изменялась от 3 до 9 мкФ с шагом 3. Длина рабочего промежутка в опытах $l_p = 60$ мм. При увеличении емкости конденсаторной батареи до 9 мкФ на осциллограммах амплитуда и крутизна нарастания тока увеличиваются (вместо купола – резкий подъем с перегибом), за «куполom» появляется колебательный «хвост» на 2–3 периода с незначительными амплитудами, то есть в рамках наших представлений время обработки и соответственно количество вовлеченной в плазмохимический синтез рабочей жидкости существенно увеличились. Масса материала (Щ7) возросла до 3 г. Зависимость количества сухой массы от энергии линейная, при увеличении запасаемой энергии в три раза масса увеличивается более чем вдвое.

В тех же условиях, при полном сохранении всех параметров, нами проведены опыты с насыщенным водным раствором лимонной кислоты. Сопротивление разрядного промежутка с 20% раствором лимонной кислоты оказалось на порядок выше, чем в предыдущем опыте. Разряд носит аperiodический характер. Длительность разряда растет с увеличением количества импульсов. При увеличении начального напряжения до 30 кВ характер разряда меняется – осциллограммы тока и напряжения приобретают форму купола, но амплитуда тока по-прежнему небольшая. Масса сухого порошка, получаемого при разрядной обработке насыщенного раствора лимонной кислоты, при прочих равных условиях почти в два раза больше, чем щавелевой.

Для растворов лимонной и щавелевой кислот проводился также ряд опытов по влиянию геометрии разрядного промежутка и конструкции анода на количество получаемых наноматериалов. В камере № 5, как видно из табл. 1 и 2, использовались электродная система «острие-плоскость» с полусферическим анодом диаметром 3 мм (рис. 2,б) и коаксиальная система с протяженным дисковым электродом (рис. 2,а). В качестве катода в первом случае выступало днище камеры, во втором – ее боковые стенки. Параметры этих опытов представлены в табл. 1 и 2.

В целом характер зависимости количества материалов, получаемых в опытах, от длины промежутка и введенной энергии практически одинаков для обеих электродных систем. Отличия носят количественный характер и состоят в том, что при всех одинаковых исходных параметрах сопротивление промежутка в коаксиальной системе примерно вдвое выше, чем в системе «острие-плоскость».

Соответственно амплитуды напряжения на осциллограммах больше, а тока – меньше. Характер разряда, судя по осциллограммам, одинаков. Зато количество (масса) получаемых материалов выше примерно на 20% для протяженного электрода.

Учитывая хорошую растворимость щавелевой кислоты в этаноле, мы предприняли более детальные исследования разряда в этой рабочей жидкости, хотя заведомо было известно, что реализовать коронный разряд в ней вряд ли удастся. Исследовались 10- и 20-процентные растворы. По нашим оценкам (в том числе и по измерениям реохордным мостом Р-38), удельное сопротивление этих растворов составляло примерно 2200 Ом·см и 1300 Ом·см соответственно. Это диапазон водопроводной воды, поэтому следовало ожидать и подобный характер разряда. В то же время удельное сопротивление чистого этанола при 18°C составляет $6,4 \cdot 10^8$ Ом·см, то есть более чем на 5 порядков больше, чем у водопроводной воды, и примерно на 3–4 порядка больше, чем у дистиллированной воды, характер разряда в которой нам также хорошо известен. Соответственно предполагалось, что в растворах щавелевой кислоты в этаноле следует ожидать лидерный пробой промежутка с высокой степенью ветвления лидерной короны, в то время как при пробое этанола в неоднородных полях должны наблюдаться одиночные каналы без ветвления, то есть объем плазмы, формирующейся в этих разрядах и участвующей в плазмохимическом синтезе, существенно разный.

Особенности разряда в растворе щавелевой кислоты в этаноле исследовались в камере № 5 в обеих электродных системах – опыты № 17. При $\rho \approx 2200$ Ом·см разряд носит аperiодический характер, промежуток $l_p = 35$ мм является оптимальным по электротехническим параметрам [3] для этой электродной системы. Предразрядная полка на осциллограмме напряжения длительностью 15 мкс по амплитуде соответствует начальному напряжению $U_m \approx 27$ кВ и не имеет наклона, то есть предпробойные потери практически равны нулю. С увеличением концентрации вдвое удельное сопротивление падает до 1300 Ом·см, разряд становится периодическим (1-й период), $T \approx 20$ мкс, полка уменьшается до 10 мкс, но амплитуда та же, и потери по-прежнему отсутствуют. Масса сухого порошка увеличилась на 20%. В этой же серии опытов исследовалась зависимость массы получаемых материалов от длины разрядного промежутка. Качественный вид зависимости практически такой же, как для водного раствора. При длине промежутка 90 мм разряд при этих параметрах прекращается.

В серии №18 исследованы все те же зависимости в электродной системе «острие-плоскость». Они также качественно соотносятся с результатами обработки водных растворов, при этом количественные пропорции сохраняются такие же, как в предыдущем случае. Сохраняется та же тенденция небольшого увеличения массы при увеличении промежутка и при переходе к коаксиальной системе.

Свойства полученных материалов. На рис. 4 представлены микрофотографии фрагментов различных образцов. На рис. 4,а показана микрофотография образца ЩЗ с увеличением $\times 3000$. Как видно, участки поверхности образца, содержащего наноглерод, сильно загрязнены довольно большими (до 10 μm) фрагментами посторонних примесей. Химический состав этих примесей частично представлен в табл. 3.

Наличие большого количества металла на поверхности образца можно связать с эрозией стальных электродов в процессе разрядов в агрессивной среде.

Визуально получаемый при электроразрядной обработке материал представляет собой серый порошок с вкраплениями бесцветных кристаллов щавелевой кислоты. Основная масса материала – это, как указывалось выше, наноструктурный углерод, агрегированный в силу высокого поверхностного натяжения в заметные глазом частицы. Наличие кристаллов щавелевой кислоты объясняется методикой дальнейшей обработки материала – после центрифугирования остатки воды выпариваются при температуре до 150°C. Количество получаемого материала на единицу введенной энергии, как указывалось выше, больше, чем получено в [1] при электроразрядной обработке углеводородного сырья с одинаковым количеством атомов углерода в молекуле. Однако отношение этих масс значительно ниже ожидаемого, прогнозирувавшегося по отношению размеров плазменных областей, участвующих в обработке сырья, в разрядах разного типа. Это может быть связано со слишком низкой термической стойкостью молекул щавелевой и лимонной кислот, которые разлагаются на СО, СО₂, Н₂О при температурах, ненамного превышающих температуры кипения раствора [4]. Это означает, что даже в не слишком близкой к разряду зоне часть углерода уходит из раствора в виде газа и не участвует в плазмохимическом синтезе, что соответственно и снижает общее количество получаемого наноглерода.

На рис. 4,б показана микрофотография образца ЩЗ с увеличением $\times 100000$. Фотография получена с помощью просвечивающего электронного микроскопа JSM-6700F. Выбран участок (029 на рис. 4,а) без посторонних включений. Вид нанообъектов характерен для образцов аморфного углерода, полученного методом электрического пробоя углеводородных жидкостей [5].

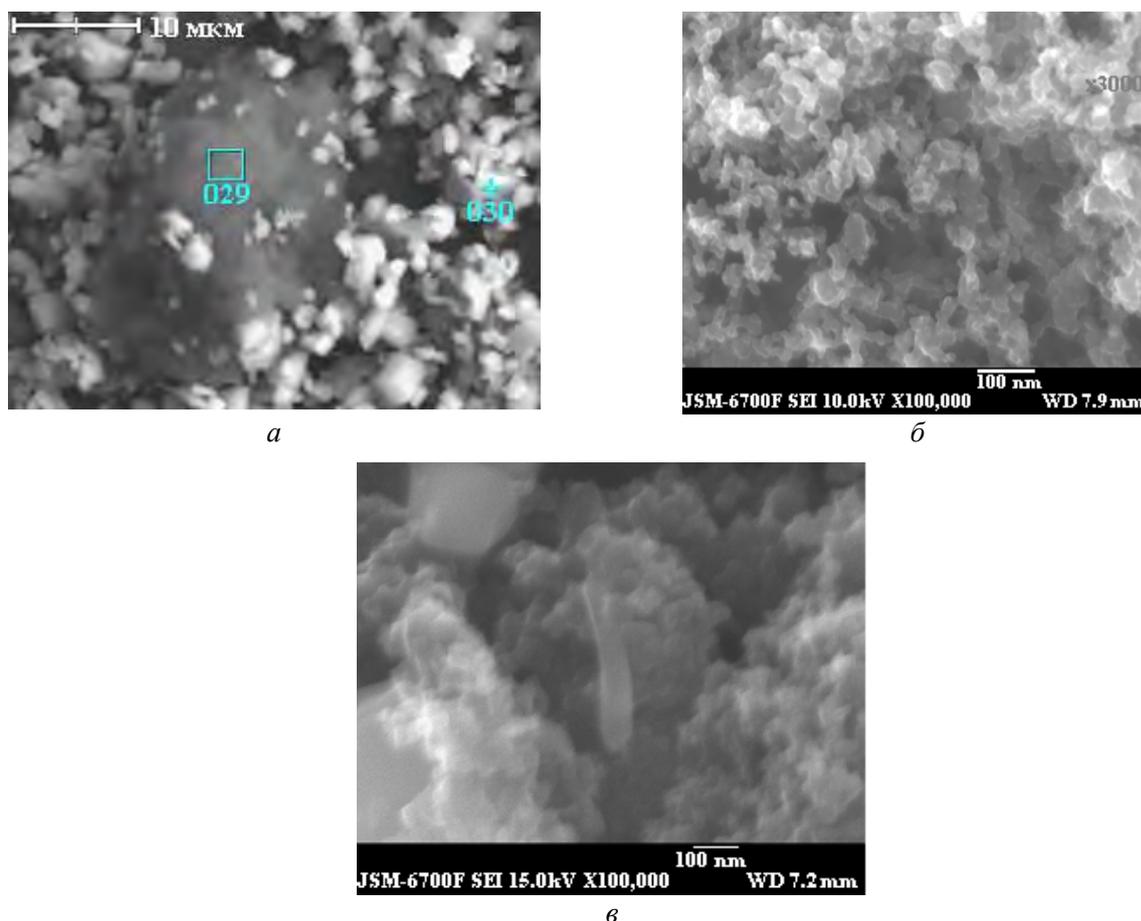


Рис. 4. Микрофотографии различных образцов: а – образец ЦЗ x3000; б – образец ЦЗ (участок 029 на рис. 4,а) x100000; в – образец Ц11 x100000

Таблица 3. Состав примесей на поверхности образца ЦЗ

Мемо	C	O	Si	Ca	Fe	Ni	Zn	Total
29	84,1	6,08	0,8	0,77	8,25			100
30	3,58	10,8	0,16	0,64	79,81	1,96	3,06	100

Микрофотография образца Ц11, синтезированного при электроразрядной обработке раствора щавелевой кислоты в этаноле, представлена на рис. 4,в. Вид глобул, из которых состоят частицы полученного порошка, также характерен для наноуглерода, полученного электроразрядным способом [1]. Отличие состоит в размере этих глобул – в нашем случае он в среднем составляет менее 50 нм, что вчетверо меньше, чем в [1].

На микрофотографии, кроме достаточно однородно распределенных наноуглеродных глобул, видны и другие элементы, которые, как и в случае образца ЦЗ, являются посторонними, загрязняющими включениями. Однако анализ большого числа фотографий с различным разрешением позволяет сделать вывод, что удельный вес их в общей массе полученного наноуглерода невелик. Масса наноуглерода в среднем на 15% выше, чем при электроразрядной обработке чистого этанола [1].

Выводы. Таким образом, в результате экспериментальных исследований нами установлено, что реализация коронного разряда при определенных условиях возможна и в водных растворах слабых электролитов, таких, например, как многоосновные органические кислоты. При их электроразрядной обработке синтезируется материал, содержащий наноуглерод. Исследование влияния различных факторов на количество синтезируемого при электроразрядной обработке растворов лимонной и щавелевой кислот позволило выявить следующие закономерности:

- растущая зависимость массы получаемых материалов от длины рабочего промежутка, при определенных значениях длины рост прекращается;
- изменение запасаемой энергии путем изменения емкости конденсаторной батареи приводит к линейному увеличению количества получаемой массы;

- масса сухого порошка, получаемого при разрядной обработке насыщенного раствора лимонной кислоты, при прочих равных условиях почти в два раза больше, чем щавелевой;
- электродные системы с протяженными анодами (коаксиальная, «нож» – плоскость и т.п.) эффективнее систем «острие-плоскость» с точки зрения количества получаемых материалов как минимум на 20%;
- разряд в насыщенном растворе щавелевой кислоты в этаноле качественно похож на разряд в водопроводной воде, отличием является отсутствие предпробойных потерь;
- количество получаемого материала на единицу введенной энергии при коронном разряде больше, чем получено в [1] при электроразрядной обработке углеводородного сырья с одинаковым количеством атомов углерода в молекуле, однако отношение этих масс значительно ниже ожидаемого, прогнозирувавшегося по отношению размеров плазменных областей, участвующих в обработке сырья, в разрядах разного типа;
- разряд в насыщенном растворе щавелевой кислоты в этаноле эффективнее разряда в чистом этаноле на 15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кускова Н.И., Богуславский Л.З., Смалько А.А., Зубенко А.А. Получение наноуглерода методом электроразрядной обработки органических жидкостей. *Электронная обработка материалов*. 2007, **43**(4), 46–52.
2. Бродская Б., Эйскоп Р., Паю А. Особенности развития импульсных разрядов в сильнопроводящих жидкостях. *Известия АН ЭССР. Химия. Геология*. 1968, **17**(3), 251–256.
3. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 206 с.
4. *Справочник по электрохимии*. Под ред. д.х.н., проф. А.М.Сухотиной. Л.: Химия, 1981. 485 с.
5. Рудь А.Д., Иващук Л.И., Кускова Н.И., Зелинская Г.М., Уваров В.Н., Мельничук Е.Е. Структура аморфного углерода, полученного методом электрического пробоя углеводородных жидкостей. *Известия высших учебных заведений, серия "Химия и химическая технология"*. 2010, **53**(10), 38–43.

Поступила 03.02.11

После доработки 23.03.11

Summary

It is experimentally set that realization of crown digit is possible in water solutions of weak electrolytes, such as polybasic organic acids. It is explored, as different factors on the amount of the synthesized nanocarbon at electro-bit treatment of solutions of oxalic and lemon acids is influenced.