

Электроразрядная технология и оборудование для получения новых углеродных наноматериалов

Н. И. Кускова^а, К. В. Дубовенко^б, С. В. Петриченко^а, П. Л. Цолин^а, С. О. Чабан^б

^аИнститут импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина

^бНиколаевский государственный аграрный университет,
ул. Парижской Коммуны, 9, г. Николаев, 54010, Украина, e-mail: dubovenko2010@gmail.com

Предложен непрерывный и безотходный технологический процесс, который состоит из совокупности одновременно осуществляемых операций по электроразрядной обработке углеродной жидкости в реакторах путем воздействия на нее высоких температур и давлений, формируемых плазменным каналом разряда, отбору и разделению продуктов обработки в фильтрующих либо центробежных разделительных устройствах и рециркуляции очищенного сырья в замкнутой гидросистеме. Производимый продукт, в зависимости от применяемого способа отбора и разделения, представляет собой густую пастообразную массу, либо сухую порошковую смесь, содержащую различные модификации углерода – фуллерены, нанотрубки и наноалмазы в количестве до 10% от общего веса. Опытный образец созданного электротехнологического оборудования обеспечивает производительность обработки от 0,02 до 1,5 кг/час, имеет максимальную установленную мощность – 5 кВт·А, удельные энергозатраты составляют от 0,1 до 10 МДж/кг.

Разработан для промышленного применения генератор импульсных токов с микропроцессорным управлением и максимальной по условиям релаксации среды и восстановления разрядного промежутка частотой следования разрядных импульсов 200 Гц. Это открывает возможность обеспечения гибкого регулирования характеристик технологического процесса и сдвига соответствующего диапазона производительности однореакторных систем в область от 0,4 до 30 кг/час.

Технологию дополняет разработанная методика обогащения производимого ультрадисперсного порошка, которая содержит оригинальную последовательность физико-химических методов (магнитное разделение, кислотную обработку, хроматографическую очистку и др.) и позволяет повысить целевую селективность продуктов обработки.

Ключевые слова: электроразрядная технология и оборудование, углеродные наноматериалы.

УДК 537.528:621.762

ВВЕДЕНИЕ

Электроразрядная технология получения углеродных наноматериалов (УНМ) основана на использовании искрового разряда в органической жидкости. При воздействии мощных электроразрядных импульсов в рабочем объеме возникает локальная область высокого давления и температуры, в которой происходит деструкция и разложение молекул органической жидкости с последующим образованием различных видов УНМ. Разряд сопровождается комплексом взаимосвязанных физических явлений: расширением высокотемпературного плазменного канала, излучением волны сжатия–разрежения, формированием гидродинамических потоков, генерированием радикалов и радикальных групп. Осуществляется многоступенчатое преобразование электрической энергии в электромагнитную, тепловую, акустическую, кавитационную и др.

Такая комплексная феноменология электроразрядной обработки усложняет теоретическое описание схемы образования наноструктур (НС)

и в то же время создает практически неограниченные возможности по регулированию динамических условий синтеза, позволяет получать известные аллотропные формы углерода и новые функциональные УНМ [1–4].

В работе рассмотрены основы непрерывной, безотходной электроразрядной технологии получения УНМ, отличие которой от ранее предложенных нами способов электроразрядной обработки состоит в использовании проточного режима, когда рабочая жидкость циркулирует в замкнутой гидросистеме.

Предложенная технологическая схема обеспечивает быстрый вывод синтезируемых углеродных наноструктур из плазменной области, что предотвращает их разрушение и повторное попадание в зону разряда.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ

Для определения параметров электроразрядной обработки применялся теоретико-экспериментальный подход. Были учтены соотношения

энергий разрыва C–C, C–H связей в молекулах углеводородов и энергии единичных разрядов, рассмотрены схемы возможных превращений углеводородов, протекающих по свободно-радикальному механизму [1, 2]. Ввиду того, что установление всей совокупности физико-химических превращений, приводящих к накоплению УНМ, представляет собой довольно сложную задачу из-за большого разнообразия возможных реакций с участием активных промежуточных частиц – ионов, электронов и возбужденных молекул, основное внимание уделялось экспериментальным результатам. Проводилась коррекция изменения параметров технологических процессов электроразрядного синтеза УНМ с данными различных физико-химических методов исследования структуры и свойств получаемых при заданных условиях порошков [1–4], результаты которой сведены в таблицу.

Повышение селективности целевого продукта может быть достигнуто комплексообразованием электроразрядной обработки с электрическим взрывом графитовых проводников, подаваемых в разрядный промежуток. Тогда применительно к задачам синтеза таких наноразмерных модификаций углерода как алмаз, фуллерен и УНТ, единичный разрядный импульс может включать две основные стадии – электрический взрыв (ЭВ) цилиндрического проводника и последующий пробой межэлектродного промежутка. Важной в данном случае становится необходимость обеспечения требуемой формы разрядного импульса с фиксацией таких параметров (см. таблицу, В), как скорость нарастания dl/dt и плотность тока ЭВ j , удельная запасаемая энергия $W_{уд}$.

Перечисленные требования могут быть удовлетворены при выполнении совокупности начальных условий, полученных нами ранее [5, 6] в ходе разработки основ управления процессами электровзрывного и электроразрядного преобразования энергии в углеродсодержащих конденсированных средах.

ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЯ

В качестве сырья в технологии могут быть использованы органические жидкости (при нормальных условиях), представляющие несколько классов органических соединений. Это ароматические углеводороды, спирты, алканы (C_nH_{2n+2}), циклоалканы (C_nH_{2n}), смеси углеводородов различной степени очистки (уайт-спирит, соляровое масло). Выбор той или иной жидкости осуществляется по ряду критериев. Учитываются разновидности УНМ, которую требуется получить, и/или совокупные свойства продукта (например, порошковой смеси), допустимые стоимостные показатели, расход сырья, степень взрыво- и пожаробезопасности, объемы производства и др.

Рассмотрим одну из возможных схем выбора сырья для получения УНМ на основе таких аллотропных форм (и их модификаций) углерода, как аморфный углерод (с различным типом ближнего порядка), алмаз, УНТ, фуллерен и карбин.

Предпочтительней использовать органическую жидкость, в которой степень sp -гибридизации атомов углерода соответствует или близка к степени sp -гибридизации у наноструктуры в целевом продукте (для аморфного углерода – смешанная). Учитывается подобие строения молекулы углеводородной жидкости (или компонентов смеси) структурным элементам скелетной формулы синтезируемых аллотропных форм наноуглерода и количеству атомов в молекуле исходного сырья. Выбор жидкости с указанным подобием строения и большим, при прочих равных условиях, числом атомов должен способствовать минимизации энергозатрат, увеличению выхода и процентного содержания заданных структурных элементов в УНМ.

Частично такая схема подтверждается рентгеноструктурными, спектральными и гравиметрическими исследованиями продуктов электроразрядной обработки жидких углеводородов, относящихся к классам алканов (гексан, додекан), циклоалканов (циклогексан) и смесей (ТС-1 (ГОСТ 10227-86), степень гибридизации – sp^2+sp^3 , преобладает sp^2). На основании анализа спектров комбинационного рассеивания, дифрактограмм, результатов расчета структурного фактора, функции радиального распределения атомов и количества полученного нами аморфного углерода (АУ) было установлено следующее. Применяя в качестве сырья ТС-1, АУ содержит преимущественно графитоподобные частицы (максимумы соответствуют атомам углерода, находящимся в sp^2 -состоянии), при использовании алканов и циклоалканов – алмазоподобные частицы (максимумы соответствуют атомам углерода, находящимся в sp^3 -состоянии). Наблюдается подобие спектров комбинационного рассеивания для образцового алмаза и для материала, полученного из циклогексана, молекула которого пространственно подобна шестизвенному кольцу в структуре алмаза. Выход УНМ по массе (сухой порошок) нелинейно возрастает с ростом числа атомов углерода в молекулах исходной органической жидкости.

Согласно анализу показателей преломления органических жидкостей до и после электроразрядной обработки, а также масс-спектров газов, адсорбированных углеродным порошком, состав органических жидкостей в процессе электроразрядной обработки не изменяется, происходит разложение молекул с последующим образованием твердофазных углеродных наноматериала-

Основные диапазоны параметров электроразрядной обработки

А. Обработка с умеренной энергией единичных разрядных импульсов*							
W_0 , кДж	$W_{уд}$, МДж/кг	$f_{и}$, Гц	v , дм ³ /мин	W_{Σ} , МДж/кг		P^* , кг/час	
				порошок	паста	порошок	паста
0,05÷0,6	0,03÷0,5	1÷8	до 3	до 100	до 1,5	до 0,05	до 1,5
Б. Обработка с высокой энергией единичных разрядных импульсов**							
1÷10	0,5÷10	0,2÷1	–	до 250	до 50	до 0,25	до 1,25
В. Комплексование с электрическим взрывом проводника**							
W_0 , кДж	$W_{уд}$, МДж/кг	фуллерен, УНТ, нановолокна		УНТ, высшие фуллерены		алмаз, УНТ	
		dI/dt , А/с	j , А/м ²	dI/dt , А/с	j , А/м ²	dI/dt , А/с	j , А/м ²
до 40	1÷200	10^9	$5 \cdot 10^{11}$	10^9	$5 \cdot 10^6$	10^{10}	10^9

* Значения указаны для действующей опытной установки непрерывного цикла.

**Значения указаны для экспериментальных установок повторно-периодического режима работы.

лов, выделяются газообразные продукты – водород и низшие углеводороды разной степени насыщенности углеродных связей [1, 2, 4].

Таким образом, любой объем сырья, при условии периодического (или непрерывного) отбора полученного твердофазного УНМ и дегазации, может быть переработан полностью, без остатка и без изменения характеристик продукта, что дает возможность реализовать безотходный технологический процесс.

Существует также немаловажный аспект в вопросе выбора органической жидкости, связанный с ее теплофизическими свойствами (теплоемкостью, температурой кипения и удельной энергией испарения), определяющими динамику закалки углеродных фаз.

ПРОДУКТЫ СИНТЕЗА

Разнообразие состава и свойств электроразрядных УНМ объясняется целевым использованием различных органических жидкостей, режимов непрерывной обработки, конструкционных модификаций электротехнологических узлов, варьированием энергетических параметров и динамических характеристик разрядов. Непосредственный продукт электроразрядной технологии представляет собой сухую или пастообразную смесь порошка различного состава – углеродный нанопорошок, который проявляет совокупные либо селективные свойства: водородосорбционные, электрокинетические, магнитные, антифрикционные и противоизносные.

Исследования сорбционных свойств образцов электроразрядных УНМ, проведенные в Институте проблем химической физики РАН, показали высокую концентрацию в них водорода (более 5 мас.%) [7]. Добавка таких УНМ к магнию при проведении механохимического синтеза улучшает кинетику сорбции водорода и существенно понижает температурные режимы наводороживания. Разработанные на основе УНМ Mg-C на-

нокомпозиты поглощают свыше 5% водорода при температуре 363 К [8].

Исследования элементного состава УНМ, проведенных в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины методом интегрального рентгено-флуоресцентного анализа, показали, что в полученных при использовании металлических электродов образцах содержится до 10% железа. Величина удельной намагниченности насыщения УНМ, обогащенных атомами и частицами железа, после магнитного разделения и очистки (рис. 2, Магнитные УНМ) достигает значений, близких к типичным ферромагнетикам – $57 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$. Наличие ионов железа в плазменном канале разряда может приводить к формированию эндометаллофуллеренов, также обладающих магнитными свойствами. Применение одного из способов отделения полых фуллеренов от эндометаллофуллеренов, который заключается в использовании полярных растворителей, таких как анилин, показало, что в УНМ содержится до 30% растворимых частиц, которые могут быть эндометаллофуллеренами.

Получены интеллектуальные антифрикционные и противоизносные алмазографитовые наноматериалы, являющиеся перспективными присадками к автомобильным и трансмиссионным маслам [3]. Исследования трибологических свойств таких УНМ показало, что их применение в качестве присадок к маслам для узлов качения и скольжения приводит к уменьшению коэффициента трения (для пары сталь-сталь на 25%), снижению температуры в зоне контакта, стабилизации работы пар трения, уменьшению износа поверхностей трения в 4 раза, их шероховатости – в 2 раза. Модифицирование керамических покрытий наночастицами в процессе микроплазменной обработки в электролитах повышает их износостойкость по сравнению с базовым вариантом в 2–2,5 раза [9], а несущую способность – в 4–5 раз.

Помимо проявляемых свойств, электроразрядные УНМ могут быть классифицированы по типу, форме и размерности структурных элементов. Результаты такой классификации, проведенной согласно [10], а также электронно-микроскопические изображения и условные размеры полученных продуктов d представлены на рис. 1. Спектр синтезируемых структур ультрадисперсного углерода очень разнообразен – от элементарных НС (фуллеренов, графенов и углеродных нанотрубок (УНТ)) до ультрадисперсных аморфно-кристаллических частиц и кристаллитов, содержащих большинство известных аллотропных форм углерода (графит, ультрадисперсный алмаз (УДА) и фуллерит). Количество УДА в образцах достигает 10% от общего веса [6].

Содержание перечисленных структур подтверждается результатами рентгенофазового анализа более пятисот образцов углеродных порошков, полученных из различного исходного сырья в широком диапазоне варьирования параметров и схем обработки (см. таблицу), анализом ИК- и масс-спектров, насыпной плотности порошков.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС И ОБОРУДОВАНИЕ

Базовое содержание технологического процесса проиллюстрировано схемой (рис. 2а) и сводится к следующему. Органическая жидкость из предварительно заполненного напорного бака (НБ) по трубопроводу 1, сочлененному с НБ и электроразрядной камерой (РК) при помощи резьбовых муфт 2, подается в РК. Расход или объемная скорость протока жидкости изменяется запорно-регулирующим клапаном 3. В РК жидкость поступает через днище и поднимается, проходя сквозь кольцевой зазор, образованный дисковым электродом-анодом 4 и внутренней цилиндрической стенкой РК. В кольцевом зазоре дозированные за счет варьирования скорости протока порции жидкости обрабатываются разрядными импульсами, следующими с определенной частотой.

Ширина зазора, внутренний диаметр РК и толщина дискового электрода выбираются таким образом, чтобы для известных диапазонов частот следования разрядных импульсов и расхода углеводородного сырья, обеспечить в интервале времени между двумя последовательными разрядами полную смену объема жидкости в кольцевом зазоре. При этом необходимо обеспечить условия пробоя промежутка с минимальными потерями энергии на формирование разрядного канала.

Стабилизация частоты, при необходимости, выполняется путем использования для коммута-

ции конденсаторной батареи (С) на межэлектродный промежуток управляемого воздушного разрядника (УВР) и высоковольтного задающего генератора.

Разряды в кольцевом зазоре формируются радиально по отношению к оси дискового электрода. Пространственное распределение суммарной энергии, введенной в разрядный промежуток, для большой последовательности импульсов в целом равномерно по всему зазору, что подтверждается результатами слеодографического анализа эрозионных пятен на электроде, а также визуальными наблюдениями в процессе обработки через прозрачную крышку камеры (рис. 2в). Такая особенность является хорошим эксплуатационным показателем разработанного электротехнологического узла.

Обработанная жидкость, содержащая УНМ, через трубопровод 5 поступает в бак-накопитель (БН), совмещенный с фильтрующим устройством (ФУ). При этом между свободной поверхностью жидкости в БН и сливным наконечником трубопровода 5 расположен воздушный промежуток, что позволяет дополнительно ослабить электрическую и гидродинамическую связь между РК и БН.

Разработанная последовательность технологических операций обеспечивает реализацию как непрерывного, так и повторно-периодического режима обработки.

В первом случае органическая жидкость, уже содержащая УНМ, поступает из БН в ФУ, где за счет выбора и поддержания определенного соотношения площади фильтрующей поверхности и высоты столба жидкости в БН (для каждого сырья и режима обработки индивидуально) выполняются условия баланса между расходом жидкости и объемной скоростью фильтрации.

Выбранный тип, пористость и конструктивно-геометрические параметры фильтрующего устройства обеспечивают полное разделение твердой фракции – синтезированного УНМ и сырья – исходной органической жидкости. Как показали наши исследования, длительная обработка образцов жидкости, отобранных после фильтрующего устройства, на центрифуге (3000 мин^{-1}) не приводит к дополнительному выделению осадка. Все же, незначительная часть УНМ, по-видимому, в растворенном состоянии, находится в очищенном сырье, о чем свидетельствует его постепенное окрашивание в процессе длительной непрерывной обработки. Описанная схема позволяет безотходно перерабатывать углеводородное сырье в порошок продукт, при условии поддержания в гидросистеме минимально необходимого для циркуляции объема жидких углеводородов.

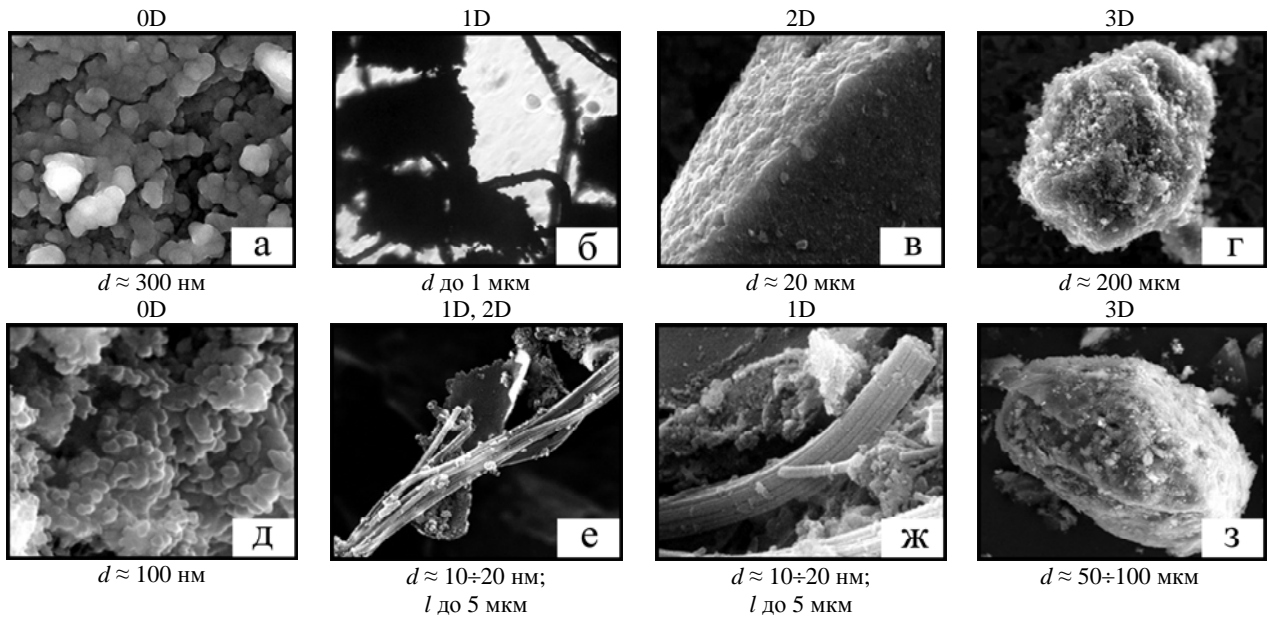


Рис. 1. Микрофотографии частиц УНМ: (а), (д) – скопления частиц; (б) – волокна; (в) – пленки волокон; (г), (з) – эквивалентные каркасы порошков; (е) – скопления нанотрубок и графеновые листы; (ж) – жгуты, содержащие до 10 нанотрубок.

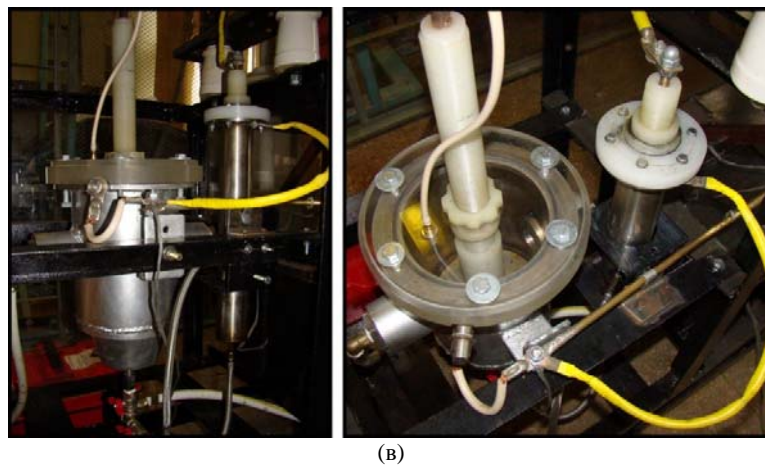
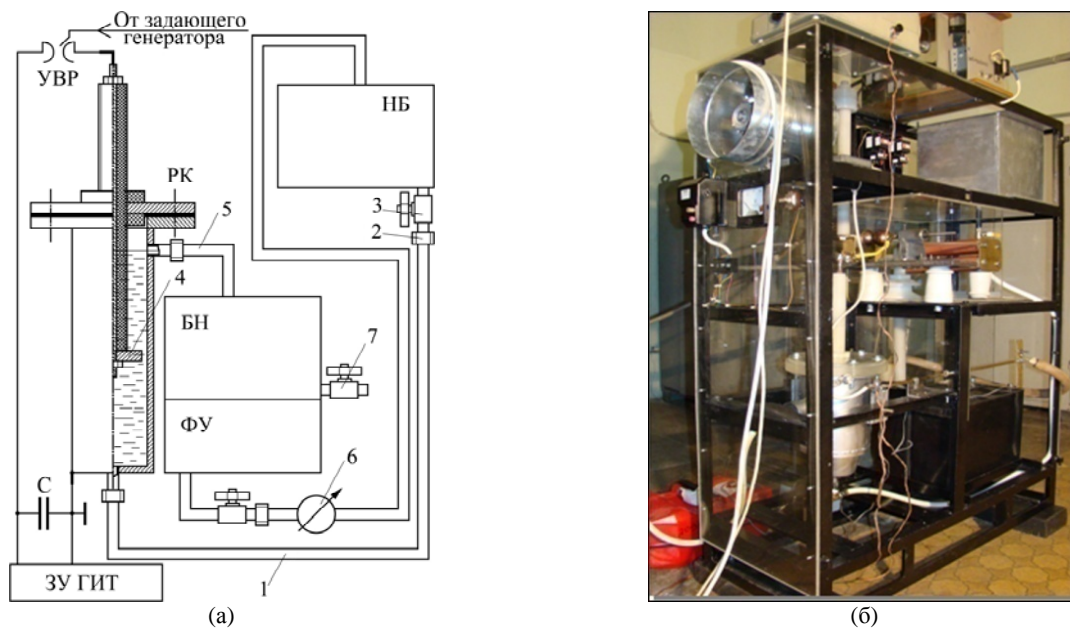


Рис. 2. Схема электроразрядной обработки органической жидкости для получения углеродных наноматериалов (а), внешний вид электроустановки (б) и разрядных камер (в).



Рис. 3. Последовательность операций по разделению, очистке и обогащению производимых УНМ.

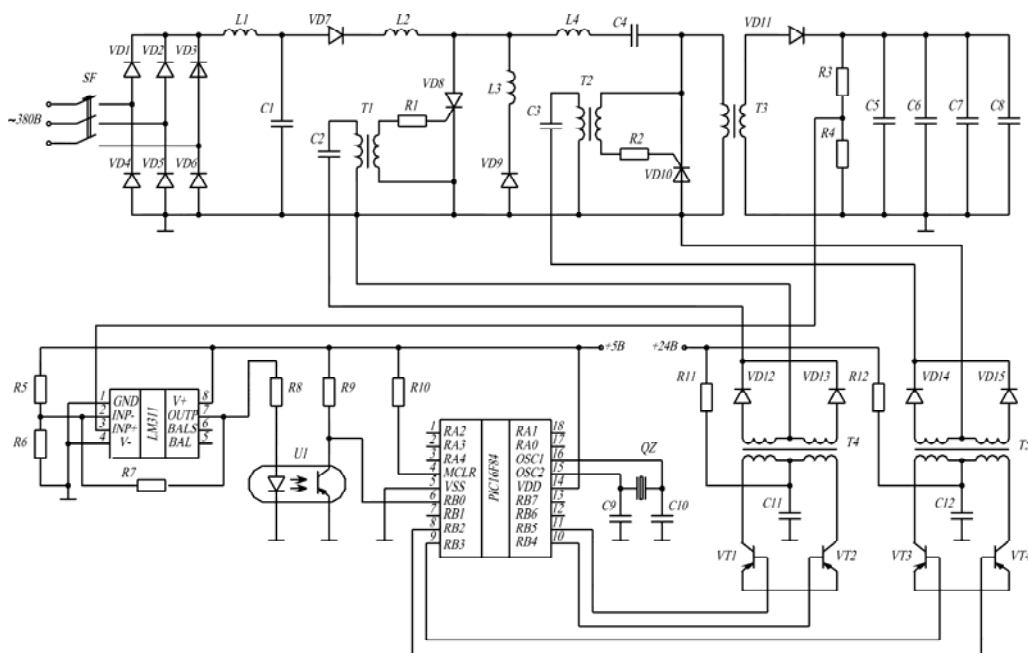


Рис. 4. Схема генератора импульсных токов с программно-задаваемой частотой следования импульсов.

Фильтрующее устройство имеет модульное исполнение, что обеспечивает возможность быстрой замены его фильтрующего элемента. В зависимости от режима обработки осуществляется от нескольких замен фильтрующего элемента на протяжении часа до одной замены в течение нескольких часов работы. Фильтрующие элементы подлежат многократному повторному использованию после сушения на воздухе и отбора сухой смеси порошкообразных продуктов.

Очищенное сырье после ФУ при помощи регулируемого (по напряжению питания) магнитного центробежного насоса с антикоррозионным покрытием рабочих поверхностей б подается в напорный бак, замыкая, таким образом, систему рециркуляции жидкости.

Вторая схема реализации технологического процесса используется для получения УНМ в виде густой пастообразной массы и реализуется путем использования высокоскоростной центри-

фуги оригинальной конструкции. Ее применение в ряде случаев целесообразно для электроразрядного получения интеллектуальных антифрикционных и противоизносных углеродных наноматериалов [3]. Отличие схемы состоит в том, что обработанная разрядами органическая жидкость из БН через запорный клапан 7 порциями подается на центрифугу после завершения периода электроразрядной обработки, который прекращается по мере расхода сырья из НБ. После разделения на центрифуге, жидкая фракция поступает обратно в напорный бак, осадок извлекается и, при необходимости, подвергается дальнейшему разделению, очистке и обогащению (рис. 3). Последовательность технологических операций повторяется. Несложно показать, что для такой схемы также может быть реализован непрерывный режим электроразрядной обработки, однако реализация потребует постоянного наличия в гидросистеме электроразрядной установки больших объемов дорогостоящих жидких углеводородов, применения сложной автоматизированной системы управления насосами и центрифугой, обеспечение надежности и устойчивости работы которой в условиях высоковольтных силовых разрядов весьма проблематично.

В крышках НБ и БН предусматривается установка штуцеров с улавливателями газа, поскольку процесс обработки сопровождается выделением водорода и различных газообразных фаз углеводорода.

Силовая часть зарядного устройства (ЗУ) созданной опытной электроустановки имеет простую схему и состоит из выпрямителя-трансформатора установочной мощностью 5 кВ·А и сменного блока токоограничивающих элементов в зарядной цепи конденсатора.

Замена блоков позволяет регулировать длительность зарядного процесса и обеспечивает, таким образом, необходимую частоту следования разрядных импульсов. Использование ЗУ с зарядными напряжениями от 10 до 40 кВ и конденсаторной батареи емкостью от 0,05 до 36 мкФ позволяет реализовать все диапазоны параметров непрерывной обработки, представленные в таблице.

Для обеспечения гибкого регулирования частоты следования разрядных импульсов и сдвига соответствующего диапазона производительности однореакторных систем в область от 0,4 до 30 кг/час целесообразно применение импульсно-периодических схем зарядных устройств генераторов импульсных токов [11] с микропроцессорным управлением [12]. Разработанный с этой целью генератор позволяет достичь максимальной по условиям релаксации среды и восстановления электрической прочности разрядного про-

межутка частоты следования импульсов 200 Гц и предназначен для последующего промышленного применения. Упрощенная схема зарядного устройства генератора импульсных токов, обеспечивающего частотный режим работы, представлена на рис. 4.

В такой схеме конденсатор $C4$ через значительную индуктивность $L2$, индуктивность $L4$ и трансформатор $T3$ заряжается до удвоенного значения выпрямленного напряжения. Коммутация тиристора $VD8$ сигналами управления, поступающими с выводов $RB4$, $RB5$ микроконтроллера через двухтактный усилитель на транзисторах $VT1$, $VT2$, приводит к разряду конденсатора $C4$ через первичную обмотку трансформатора $T3$. При этом высоковольтным импульсом на вторичной обмотке трансформатора через высоковольтный диодный столб $VD11$ выполняется зарядка конденсаторов $C5$ – $C8$ емкостного накопителя. При достижении заданного напряжения зарядки конденсаторов $C5$ – $C8$ сигнал с компаратора $LM311$ через диодно-транзисторный оптрон поступает на вход RBO микроконтроллера и свидетельствует об окончании зарядного процесса. Сигналы с выходов $RB2$, $RB3$ микроконтроллера через второй двухтактный усилитель на транзисторах $VT3$, $VT4$ открывают тиристор $VD10$, который закорачивает первичную обмотку трансформатора $T3$. Цепочка $VD9$ с насыщающимся дросселем $L3$ способствует быстрому восстановлению тиристора $VD8$, подготавливая его к работе в следующем зарядно-разрядном цикле.

Технологию дополняет разработанная методика разделения, очистки и обогащения производимых УНМ, которые находятся в виде растворимой и нерастворимой частей в обработанной органической жидкости. Оригинальная последовательность операций, представленная на рис. 3, содержит этап разделения аморфных углеродных материалов на разные аллотропные формы углерода или композиты методами центрифугирования, магнитного разделения, фильтрации и высоковольтного электрофореза, а также этап дальнейшей очистки и обогащения полученных УНМ химическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кускова Н.И., Ющишина А.Н., Малюшевская А.П., Петриченко Л.А., Смалько А.А. Получение углеродных наноматериалов в процессе электроразрядной обработки органических жидкостей. *Электронная обработка материалов*. 2010, (2), 72–76.
2. Бакларь В.Ю., Кускова Н.И., Ющишина А.Н. Электроразрядная обработка спиртов с целью получения углеродных наноматериалов. *Электронная обработка материалов*. 2009, (6), 80–85.

3. Бакларь В.Ю., Кускова Н.И., Тихонович В.В., Грипачевский А.Н. Трибологические свойства наноуглерода, полученного электроразрядным методом. *Электронная обработка материалов*. 2009, (4), 30–37.
4. Кускова Н.И., Богуславский Л.З., Смалько А.А., Зубенко А.А. Получение наноуглерода методом электроразрядной обработки органических жидкостей. *Электронная обработка материалов*. 2007, (4), 46–52.
5. Кускова Н.И., Рудь А.Д., Бакларь В.Ю., Иващук Л.И. Физические аспекты формирования различных аллотропных форм наноразмерного углерода в процессе электровзрыва. *Журнал технической физики*. 2010, **80**(9), 57–62.
6. Кускова Н.И. Фазовые превращения углерода в процессе нагрева мощным импульсом тока. *Письма в журнал технической физики*. 2005, **31**(17), 28–34.
7. Шульга Ю.М., Мартыненко В.М., Богуславский Л.З., Кускова Н.И., Мурадян В.Е и др. О составе и свойствах продуктов электроразрядной деструкции керосина. *Альтернативная энергетика и экология*. 2008, **32**(7), 131–136.
8. Rud A.D., Lachnik A.M., Ivanchenko V.G., Uvarov V.N., Shkola A.A., Dechtyarenko V.A., Ivashchuk L.I., Kuskova N.I. Hydrogen Storage of the Mg-C Composites. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008, **33**, 1310–1316.
9. Комаров А.И. Комарова В.И., Рудь А.Д., Кускова Н.И. Интенсификация микроплазменных разрядов при формировании керамических покрытий на сплавах алюминия под воздействием углеродных наночастиц. *Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: I Международная научная конференция, Николаев, 17–21 авг. 2009 г.: тезисы докладов*. Николаев: КП "Николаевская обл. типография". 2009, 77–79.
10. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. *Наноструктурные материалы*. М.: Академия, 2005. 190 с.
11. Гордеев П.Г., Калинов А.А., Поляков Н.П., Румянцев В.Э. и др. Источник питания мощностью 15 кВт с регулируемым и стабилизируемым напря-

жением для импульсно-периодических газовых лазеров. *Приборы и техника эксперимента*. 1990, (1), 188–190.

12. Щерба А.А., Дубовенко К.В. *Высоковольтные электроразрядные компактные системы*. Киев: Наукова думка, 2008. 270 с.

Поступила 21.03.12

Summary

A continuous and nonwaste process is proposed, which consists of a set of simultaneous operations on electrical discharge treatment of the carbon liquid in the reactors. The liquid is exposed to high temperatures and pressures generated by the discharge plasma, selection and separation of the processed substance in the filter or centrifugal separation device. Then follows recirculation of the purified material in the closed hydraulic system. The manufactured product, depending on the method used for selection and separation, is a thick, pasty mass, or a dry powder mixture containing various modifications of carbon fullerenes, nanotubes and nanodiamonds in the amount of up to 10% of the total weight. The prototype of the electrical equipment has been built to provide the processing performance from 0.02 to 1.5 kg/hour. It has the maximum installed power of 5 kWA, and its specific energy consumption ranges from 0.1 to 10 MJ/ kg. The pulsed power source with microprocessor control has been designed for industrial applications. It allows achieving the maximum pulse repetition rate value of 200 Hz, which is limited by the time of the medium relaxation and dielectric strength restoration in the discharge gap. This ensures flexible regulation and a shift in the corresponding processing performance of the single-reactor systems in the range from 0.4 to 30 kg/hour. This technology is complemented with the developed method for enrichment of the produced ultrafine powder. It consists in the original sequence of physical and chemical methods (magnetic separation, acid treatment, chromatographic purification, etc.) and can increase the target selectivity of the processed products.

Keywords: electrical discharge technology and equipment, carbon nanomaterials.