

http://dx.doi.org/10.15589/jnn20150109

УДК 537.52

Ч-39

## POSSIBLE PROCESSES OF ELECTRIC DISCHARGE SYNTHESIS OF CARBON NANOMATERIALS OF VARIOUS ELECTRICAL CONDUCTIVITY

## ВОЗМОЖНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Dmytro I. Chelpanov

[chelpanoffdimitri@yahoo.com](mailto:chelpanoffdimitri@yahoo.com)

ORCID: 0000-0001-9766-4185

Natalia I. Kuskova

[natalikuskova@mail.ru](mailto:natalikuskova@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-0857-1647

Д. И. Челпанов,

инж.<sup>1</sup>;

Н. И. Кускова,

д-р техн. наук, проф.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Pulse Processes and Technologies of the NAS of Ukraine, Mykolaiv

<sup>2</sup>Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

<sup>1</sup>Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

<sup>2</sup>Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

**Abstract.** The results of experimental studies of the electrical conductivity of carbon nanomaterials (CNM) powders have been provided. The plasma and chemical reactions of the electric discharge treatment (EDT) of hydrocarbon liquids are considered. The aim of the studies is to explain possible processes that lead to the formation of various CNM and associate the results of the electrical conductivity measurement with the quantity of the  $sp^2$ -hybridised atoms in the obtained CNM. The alterations in the electrical conductivity of CNM powders obtained in the EDT are experimentally studied. The results of chromatography and the refraction coefficient values of the selected hydrocarbon liquids are analyzed. Possible chemical reactions of the EDT of the hydrocarbon liquids are suggested. The range of the electrical conductivity of the obtained CNM powders is measured (from  $8 \cdot 10^{-3}$  to  $2 \cdot 10^2$  cm/m). The dependence of the electrical conductivity of the powders on their carbon source and compacting degree is shown. The obtained results should be considered for the implementation of the tailor-made CNM synthesis. The stated regularities allow determining the type of the obtained nanostructures and the quantities of the carbon atoms in the  $sp^2$ -hybridised state in them without using complex studies of the synthesized CNM.

**Keywords:** electric discharge synthesis; carbon nanomaterials; electrical conductivity; hybridization degree; CNM formation processes.

**Аннотация.** Предложено объяснение возможных процессов, приводящих к формированию различных углеродных наноматериалов (УНМ). Проведены экспериментальные исследования изменения удельной электропроводности порошков УНМ, полученных в результате электроразрядной обработки различных органических жидкостей; построена аппроксимационная зависимость удельной электрической проводимости от количества атомов углерода в  $sp^2$ -гибридизованном состоянии.

**Ключевые слова:** электроразрядный синтез; углеродные наноматериалы; удельная электрическая проводимость; степень гибридизации; процессы формирования углеродных наноматериалов.

**Анотація.** Запропоновано пояснення можливих процесів, які зумовлюють формування різноманітних вуглецевих наноматеріалів (ВНМ). Проведено експериментальні дослідження зміни питомої електропровідності порошків ВНМ, отриманих у результаті електророзрядної обробки різноманітних органічних рідин; побудовано апроксимаційну залежність питомої електричної провідності від кількості атомів вуглецю в  $sp^2$ -гібридизованому стані.

**Ключові слова:** електророзрядний синтез; вуглецеві наноматеріали; питома електрична провідність; ступінь гібридизації; процеси формування вуглецевих наноматеріалів.

### REFERENCES

- [1] Afanasev D.V., Baranov G.A., Belyaev A.A. Poluchenie fullerenov pri isparenii grafita statsionarnym  $CO_{2+}$  lazerom [Obtaining fullerenes when vaporizing graphite with a stationary  $CO_{2+}$  laser]. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki* [Technical Physics Letters], 2001, vol. 27, issue 10, pp. 31–36.

- [2] Dolmatov V.Yu., Myullyumyaki V., Vekhanen A. Vozmozhnyy mekhanizm obrazovaniya nanoalmazov pri detonatsionnom sinteze [Possible mechanism of the nanodiamond formation in the detonation synthesis]. *Sverkhverdye materialy* [Ultrahard materials], 2013, issue 3, pp. 19–27.
- [3] Yeletskiy A.V., Smirnov B.M. Fullereny i struktury ugleroda [Fullerenes and carbon structures]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 1995, issue 38, pp. 935–964.
- [4] Kuskova N.I., Petrichenko S.V., Tsolin P.L., Baklar V.Yu. Zavisimost vykhoda uglerodnykh nanomaterialov ot stroeniya molekul organicheskikh zhidkostey v protsesse elektrorazryadnoy obrabotki [Dependence of the output of carbon nanomaterials on the molecular structure of organic liquids in the process of electric discharge treatment]. *EOM* [EMT], 2013, vol. 49, no. 1, pp. 14–19.
- [5] Bulgakov A.V., Bulgakova N.M., Burakov I.M. et al. *Sintez nanorazmernykh materialov pri vozdeystvii moshchnykh potokov energii na veshchestvo* [Synthesis of nanosized materials under the influence of the copious energy fluxes on the substance]. Novosibirsk, Institut teplofiziki SO RAN Publ., 2009. 462 p.
- [6] Kuskova N.I., Dubovenko K.V., Petrichenko S.V., Tsolin P.L., Chaban S.O. Elektrorazryadnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya polucheniya novykh uglerodnykh nanomaterialov [Electric discharge technology and equipment of obtaining new carbon nanomaterials]. *EOM* [EMT], 2013, vol. 49, no. 3, pp. 35–42.
- [7] Guozhong Cao *Nanostructures & Nanomaterials: Synthesis, Properties & Applications*. London: Imperial College Press, 2004.
- [8] Rud A.D., Kuskova N.I., Ivaschuk L.I., Zelinskaya G.M., Biliy N.M. Structural State of carbon nanomaterials Produced by High-Energy Electric Discharge Techniques. *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*, 2011, pp. 120–126.
- [9] Shenderova O. A., Zhirnov V.V., Brenner D.W. Carbon nanostructures. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2002, vol. 27, no. 3/4, pp. 227–356.
- [10] Robertson J. Diamond-like carbon. *Materials Science and Engineering. Reports*, 2002, vol. 37, no. 4–6, pp. 129–281.
- [11] Rud A.D., Kuskova N.I., Ivaschuk L.I., Boguslavskii L.Z., Perekos A.E. Synthesis of Carbon Nanomaterials Using High-Voltage Electric Discharge Techniques. *Nanomaterials*, 2011, pp. 211–230.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Уникальные электрические, прочностные, оптические и магнитные свойства таких углеродных наноматериалов (УНМ), как фуллерены, наноалмазы, фуллереноподобные (или луковичные onion-like) наноструктуры углерода, углеродные нанотрубки (УНТ), углеродные нановолокна (УНВ) и углеродные пленки, позволяют использовать их для решения различных задач промышленности. Основные области применения УНМ – электроника, медицина, химическая фармацевтика и биология. В последние годы предсказаны и синтезированы новые наноформы углерода и так называемые углерод-углеродные наноконкомпозиты, которые имеют собственные атомные структуры, размеры и морфологии, а также проявляют огромное разнообразие физико-химических свойств [1, 3, 5, 7–9].

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Теория процессов, приводящих к образованию различных наноаллотропов углерода, в настоящее время все еще носит дискуссионный характер – единой общепринятой теории не существует. При рассмотрении перспектив использования различных УНМ крайне важным становится вопрос о выборе метода их получения. Можно выделить основные

требования, предъявляемые к методу: относительно низкая стоимость получаемых УНМ, эффективность переработки сырья, управляемость процессом синтеза УНМ. Всем этим критериям соответствуют электро-разрядные методы, основанные на синтезе углеродных наноструктур из углеродсодержащей плазмы. При этом конечные свойства УНМ во многом определяются плазмохимическими и термодинамическими процессами, протекающими в процессе их синтеза. Благодаря возможности создания экстремальных условий, в первую очередь по температуре и давлению, разрядно-импульсная обработка органических жидкостей приводит к деструкции и разложению молекул сырья с последующим образованием различных видов углеродных наноматериалов и смеси газов (водорода и низших углеводородов). Возможность получения различных видов УНМ объясняется использованием органических жидкостей, отличающихся степенью гибридизации атомов углерода в молекуле и строением молекулы, а также изменением режимов энерговода [4, 6, 10, 11].

На данный момент не существует единого достоверного метода, позволяющего с желаемой точностью определить степени гибридизации атомов углерода в получаемых УНМ, а те косвенные методы, которые применяются, не позволяют определять количество  $sp^2$ - и  $sp^3$ -гибридизированных атомов углерода в УНМ.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – объяснить возможные процессы, приводящие к формированию различных УНМ, и связать результаты измерения электрической проводимости с долей  $sp^2$ -гибридизированных атомов в получаемых УНМ.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

*Методы измерения электрического сопротивления.* Для исследования электропроводности порошков получаемых УНМ было необходимо выбрать способ измерения электрического сопротивления.

Основными из различных проанализированных методов сопротивления постоянному току являются непрямой метод и метод непосредственной оценки, которые, в свою очередь, используют различные способы измерения. Выбор способа зависит от ожидаемого значения измеряемого сопротивления и необходимой точности (таким образом, было решено отказаться от непрямого метода).

Метод непосредственной оценки предусматривает измерение сопротивления постоянному току с помощью соответствующих измерительных приборов.

Способ измерения при помощи омметра дает существенные неточности. Поэтому его используют для приближенных предварительных измерений сопротивлений и для проверки цепей коммутации.

Способ амперметра-вольтметра основан на измерении тока, протекающего через измеряемое сопротивление, и падения напряжения на нем. Различают два варианта измерения этим способом: двух- и четырехконтактный. Двухконтактный способ представляет собой стандартную схему измерения сопротивления, при которой к образцу по двум проводам подводят ток и с их же помощью снимают падение напряжения на образце, что приводит к появлению погрешностей, связанных с собственным сопротивлением проводников. Дополнительным источником ошибок при измерении удельного сопротивления полупроводников являются переходные сопротивления на контактах металл – полупроводник и возникающая в них термоЭДС. Эти проблемы частично решаются применением четырехконтактной схемы подключения, которая позволяет исключить влияние переходных сопротивлений, однако это достигается значительным усложнением схемы измерения.

Мостовой способ использует две схемы измерения – схему одинарного моста и схему двойного моста. В одинарных мостах результат измерения учитывает сопротивление соединительных проводов между мостом и измеряемым сопротивлением. Поэтому сопротивление менее 1 Ом такими мостами измерить нельзя из-за существенных погрешностей. В двойных мостах сопротивление соединительных проводов при измерениях не учитывается, что дает возможность измерения сопротивления до  $10^{-6}$  Ом.

Измерение сопротивления постоянному току независимо от метода проводят при установившемся тепловом режиме, при котором температура окружа-

ющей среды отличается от температуры измеряемого объекта не более чем на  $\pm 3$  °С.

Для измерения сопротивления порошков полученных углеродных наноматериалов был выбран способ двойного моста, который

- позволяет проводить оценку в большем диапазоне измерений, чем при использовании одинарного моста;
- позволяет избежать контактной разницы потенциалов, которая имеет место в двухконтактном способе;
- более простой в реализации и позволяет исключить большую часть случайных и систематических погрешностей четырехконтактного способа;
- на несколько порядков более точен, чем способ непосредственной оценки омметром.

*Методика и результаты исследования электропроводности порошков УНМ.* Электропроводность порошковых материалов зависит от электрического контакта между частицами. При их сближении и соприкосновении изменяются свойства и площадь контактов, что оказывает сильное влияние на электропроводность порошкового материала. Для сферических частиц при низкой насыпной плотности и слабом взаимодействии большая часть материала сфер не включена в проводящие пути. При сжатии число контактов возрастает, увеличивается их площадь и растет электропроводность.

Для обеспечения одинаковых условий измерения электропроводности и при необходимости сравнения результатов для разных составов образцов измерялась зависимость электропроводности от плотности порошкового материала в цилиндре под поршнем в процессе сжатия (рис. 1). Это позволяло найти минимальное значение плотности материала, при котором образуются достаточно хорошие контакты, обеспечивающие электрическую проводимость образца.

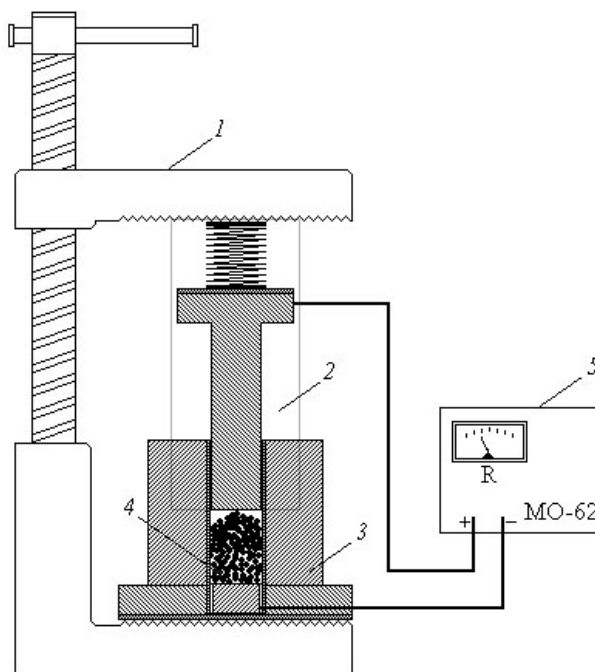


Рис. 1. Стенд для проведения измерения электрического сопротивления порошков УНМ

Полученный в результате электроразрядной обработки порошок УНМ предварительно проходил очистку от примесей с применением промывки органическими растворителями (этилацетатом, ацетоном), выпаривания и фильтрования. Затем порошки взвешивали на электронных весах и засыпали в загрузочный контейнер 3, который закрывали пружинно-поршневой системой 2. Далее постепенно проводили сжатие образца при помощи пресса 1 при изменении давления до  $10^7$  Па и постоянной температуре, с параллельным измерением высоты пружины и расстояния между обкладками пресса. При сжатии происходило замыкание цепи между электродами, в роли которых выступали поршень и днище загрузочного контейнера, подключенные к мосту (МО-62) 5. Измеряемое сопротивление скачком убывало вследствие увеличения общей площади контактов между соседними углеродными частичками УНМ.

Для повышения точности измерение электрического сопротивления выполняли путем изменения

давления с равномерным шагом при соблюдении постоянного общего количества точек.

Плотность порошка УНМ  $\rho$  в зависимости от степени компактирования и удельная электропроводность исследуемых порошков УНМ  $\sigma$  были определены по результатам измерения по соответствующим формулам:

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса засыпанного порошка;  $d$  – диаметр столбика засыпанного порошка;  $h$  – высота столбика засыпанного порошка;

$$\sigma = \frac{4h}{R\pi d^2}, \quad (2)$$

где  $R$  – сопротивление столбика засыпанного порошка.

Результаты измерения зависимости электропроводности от плотности компактирования показаны на рис. 2–6.

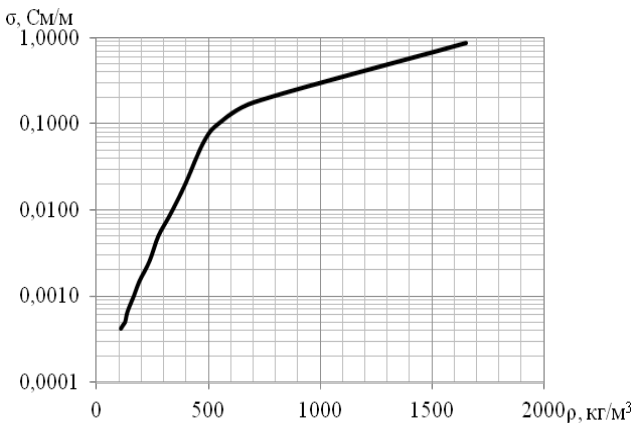


Рис. 2. Зависимость удельной электропроводности  $sp^2/sp^3$ -нанокомпозитных пленок, полученных в результате пиролиза смеси газов – алканов, от плотности

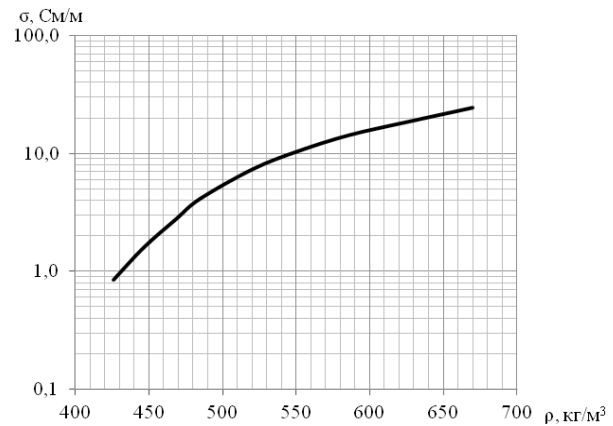


Рис. 3. Зависимость удельной электропроводности нанокомпозитного аморфного углерода, полученного в результате ЭРО циклогексана, от плотности

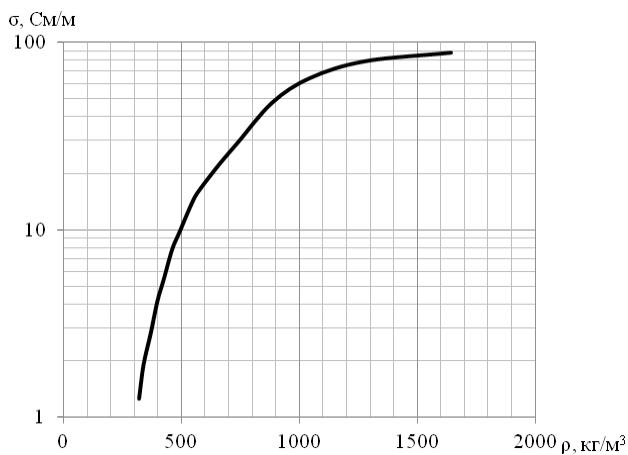


Рис. 4. Зависимость удельной электропроводности графитоподобного аморфного углерода, полученного в результате ЭРО керосина, от плотности

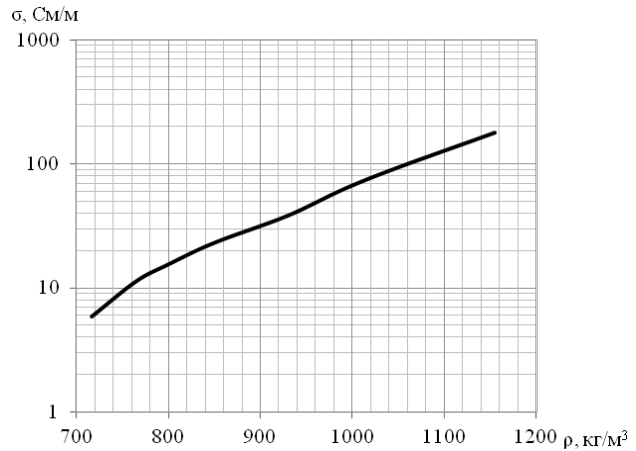


Рис. 5. Зависимость удельной электропроводности углеродных нанотрубок и углеродных нановолокон, полученных в результате пиролиза смеси газов – алкенов, от плотности

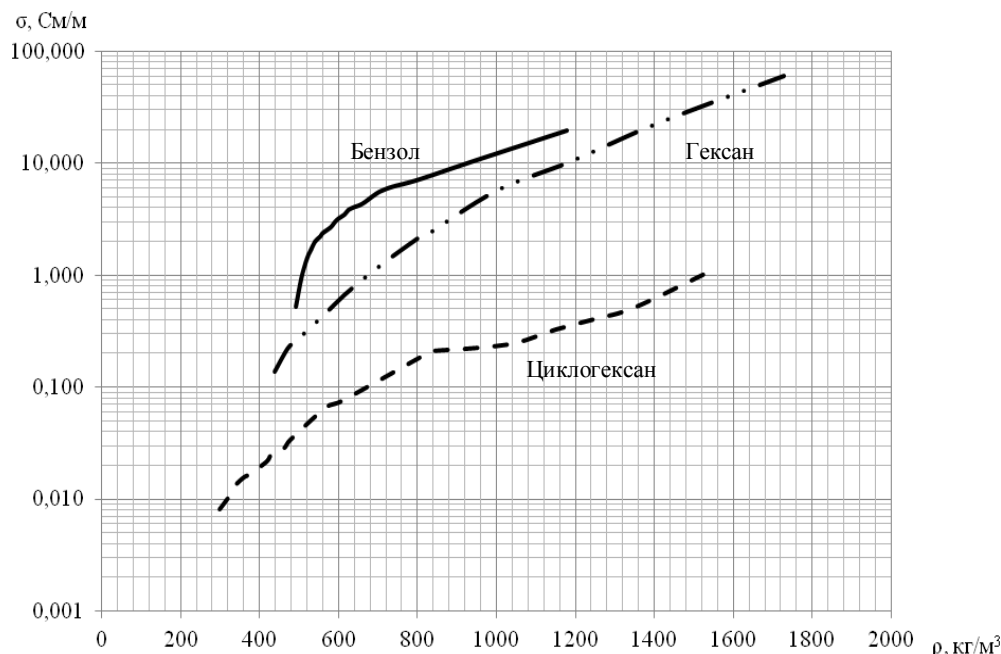


Рис. 6. Зависимость удельной электропроводности порошков, полученных в результате ЭРО бензола, гексана и циклогексана, от плотности

Погрешность измерения зависимости удельной электропроводности порошков УНМ от плотности лежит в пределах 10 %.

Влияние источника углерода, типа УНМ при плотности компактирования на электрофизи-

ческие свойства полученных порошков приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, изменение электропроводности полученных наноматериалов связано со степенью гибридизации атомов углерода.

Таблица 1. Влияние источника углерода на электропроводность порошков УНМ при плотности компактирования  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$

Источник углерода	Тип получаемого УНМ	Электропроводность $\sigma$ , См/м
Взрывчатые вещества ( $sp^3$ )	Наноалмаз (ядро $sp^3$ и оболочка $sp^2$ )	$10^{-5}$
Циклогексан ( $sp^3$ )	Углерод луковичной структуры ( $sp^2/sp^3$ )	0,04
Смесь газов – алканов ( $sp^3$ )	Пленки ( $sp^2/sp^3$ -наноккомпозит)	0,08
Гексан ( $sp^3$ )	Наноккомпозитный аморфный углерод ( $sp^2/sp^3$ )	0,2
Бензол ( $sp^2$ )	Фуллереноподобный углерод ( $sp^2/sp^3$ )	0,4
Циклогексанон ( $sp^3$ )	Наноккомпозитный аморфный углерод ( $sp^2/sp^3$ )	5
Керосин ( $sp^2/sp^3$ )	Графитоподобный аморфный углерод ( $sp^2/sp^3$ )	10
Смесь газов – алкенов ( $sp^2$ )	Углеродные нанотрубки и нановолокна ( $sp^2$ )	30
Графит ( $sp^2$ )	Нанографит ( $sp^2$ )	100

Разнообразие полученных УНМ и, соответственно, широкий спектр величин их электропроводности позволили построить аппроксимационную зависимость удельной электрической проводимости от количества атомов углерода в  $sp^2$ -гибридизованном состоянии (рис. 7).

Возможные механизмы синтеза УНМ. Для объяснения возможных плазмохимических реакций, приводящих к синтезу различных УНМ, были про-

анализированы хроматограммы образцов бензола и гексана после электроразрядной обработки и фильтрации (удаления твердых нерастворимых УНМ) (рис. 8).

Наличие промежуточных соединений в процессах электроразрядной обработки подтверждается как данными газовой хроматографии обработанных жидкостей, так и результатами измерений их коэффициентов преломления (табл. 2).



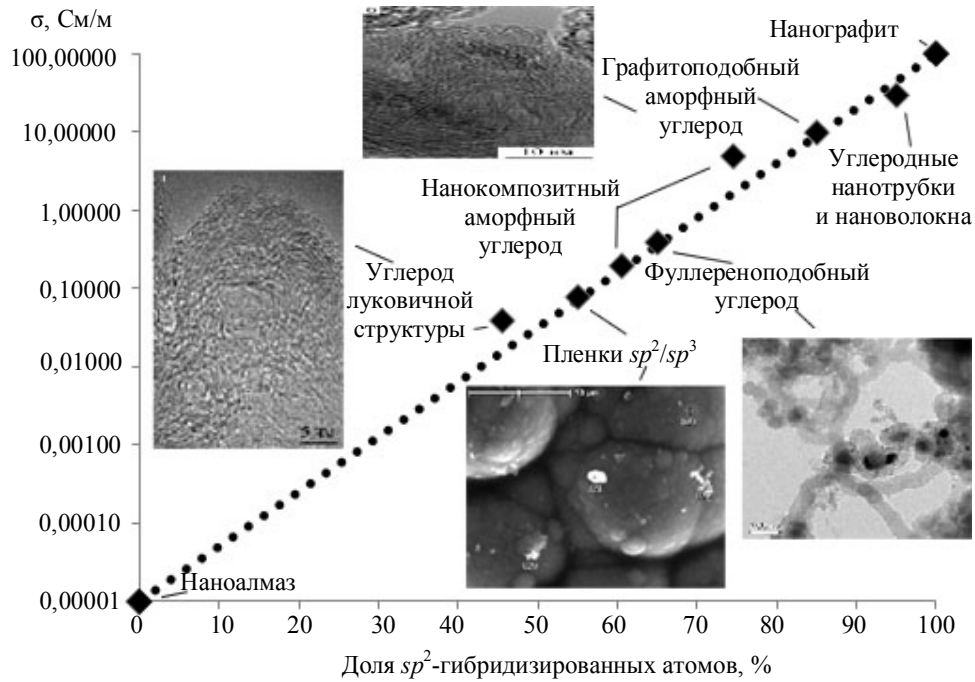


Рис. 7. Аппроксимационная зависимость удельной электрической проводимости от количества атомов углерода в  $sp^2$ -гибридизованном состоянии

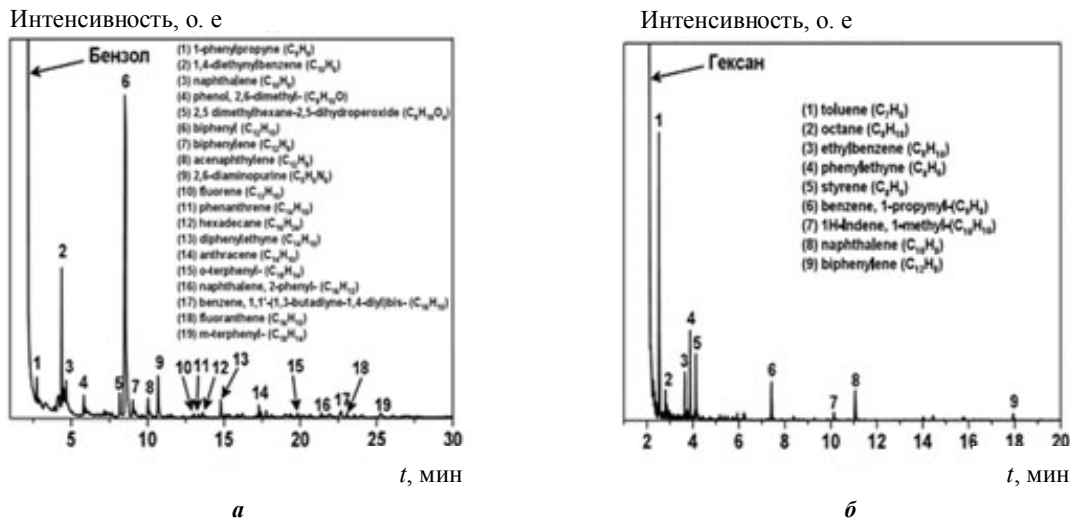


Рис. 8. Хроматограммы образцов жидкого бензола (а) и гексана (б) после электроразрядной обработки

Таблица 2. Сравнительный анализ коэффициентов преломления жидких углеводородов до и после ЭРО, возможных процессов и выхода УНМ

Сырье	$n_D$		Возможный процесс образования УНМ	Выход УНМ из жидкости, %
	до ЭРО	после ЭРО		
Гексан	1,3832	1,3841	Деструкция, дегидрирование + полимеризация	12,2
Циклогексан	1,4261	1,4296	Деструкция, дегидрирование + полимеризация	14,4
Бензол	1,5008	1,5037	Деструкция, дегидрирование + полимеризация	12,6

Из приведенных хроматограмм (см. рис. 8) видно, что промежуточные продукты ЭРО ароматического (бензол) и алифатического (гексан) углеводородов содержат различные как жидкие, так и растворенные твердые вещества. По степени уменьшения концентрации их можно расположить в следующие ряды:

– бензол ( $C_6H_6 - sp^2$ ) → дифенил ( $C_{12}H_{10} - sp^2$ ) → 1,4-диэтинилбензол ( $C_{10}H_6 - sp^2/sp$ ) → нафталин ( $C_{10}H_8 - sp^2$ ) → флуорен ( $C_{12}H_{10} - sp^2$ ) → антрацен ( $C_{14}H_{10} - sp^2$ );

– гексан ( $C_6H_{14} - sp^3$ ) → толуол ( $C_7H_8 - sp^2$ ) → фенилацетилен ( $C_8H_6 - sp^2/sp$ ) → стирол ( $C_8H_8 - sp^2$ ) →

этилбензол ( $C_8H_{10} - sp^2$ ) → бензол ( $C_6H_6 - sp^2$ ) → нафталин ( $C_{10}H_8 - sp^2$ ).

Характер промежуточных продуктов плазмохимических реакций свидетельствует в пользу того, что при разрядно-импульсной обработке бензола происходят в основном процессы дегидрирования с последующей полимеризацией ароматических колец, что объясняет, например, высокую концентрацию растворенного в обработанной жидкости дифенила.

При обработке гексана спектр возможных реакций более широкий – деструкция с разрывом связей C-C и образованием низкомолекулярных радикалов, ассоциация радикалов с образованием ароматических соединений (например, толуола, фенилэтана, стирола). Таким образом, ЭРО алканов ( $sp^3$ -гибридизация атомов углерода) приводит к образованию и полимеризации аренов ( $sp^2$ -гибридизация атомов углерода).

Последующее укрупнение полициклических структур в плазмохимических реакциях протекает лавинообразно с участием низкомолекулярных ациклических углеводородов (ацетилен и др.) до образования сетки «бензольного» или «инденевого паркета», являющихся основой графито- или фуллереноподобных наноматериалов.

В обработанном циклогексане увеличение коэффициента преломления обусловлено процессами дегидрирования и образования ароматических структур. Однако часть  $\sigma$ -связей C-C в алканах и циклоалканах вследствие более высокой энергии разрыва по сравнению с энергией разрыва  $\pi$ -связей в аренах может сохраниться в процессе ЭРО, что приведет к образованию  $sp^2/sp^3$ -наноконструкций. В зависимости от соотношения  $sp^2$ - и  $sp^3$ -гибридизированных атомов углерода УНМ может быть алмазо- или графитоподобным.

Одним из возможных механизмов образования зародышей алмазоподобных структур является синтез множественного радикала адмантана  $C_{10}H_{10}$ , который происходит путем присоединения димерных углеродных осколков  $C_2$  к дегидрированной молекуле циклогексана. Аналогичная стадия присутствует и при образовании наноалмаза в процессе взрыва смеси взрывчатых веществ (тринитротолуола, тротила, бензотрифуроксана) [2]. Рост алмазоподобных

наноструктур происходит в результате плазмохимических реакций образования углеводородных радикалов и их присоединения к дегидрированным атомам углерода на поверхности наночастиц.

Таким образом, разрядно-импульсная обработка углеводородных жидкостей приводит к каскаду химических превращений, которые включают в себя процессы деструкции (разрыва связей C-C), дегидрирования (разрыва связей C-H), полимеризации (образования новых связей C-C). Качественный и количественный состав всех продуктов ЭРО (газообразных, нерастворимых твердых УНМ и растворенных в исходной жидкости веществ) может варьироваться в широком диапазоне и в значительной степени зависит от используемой органической жидкости.

Полученные результаты следует учитывать для осуществления целенаправленного синтеза УНМ.

## ВЫВОДЫ

1. Электроразрядная обработка углеводородных жидкостей приводит к каскаду химических превращений, которые включают в себя процессы деструкции (разрыва связей C-C), дегидрогенизации (разрыва связей C-H), полимеризации (образования новых связей C-C). Качественный и количественный состав всех продуктов ЭРО может варьироваться в широком диапазоне и в значительной степени зависит от обрабатываемой органической жидкости.

2. Измеренная удельная электропроводность порошков УНМ, полученных в результате электроразрядной обработки различных органических жидкостей, находится в пределах от  $8 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^2$  См/м и зависит от их источника углерода и степени компактирования. Разные величины электропроводности и плотности УНМ обусловлены разными соотношениями в порошках УНМ атомов углерода в  $sp^2$ - и  $sp^3$ -гибридизированных состояниях.

3. Использование предложенной аппроксимационной зависимости позволяет с допустимой точностью определять тип получаемых наноструктур и долю атомов в  $sp^2$ -гибридизированном состоянии в них, не прибегая к сложным исследованиям синтезированных УНМ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Афанасьев, Д. В.** Получение фуллеренов при испарении графита стационарным  $CO_2$  лазером [Текст] / Д. В. Афанасьев, Г. А. Баранов, А. А. Беляев // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, вып. 10. – С. 31–36.
- [2] **Долматов, В. Ю.** Возможный механизм образования наноалмаза при детонационном синтезе [Текст] / В. Ю. Долматов, В. Мюлльмяки, А. Веханен // Сверхтвердые материалы. – 2013. – Вып. 3. – С. 19–27.
- [3] **Елецкий, А. В.** Фуллерены и структуры углерода [Текст] / А. В. Елецкий, Б. М. Смирнов // Успехи физических наук. – 1995. – Вып. 38. – С. 935–964.
- [4] Зависимость выхода углеродных наноматериалов от строения молекул органических жидкостей в процессе электроразрядной обработки [Текст] / Н. И. Кускова, С. В. Петриченко, П. Л. Цолин, В. Ю. Бакларь // ЭОМ. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 14–19.

- [5] Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество [Текст] / А. В. Булгаков, Н. М. Булгакова, И. М. Бураков [и др.]. – Новосибирск : Институт теплофизики СО РАН, 2009. – 462 с.
- [6] Электроразрядная технология и оборудование для получения новых углеродных наноматериалов [Текст] / Н. И. Кускова, К. В. Дубовенко, С. В. Петриченко [и др.] // ЭОМ. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 35–42.
- [7] **Guozhong, Cao.** Nanostructures & Nanomaterials: Synthesis, Properties & Applications [Text] / Cao Guozhong. – London : Imperial College Press, 2004.
- [8] **Robertson, J.** Diamond-like carbon. Materials Science and Engineering [Text] / J. Robertson. – R: Reports. – 2002. – Vol. 37, nr 4–6. – P. 129–281.
- [9] **Shenderova, O. A.** Carbon nanostructures [Text] / O. A. Shenderova, V. V. Zhirmov & D. W. Brenner // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2002. – Vol. 27, nr 3/4. – P. 227–356.
- [10] Structural State of carbon nanomaterials Produced by High-Energy Electric Discharge Techniques [Text] / A. D. Rud, N. I. Kuskova, L. I. Ivaschuk [et al] // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2011. – P. 120–126.
- [11] Synthesis of Carbon Nanomaterials Using High-Voltage Electric Discharge Techniques [Text] / A. D. Rud, N. I. Kuskova, L. I. Ivaschuk [et al] // Nanomaterials. – InTech, 2011. – P. 211–230.

---

© Д. І. Челпанов, Н. І. Кускова  
 Надійшла до редколегії 06.11.2014  
 Статтю рекомендує до друку  
 д-р техн. наук, проф. *О. І. Вовченко*