

Керимбеков Д.С.^{1,*} , Аханова Н.Е.² , Габдуллин М.Т.² , Абдуллин Х.А.¹ ,
Батрышев Д.Г.¹ , Золотаренко А.Д.³ , Гаврылюк Н.А.⁴ ,
Золотаренко Ол.Д.⁴ , Щур Д.В.³ 

¹Национальная нанотехнологическая лаборатория, КазНУ им. аль-Фараби,
Казахстан, г. Алматы

²Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы

³Институт проблем материаловедения имени И.Н. Францевича, Украина, г. Киев

⁴Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН, Украина, г. Киев

*e-mail: daurenks@bk.ru

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ФУЛЛЕРЕНОВ И ИХ ПРОИЗВОДНЫХ

Аннотация. Открытие новой формы углерода стало большим научным прорывом 20 века. Углерод – один из самых распространенных элементов нашей планеты. Молекула, состоящая из 60 атомов углерода, была названа фуллереном. Фуллерен C₆₀ – это молекула, состоящая из 20 шестиугольных и 12 пятиугольных циклов, в вершинах которых находятся атомы углерода, и обладающая высокой симметрией. Радиус фуллерена C₆₀ равен 0,3512 нм, длина короткой связи, разделяющей шестиугольники, равна 0,1391 нм, а длина длинной связи, общей для шести- и пятиугольников, – 0,1455 нм. Исследования проводились в ННЛОТ при КазНУ им. аль-Фараби, где одним из основных научных направлений исследований является создание новых видов материалов на основе углеродных наноструктур, в частности фуллеренов, а также их применение. Была создана и разработана методика по синтезу фуллеренов для их практического применения в различных отраслях. Была запущена установка по производству фуллеренов на основе метода электродугового испарения графита в среде гелия. Были изучены особенности синтеза фуллеренов и их производных разработанным методом. Проведена отработка технологии получения фуллеренов в электродуговом разряде при различных значениях тока (А). Получены и проанализированы образцы фуллеренов при различных силах тока (110А, 135А, 160А, 180А, 200А). Полученные образцы исследованы как Рамановской спектроскопией, так и электронной и оптической микроскопией.

Ключевые слова: фуллерен, фуллериты, электродуговой синтез, нанотехнология, углеродные наноструктуры, эндофуллерены, нанокompозиты, плазма, нанотрубки, экстракция, депозит, сажа, плазма.

D.S. Kerimbekov^{1,*}, N.E. Akhanova², M.T. Gabdullin², Kh.A. Abdullin¹,
D.G. Batryshev¹, A.D. Zolotareno³, N.A. Gavrylyuk⁴,
O.D. Zolotareno⁴, D.V. Shchur³

¹National nanotechnological laboratory, KazNU, Kazakhstan, Almaty

²Kazakh-British Technical University, Kazakhstan, Almaty

³Institute of Problems of Materials Science named after I.N. Frantsevich, Ukraine, Kyiv

⁴Institute of Surface Chemistry. A.A. Chuiko NAS, Ukraine, Kyiv

*e-mail: daurenks@bk.ru

Features of the synthesis of fullerenes and their derivatives

Abstract. The discovery of a new form of carbon was the great scientific breakthrough of the 20th century. Carbon is one of the most abundant elements on our planet. A molecule consisting of 60 carbon atoms was named a fullerene. Fullerene C₆₀ is a molecule consisting of 20 hexagonal and 12 pentagonal rings with carbon atoms at their vertices, and has a high symmetry. The radius of C₆₀ fullerene is 0.3512 nm, the length of the short bond separating the hexagons is 0.1391 nm, and the length of the long bond common to hexagons and pentagons is 0.1455 nm. The research was carried out at the NNLOT at KazNU. al-Farabi, where one of the main scientific areas of research is the creation of new types of materials based on carbon nanostructures, in particular fullerenes, as well as their application. A technique for the synthesis of fullerenes was created and developed for their practical application in various industries. A plant for the production of fullerenes based on the method of electric arc evaporation of graphite in a helium medium was launched. The features of the synthesis of fullerenes and their derivatives by the developed method were studied. The technology for obtaining fullerenes in an electric arc discharge at various current values (A) has been developed. Fullerene samples were obtained and analyzed at various current strengths (110A, 135A, 160A, 180A, 200A). The obtained samples were studied both by Raman spectroscopy and by electron and optical microscopy.

Key words: fullerene, fullerites, electric arc synthesis, nanotechnology, carbon nanostructures, endofullerenes, nanocomposites, plasma, nanotubes, extraction, deposit, soot, plasma.

Д.С. Керимбеков^{1,*}, Н.Е. Аханова², М.Т. Габдуллин.², Х.А. Абдуллин¹,
Д.Г. Батрышев¹, А.Д. Золотаренко³, Н.А Гаврылюк⁴,
Ол.Д. Золотаренко⁴, Д.В. Щур³

¹Ұлттық нанотехнологиялар зертханасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,

Қазақстан, Алматы қ.

²Қазақ-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

³И.Н. Францевич атындағы материалтану мәселелері институты, Украина, Киев қ.

⁴Беттік химия институты. А.А. Чуйко Ұлттық ғылым академиясы, Украина, Киев қ.

*e-mail: daurenks@bk.ru

Фуллерендер мен олардың туындылары синтезінің ерекшеліктері

Андатпа. Көміртектің жаңа түрінің ашылуы ХХ ғасырдағы үлкен ғылыми жетістік болды. Көміртек – планетамыздағы ең көп таралған элементтердің бірі. 60 көміртек атомынан тұратын молекула фуллерен деп аталды. Фуллерен C₆₀ – төбесінде көміртегі атомдары бар 20 алтыбұрышты және 12 бесбұрышты сақиналардан тұратын молекула және жоғары симметрияға ие. C₆₀ фуллереннің радиусы – 0,3512 нм, алтыбұрыштарды бөлетін қысқа байланыстың ұзындығы – 0,1391 нм, ал алтыбұрыштар мен бесбұрыштарға ортақ ұзын байланыстың ұзындығы – 0,1455 нм. Зерттеу әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы NNLOT-те жүргізілді, зерттеудің негізгі ғылыми бағыттарының бірі – көміртекті нанокұрылымдар, атап айтқанда, фуллерендер негізінде материалдардың жаңа түрлерін жасау, сондай-ақ оларды қолдану. Фуллерендер синтезінің әдістемесі құрылды және ол әртүрлі салаларда практикалық қолдану үшін әзірленді. Графитті гелий ортасында электр доғалық булану әдісі негізінде фуллерендер өндіретін зауыт іске қосылды. Жасалған әдіс бойынша фуллерендер мен олардың туындыларының синтезінің ерекшеліктері зерттелді. Әртүрлі ток мәндерінде (А) электр доғалық разрядта фуллерендер алу технологиясы іске асты. Фуллерен үлгілері әртүрлі ток күшінде (110А, 135А, 160А, 180А, 200А) алынған және талданған. Алынған үлгілер Раман спектроскопиясымен де, электронды және оптикалық микроскопиямен де зерттелді.

Түйін сөздер: фуллерен, фуллерит, электр доғасының синтезі, нанотехнология, көміртекті нанокұрылымдар, эндофуллерендер, нанокөмір, плазма, нанотүтіктер, экстракция, кен, күйе, плазма.

Введение

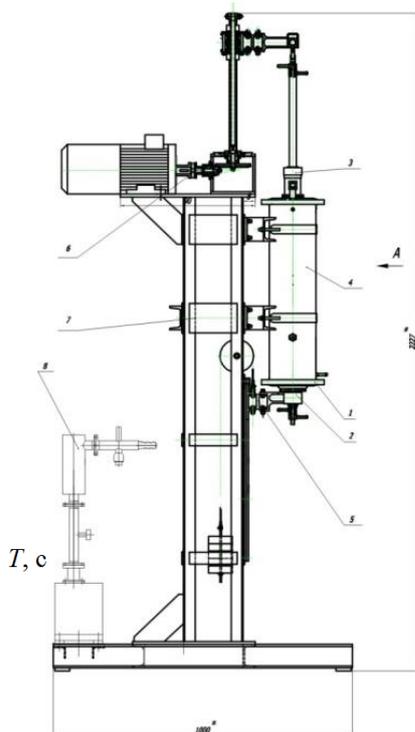
Исследования недавно открытой новой формы углерода, фуллеренов, интенсивно расширяются. Эта новая научная область возникла на основе фундаментальных исследований газо-фазных углеродных кластеров [1]. Исследование, в основном основанное на масс-спектрометрических экспериментах [2-5], дало решающее доказательство постулата о фуллереновых структурах [4]. Это привело к дальнейшим экспериментальным и теоретическим работам и, наконец, к открытию метода, с помощью которого можно синтезировать большие количества фуллеренов [6]. Дальнейшие исследования [7-15] были направлены на изучение физических [16-27], химических [28-36] свойств синтезируемых наноматериалов. Изучались композиты на основе синтезируемых наноструктур [37-39] и влияние добавок на их физико-химические свойства [40-44].

Цель данной работы заключается в изучении некоторых ключевых моментов исследований газо-фазных углеродных

кластеров, которые получают методом, открытым Huffman-Kratschmer [6], а также особенностей синтеза фуллеренов и их производных разработанным методом. Кроме того, в работе, с целью достижения наибольшего выхода фуллеренов, приводятся результаты исследований, полученные при отработке технологических режимов синтеза.

Эксперимент

Фуллерены синтезировали методом испарения графитового электрода в электродуговом разряде в газовой среде. Параллельно были изучены методы очистки, разделения и выделения растворимой составляющей из фуллеренсодержащей сажи. А также проведены анализы продуктов синтеза при разных режимах, растворимости фуллеренов в органических растворителях, а также перспективы дальнейшего использования этих материалов.



T, c



Рисунок 1 – Схема установки (слева) и фотография установки (справа), используемой для синтеза фуллеренов, а также фуллереноподобных продуктов

В реактор синтеза помещали графитовые стержни марки МПГ-7, которые крепились в верхней части (катод) и нижней части (испаряемый анод). Затем камера закрывалась, герметизировалась и откачивалась форвакуумным насосом до вакуума 0.5 торр. Корпус реактора и узлы анода, а также узлы катода оснащены элементами охлаждения с помощью проточной воды, что эффективно защищает указанные элементы от перегрева. После вакуумирования системы графитовые стержни сводились путем опускания катода. Через электроды при их сведении пропускали небольшой ток для разогрева и очистки электродов. После очистки

электродов и повторном вакуумировании в камеру синтеза напускали азот марки ОСЧ до давления 0.3 атмосферы. Затем электроды размыкались, и токовый генератор включали на заданный ток 75А. При этом напряжение на измерительной головке составляло около 75В. При постепенном сведении стержней добивались образования стабильного электродугового разряда. При образовании в реакторе синтеза электрической дуги напряжение падало до 25В и поддерживалось за счет постоянной подачи катодного штока. Только после всех выше перечисленных процедур устанавливали рабочий ток эксперимента (110А, 135А, 160А, 180А, 200А).

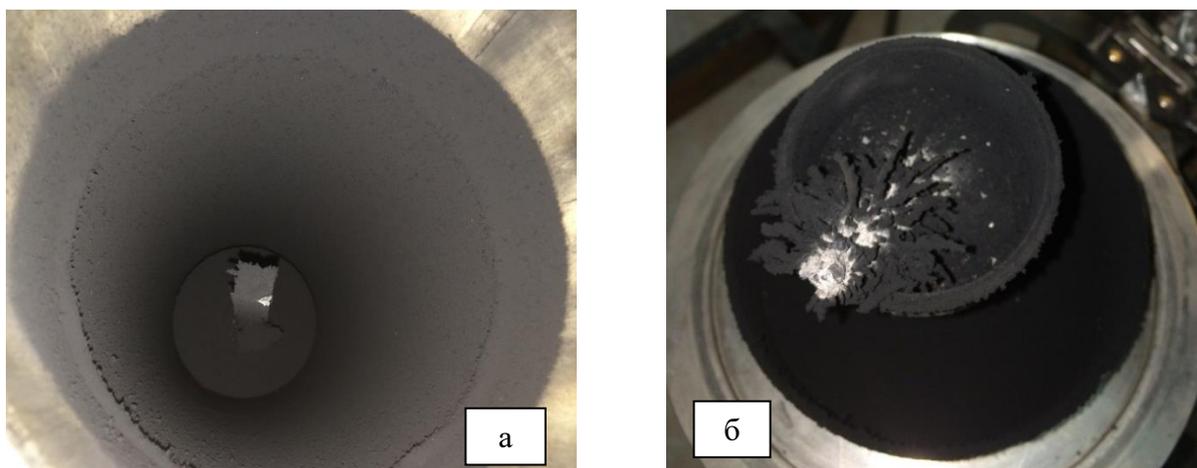


Рисунок 2 – Результат плазмохимического синтеза: **а** - образовавшаяся сажа на стенках реактора с графитовым электродом; **б** - отколовшийся депозит на штоке катода с хлопьями одностенных нанотрубок.

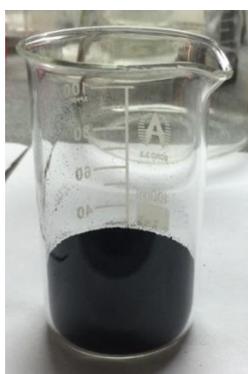
В процессе эксперимента температура воды на выходе составляла порядка 28°C и не менялась в течение всего процесса эксперимента. Созданное давление в реакторе поддерживалось постоянным. Весь плазмохимический процесс длился около 15 мин.

Другие параметры, влияющие на выход продукта, были неизменны: давление буферного газа в реакционной зоне, охлаждение реактора, скорость подачи электрода (катода).

После завершения эксперимента выдерживалось некоторое время, необходимое для охлаждения электродов и стенок реактора. Затем вакуумный насос отсекался от реактора, и в реактор напускали воздух через впускной кран. Узел анода

снимался, и образовавшаяся на стенках реактора сажа (рис. 2а) аккуратно собиралась для анализа и дальнейшей обработки.

Нижний графитовый стержень (анод) полностью испаряется с образованием депозита на катоде (Рис. 2б). Депозит в своей структуре содержал углеродные наноструктуры, в частности фуллерены. Тело образующегося депозита состоит из двух основных частей: сердцевин и оболочки. Оболочка депозита образуется из слоистых структур, плоскости которых располагаются перпендикулярно оси депозита и плотно уложены в единую конструкцию.



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Процесс извлечения растворимой составляющей из фуллеренсодержащей сажи: а - фуллеренсодержащая сажа в колбе; б - растворение 1грм сажи в бензоле; в – седиментация нерастворимой составляющей в течение 12 часов.

Результаты и обсуждение

Весь фуллеренсодержащий порошок (сажа) собирался и подвергался экстракции из него фуллеренов. Вначале сажу вымывали бензолом или толуолом при комнатной температуре. На рис. 3а изображена фуллеренсодержащая сажа, которая промывалась в бензоле (рис. 3б) и после седиментации в течение 12 часов (рис. 3в) проводили отделение (фильтрация) нерастворимой составляющей сажи (твердая фаза) от растворимой составляющей сажи (жидкая фаза).

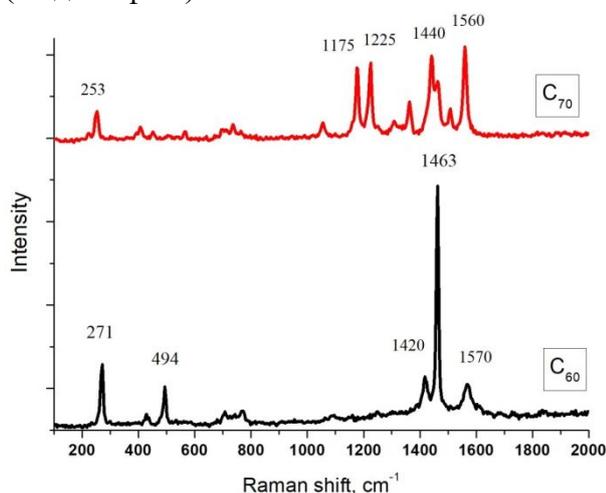


Рисунок 4 – Спектры комбинационного рассеяния (КРС) эталонных фуллеренов C_{60} и C_{70} .

Получение коричневого раствора (рис. 3в) свидетельствует о наличии в нем фуллеренов.

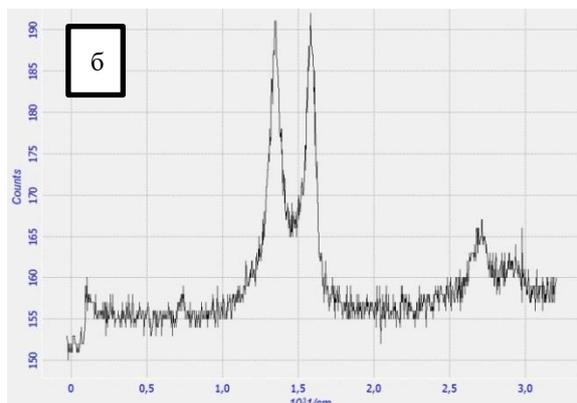
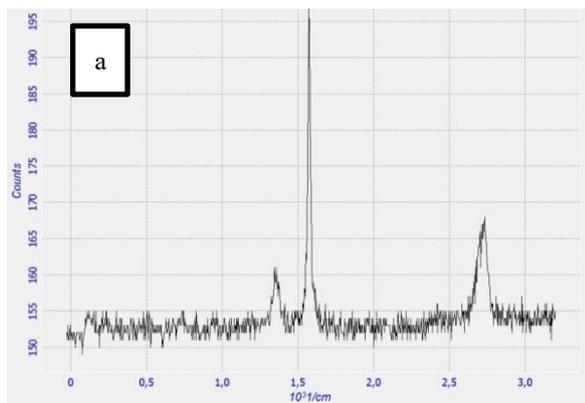
На следующем этапе: жидкость после фильтрации, наносили на стеклянную

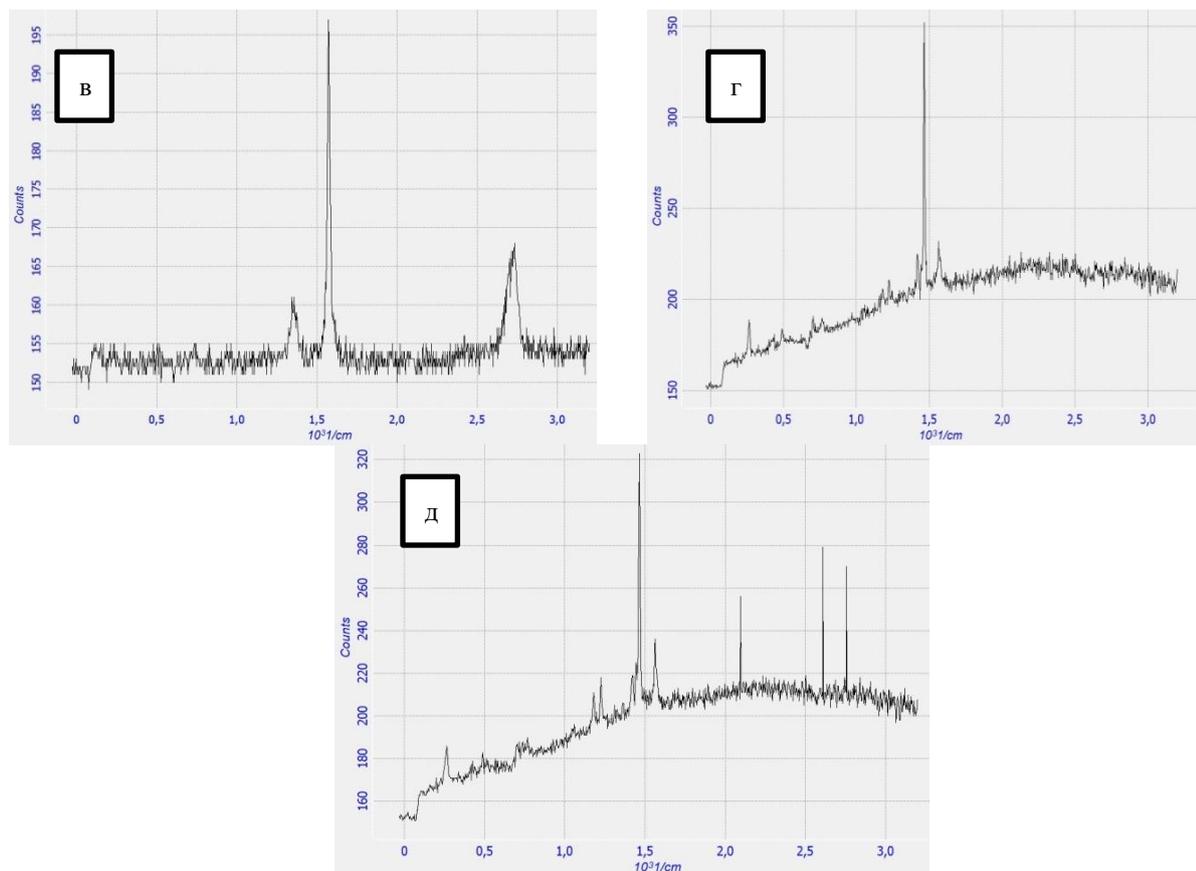
подложку и высушивали при комнатной температуре для дальнейшего исследования на аналитическом оборудовании.

Для сравнительного анализа синтезируемых фуллеренов были приобретены сертифицированные фуллерены C_{70} чистотой 99.5 % и C_{60} чистотой 99.8 % (рис. 4).

На рис. 5 представлен спектр комбинационного рассеяния света после разделения фуллеренсодержащей сажи на растворимую составляющую (фуллерены и фуллереноподобные структуры) и не растворимую составляющую. Спектры нерастворимой высокодисперсной фракции, полученной после фильтрации раствора представлен характерным углеродным пиком G и 2D (рис. 5а). Положение пика G равно 1580 cm^{-1} , слабо выраженный дефектный пик в области 1360 cm^{-1} , а также выделяющийся 2D пик со смещением 2740 cm^{-1} свидетельствуют о значительной фракции графита и малослоеного графена в полученном образце.

Анализ Рамановского спектра (рис. 5б) нерастворимой крупнодисперсной фракции образца показал наличие наноструктур типа многостенных углеродных нанотрубок. Однако, низкая интенсивность всего спектра и уширение пиков D и G, свидетельствует о большом количестве аморфного углерода в исследуемом образце.





а – наличие в нерастворимой высокодисперсной фракции значительного количества графита и малослоенного графена; б – наличие в нерастворимой крупнодисперсной фракции наноструктур типа многостенных углеродных нанотрубок, а также большого количества аморфного углерода; в, г, д – спектры, свидетельствующие о наличии смеси фуллеренов C_{60} и C_{70} , как растворимой фракции в фуллеренсодержащей саже.

Рисунок 5 – Спектры комбинационного рассеяния (Рамановские спектры) нанопродуктов синтеза после их разделения



Рисунок 6 – Фотографии растворов образцов фуллеренов, полученные при различных значениях тока дугового разряда

Спектр комбинационного рассеяния на рис. 5в,г подтверждает наличие в смеси фуллеренов C_{60} и C_{70} , как растворимой фракции в фуллеренсодержащей саже.

Для решения поставленной задачи в данной работе было проведено пять контрольных последовательных экспериментов, где использовались одинаковые графитовые электроды (марка МПГ-7) одного и того же производителя, которые испарялись при одинаковых условиях и режимах кроме силы тока. В каждом из пяти экспериментов выдерживался ток заданной силы (110А, 135А, 160А, 180А, 200А). Это было необходимо для решения поставленной задачи, а именно: *определения оптимального режима синтеза, позволяющего получить наибольший выхода фуллеренов электродуговым методом (ARC) в газовой среде* (рис. 6).

Визуальный анализ результатов электродугового синтеза с различной силой тока (110А, 135А, 160А, 180А, 200А) показали (рис. 6), что фуллеренсодержащая сажа при силе тока 180А максимально насыщена фуллеренами C_{60} и C_{70} . Данное утверждение подтвердили практические испытания. Спектрофотометрические исследования и математические расчеты концентрации фуллеренов C_{60} и C_{70} в растворах также подтвердили наши наблюдения. Наличие C_{60} и C_{70} в продукте подтвердил спектр комбинационного рассеяния (рис. 5д).

В ходе исследования было установлено, что сажа, осевшая на стенках

реактора, содержит фуллерены (рис. 3в) и другие наноструктуры. Наноструктуры сажевого продукта синтеза имеют различные геометрические формы (рис. 7, 8, 9).

Анализ на высшие и низшие фуллерены не проводился, по этому, вполне возможно, что данный режим подходит только для синтеза фуллеренов C_{60} и C_{70} .

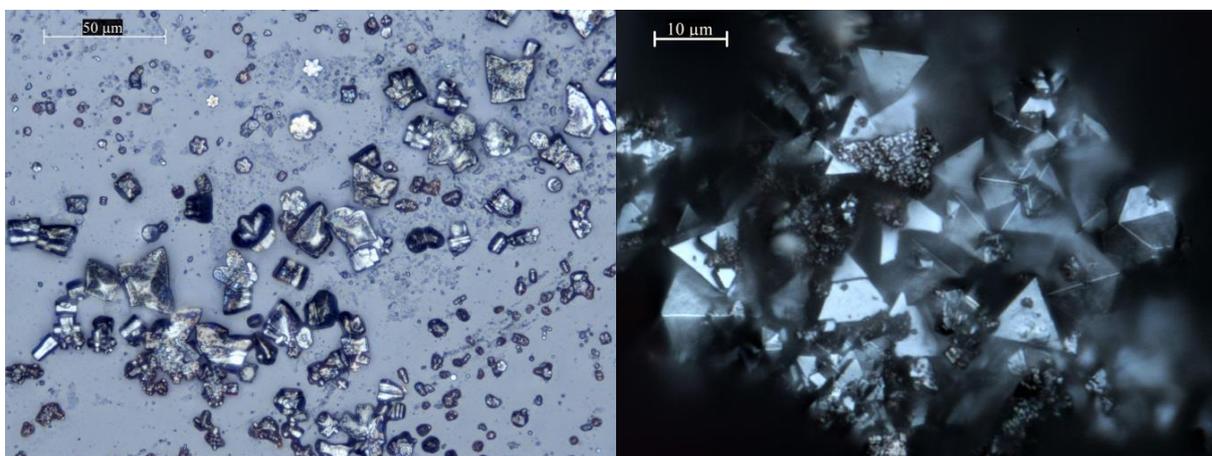
Результаты, полученные после экстракции растворимой составляющей сажи в бензоле для каждого из экспериментов, были исследованы на аналитическом оборудовании лаборатории (рис. 7, 8, 9), которые показали наличие фуллеренов и фуллереносодержащих продуктов в каждом из пяти контрольных экспериментов.

Микрофотографии синтезированных фуллеренов C_{60} и C_{70} , полученные с помощью растровой электронной микроскопии отображены на рис. 9.

Выводы

В работе проведен анализ полученных результатов и определены оптимальные режимы синтеза фуллеренов.

Необходимо учитывать, что в исследуемой саже содержание смеси фуллеренов составляет только 4 %. Для увеличения выхода фуллеренов необходимо производить дальнейшую очистку сажи от примесей, но уже без традиционного применения токсичных элементов (бензол, толуол).



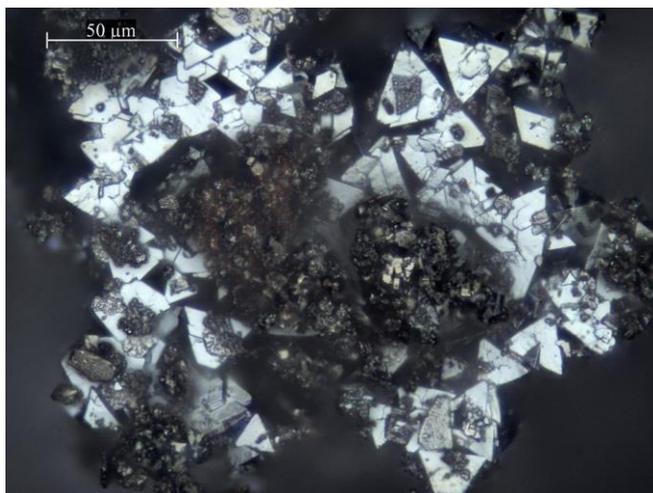


Рисунок 7 – Микрофотографии фуллеритов, полученных при испарении графита в дуге с силой тока 110А, (оптический микроскоп)

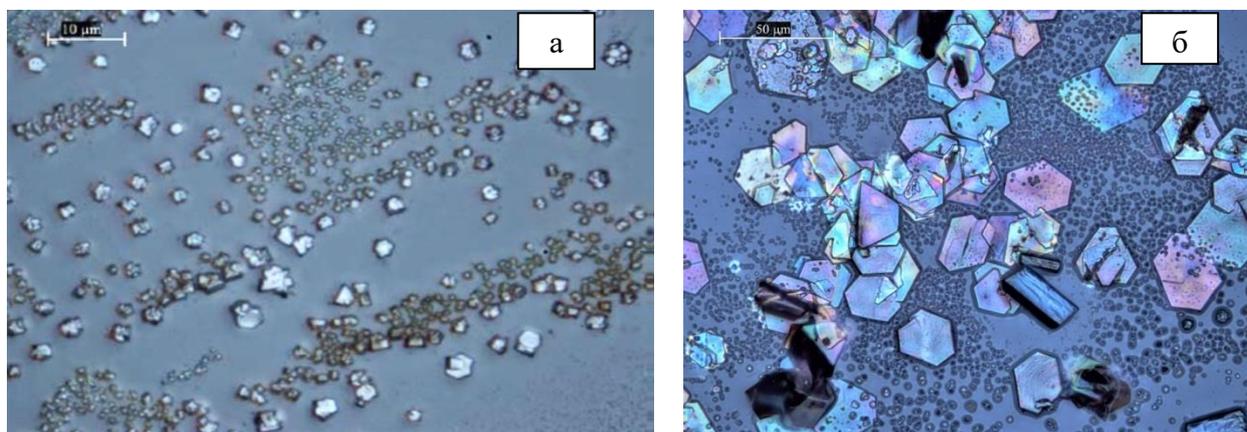
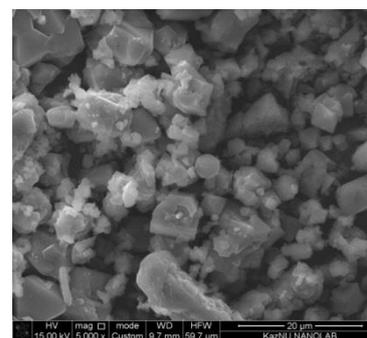
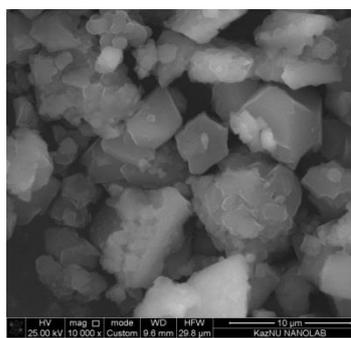
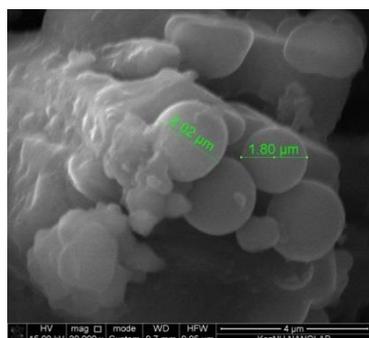


Рисунок 8 – Микрофотографии образцов фуллеритов, полученные с помощью оптической микроскопии. а - сила тока 110А; б - сила тока 180А



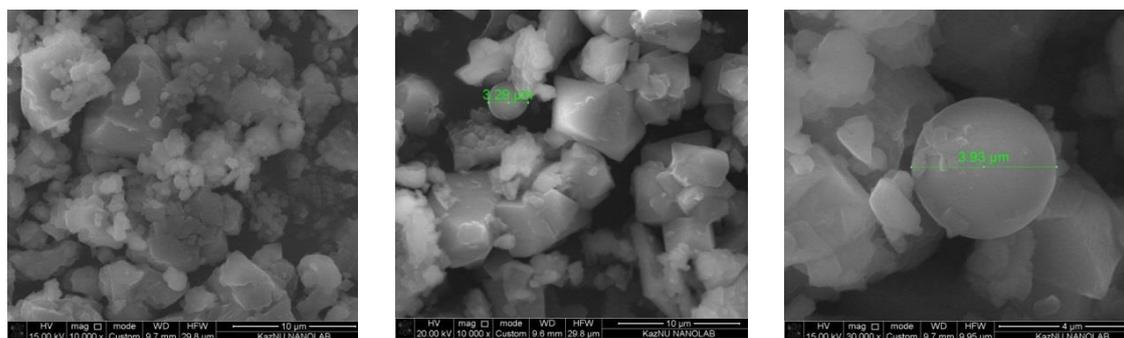


Рисунок 9 – Микрофотографии, полученные с помощью растровой электронной микроскопии

Полученные результаты являются основой для дальнейшего промышленного производства фуллеренов и для изучения фуллеренов, как углеродных наноматериалов. Результаты исследования имеют практическое значение в области нанотехнологии и фуллереновой тематики.

Проведена модернизация инженерной инфраструктуры для синтеза наноструктур плазмохимическим (электродуговым) методом в газовой среде, приобретены необходимые аналитические приборы.

Исследовано поведение углеродных наноструктур при изменении внешних условий и условий синтеза фуллеренов и их экстракции.

Проведена отработка технологии получения фуллеренов в электродуговом разряде при различных значениях тока (А). Получены и проанализированы образцы фуллеренов при различных силах тока (110А, 135А, 160А, 180А, 200А).

Полученные образцы исследованы как Рамановской спектроскопией, так и, электронной и оптической микроскопией.

Список литературы:

1. Smalley, R. E. The Science 1991.31, 22. Kroto, H. W.; Allaf, A. W.; Balm, S. P. Chem. Rev. 1991. 91.1213. Curl, R. F.; Smalley, R. E. Sci. Am. 1991, Oct, 54.
2. Rohlfing, E. A.; Cox, D. M; Kaldor, A. J. Chem. Phys. 1984. 81, 3322.
3. Bloomfield, L. A.; Geusic, M. E.; Freeman, R. R.; Brown, W. L. Chem. Phys. Lett. 1985. 121, 33.
4. Kroto, H. W.; Heath, J. R.; O'Brien, S. C.; Curl, R. F.; Smalley, R. E. Nature 1985. 318. 162
5. Heath, J. R.; O'Brien, S. C.; Zhang, Q.; Liu, Y.; Curl, R. F.; Kroto, H. W.; Tittel, F. K.; Smalley, R. E. J. Am, Chem. Soc. 1985. 107, 7779.
6. Krätschmer, W.; Lamb, L. D.; Foetiropoulos, K.; Huffman, D. R. Nature 1990, 347, 354.
7. ShurD.V., Gabdullin M.T., Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu T.N., Lototsky M.V., Bogolepov V.A., Savenko A.F. Experimental set-up for investigations of hydrogen-sorption characteristics of carbon nanomaterials // International journal of hydrogen energy. – 2016. – Vol. 41. – P. 401-406.
8. Ю.М. Шульга, С.А. Баскаков, А.Д. Золотаренко, Е.Н. Кабачков, В.Е. Мурадян, Д.Н. Войлов, В.А. Смирнов, В.М. Мартыненко, Д.В. Щур, А.П. Помыткин. Окрасивание наноллистов оксида графена и цветные полимерные композиции на их основе, Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології, 2013, 11, Вип. 1, 161-171
9. Ан Д., Золотаренко А.Г. Дубовой, А.Е. Перекос, В.А. Лавренко, Т.В. Ефимова, В.П. Залуцкий, Т.В. Ружицкая, А.В. Котко, Ал.Д. Золотаренко. Влияние магнитного поля на фазово-структурное состояние и магнитные свойства высокодисперсных порошков Fe, полученных электроискровым диспергированием. Наносистемы, Наноматериалы, Нанотехнологии, 2013,11 (1,2), 131-140
10. С.Ю. Загинайченко, Д.В. Щур, М.Т. Габдуллин, Н.Ф. Джавадов, Ал. Д.

Золотаренко, Ан. Д. Золотаренко, А.Д. Золотаренко, С.Х. Мамедова, Г.Д. Омарова, З.Т. Мамедова. Особенности пиролитического синтеза и аттестации углеродных наноструктурных материалов, *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*, 2018, 19-21. с. 72-90

11. Z.A. Matysina, S. Yu. Zaginaichenko, D.V. Schur, Al. D. Zolotarenko, An. D. Zolotarenko, M.T. Gabdulin, *Hydrogen Sorption Properties of Potassium Alanate*, *Russian Physics Journal*, 2018, 61 (2), p. 253-263

12. Al. D. Zolotarenko, An. D. Zolotarenko, V.A. Lavrenko, S. Yu. Zaginaichenko, N.A. Shvachko, O.V. Milto, V.B. Molodkin, A.E. Perekos, V.M. Nadutov, Yu. A. Tarasenko, *Encapsulated Ferromagnetic Nanoparticles in Carbon Shells*, *Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems-II*, 2011, p.127-136.

13. D.V. Schur, A. Veziroglu, S. Yu. Zaginaychenko, Z.A. Matysina, T.N. Veziroglu, M.T. Gabdullin, T.S. Ramazanov, An. D. Zolonarenko, Al. D. Zolonarenko, *Theoretical studies of lithium–aluminum amid and ammonium as perspective hydrogen storage*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44 (45), 24810-24820.

14. V.A. Lavrenko, I.A. Podchernyaeva, D.V. Shchur, An. D. Zolotarenko, Al. D. Zolotarenko, *Features of Physical and Chemical Adsorption During Interaction of Polycrystalline and Nanocrystalline Materials with Gases*, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2018, 1, p.1-8.

15. ЗА Матысина, СЮ Загинайченко, ДВ Щур, АД Золотаренко, Александр Дмитриевич Золотаренко, Анатолий Дмитриевич Золотаренко, Маратбек Тулеберганович Габдулин, Бищелочные и калиевые аланаты-перспективные накопители водорода, *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*, 2017,13-15, с. 37-60.

16. А.А. Володин, А.Д. Золотаренко, А.А. Бельмесов, Е.В. Герасимова, Д.В. Щур, В.Р. Тарасов, С.Ю. Загинайченко, С.В. Дорошенко, Ан. Д. Золотаренко, Ал. Д. Золотаренко, Электропроводящие композиционные материалы на основе оксидов металлов и углеродных

наноструктур, *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, 2014, 12, в. 4, с.705-714.

17. А.Д. Золотаренко, Д.В. Щур, А.Ф. Савенко, В.В. Скороход. Особенности процессов дугового синтеза углеродных наноматериалов, *Сб. тезисов конференции «Наноразмерные системы: электронное, атомное строение и свойства» (НАНСИС-2004)*, Киев: Академперіодика НАН України, 2004, № 1, с. 121.

18. M. Ualkhanova, A.Y. Perekos, A.G. Dubovoy, D.V. Schur, Al. D. Zolotarenko, An. D. Zolotarenko, N.A. Gavrylyuk, M.T. Gabdullin, T.S. Ramazanov, N. Akhanova, S. Orazbayev, *The Influence of Magnetic Field on Synthesis of Iron Nanoparticles*, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology Applications*, 2019, т. 3, № 3, с. 1-18.

19. D.V. Schur, An. D. Zolotarenko, Al. D. Zolotarenko, O.P. Zolotarenko, M.V. Chimbai, N.Y. Akhanova, M. Sultangazina, E.P. Zolotarenko. *Analysis and identification of platinum-containing nanoproducs of plasma-chemical synthesis in a gaseous medium*, *Physical Sciences and Technology*. 2019, Том 6, Номер 1, С. 46-56.

20. Z.A. Matysina, S.Yu. Zaginaichenko, D.V. Schur, T.N. Veziroglu, A. Veziroglu, M.T. Gabdullin, Al.D. Zolotarenko, An.D. Zolotarenko, *The mixed lithium-magnesium imide Li₂Mg (NH)₂ a promising and reliable hydrogen storage material*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, т. 43, № 33, p.16092-16106

21. S.Y. Zaginaichenko, Z.A. Matysina, D.V. Schur *The influence of nitrogen, oxygen, carbon, boron, silicon and phosphorus on hydrogen solubility in crystals*. *International Journal of Hydrogen Energy*. 21 (11-12), 1073-1083.

22. Y.M. Shul'ga, V.M. Martynenko, B.P. Tarasov, V.N. Fokin, V.I. Rubtsov, *On the thermal decomposition of the C₆₀D₁₉ deuterium fullerite*. *Physics of the Solid State*. 44 (3), 545-547.

23. S.Y. Zaginaichenko, D.V. Schur, Z.A. Matysina *The peculiarities of carbon interaction with catalysts during the synthesis of carbon nanomaterials*. *Carbon*. 41 (7), 1349-1355.

24. D.V. Schur, A.G. Dubovoy, S.Y. Zaginaichenko, V.M. Adejev, A.V. Kotko, *Synthesis of carbon nanostructures in gaseous*

and liquid medium. Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials. Springer Netherlands.

25. A.A. Rogozinskaya, A.F. Savenko, A.A. Rogozinskiy, A.D. Zolotareno, Structure of hydrogenated fullerite Proceedings of X International Conference Hydrogen Materials Science and

26. D.V. Schur, N.S. Astratov, A.P. Pomytkin, A.D. Zolotareno, T.I. Shaposhnikova. Protection of Securities by the Application of Fullerenes. Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials, 203-206.

27. Н.С. Аникина, О.Я. Кривущенко, Д.В. Щур, С.Ю. Загинайченко, С.С. Чупров Идентификация эндодральных металлофуллеренов методом UV-VIS-спектроскопии. Труды IX Международной конференции "Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов", Севастополь, Крым, Украина, сентябрь 5-11, 2005 <http://www.ichms.org>, <http://www.lab67.kiev.ua>.

28. Э.И. Головки, О.В. Пишук, А.Д. Золотаренко, Д.В. Щур, С.Ю. Загинайченко Дериватографическое исследование продуктов дугового испарения, полученных на различных подложках. Труды IX Международной Конференции "Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов", Севастополь, Крым, Украина, сентябрь 5-11, 2005 <http://www.ichms.org>, <http://www.lab67.kiev.ua>.

29. Н.С. Аникина, Д.В. Щур, С.Ю. Загинайченко, А.Д. Золотаренко, К.А. Мильто Определение величины соотношения фуллеренов C60 и C70 методом абсорбционной спектроскопии. Труды IX Международной Конференции "Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов", Севастополь, Крым, Украина, сентябрь 5-11, 2005 <http://www.ichms.org>, <http://www.lab67.kiev.ua>.

30. V. Schur, S.Y. Zaginaichenko, A.D. Zolotareno, T.N. Veziroglu Solubility and transformation of fullerene C60 molecule. Carbon Nanomaterials in Clean Energy

Hydrogen Systems. NATO Science Series, 2008, p. 85-95

31. D.V. Schur, AA Liashenko, VM Adejev, VB Voitovich, SY Zaginaichenko Niobium as a construction material for a hydrogen energy system. International Journal of Hydrogen Energy. 20 (5), 405-407.

32. M.D. Hampton, D.V. Schur, S.Y. Zaginaichenko, V.I. Trefilov Hydrogen Materials Science and Chemistry of Metal Hydrides. Springer Science & Business Media. v.71, 2002, P.586

33. З.А. Матысина, С.Ю. Загинайченко, Д.В. Щур Порядки различного типа в кристаллах и фазовые превращения в углеродных материалах. Монография. Днепропетровск: Наука и образование, (Laboratory 67).

34. Z.A. Matysina, S.Y. Zaginaichenko, D.V. Schur Hydrogen solubility in alloys under pressure. International Journal of Hydrogen Energy. 21 (11-12), 1085-1089.

35. Y.M. Lytvynenko, D.V. Schur Utilization the concentrated solar energy for process of deformation of sheet metal Renewable energy 16 (1-4), 753-756

36. KB Isayev, DV Schur Study of thermophysical properties of a metal-hydrogen system. International Journal of Hydrogen Energy 21 (11-12), 1129-1132.

37. N.S. Anikina, D.V. Schur, S.Y. Zaginaichenko, A.D. Zolotareno, S N.A., The role of chemical and physical properties of C60 fullerene molecules and benzene derivatives in processes of C60 dissolving. Proceedings of 10th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials", Sudak, Crimea, Ukraine.

38. N.S. Anikina, D.V. Schur, S.Y. Zaginaichenko, A.D. Zolotareno, S N.A., On the donor-acceptor mechanism of C60 fullerene dissolving in aromatic hydrocarbons. Proceedings of 10th International Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials", Sudak, Crimea, Ukraine.

39. D.V. Schur, A.G. Dubovoy, SAF Zaginaichenko S.Yu. Method for synthesis of carbon nanotubes in the liquid phase. Extended Abstracts, An International Conference on Carbon Providence (Rhode Island, USA): American Carbon Society., 2004, 196-198.

40. D.V. Schur, A.G. Dubovoy, S.Y. Zaginaichenko, V.M. Adejev, A.V. Kotko, Production of carbon nanostructures by arc synthesis in the liquid phase. Carbon. 45 (6), 1322-1329.

41. З.А. Матысина, С.Ю. Загинайченко, Д.В. Щур Растворимость примесей в металлах, сплавах, интерметаллидах, фуллеритах. Монография. Днепропетровск: Наука и образование, (Laboratory 67).

42. Z.A. Matysina, S.Y. Zaginaichenko, D.V. Schur, O.S. Pogorelova The surface energy of crystalline CuZn and FeAl alloys. J. Phys. Chem. Solids. 56 (1), 9-14.

43. N.S. Anikina, Z.S. Yu., M.I. Maistrenko, A.D. Zolotarenko, G.A. Sivak, D.V. Schur Spectrophotometric Analysis of C60 and C70 Fullerenes in the Toluene Solutions. (Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials), Springer. 172, 207-216.

Принято в печать 29.09.2022

