

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

© 2019 г. Е. А. Богослов<sup>1</sup>, М. П. Данилаев<sup>1,\*</sup>, С. В. Дробышев<sup>1</sup>, В. А. Куклин<sup>1,2</sup>, М. С. Пудовкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

\*E-mail: [daniilaev@mail.ru](mailto:daniilaev@mail.ru)

Поступила в редакцию 07.08.2019

После доработки 22.08.2019

Принята к публикации 27.08.2019

Изучен механизм формирования углеродных наночастиц при одновременном образовании полистирольной пленки в барьерном коронном разряде переменного тока атмосферного давления. Актуальность исследований обусловлена необходимостью контроля аллотропной формы углеродных наночастиц, которая влияет на физико-технические характеристики полимерных пленок, получаемых таким способом. Показано, что в основе механизма формирования графеновых чешуек лежит зародышеобразование агломератов поликристаллических углеродных наночастиц типа луковиц (*onion-like carbon*) в чехле короны. Формирование графеновых чешуек происходит из этих зародышей в стримерах газового разряда за счет деструкции молекул мономера, оставшихся в агломератах зародышей. Выявлено, что аллотропная форма образующихся частиц определяется не только энергетикой, в данном случае барьерного коронного разряда, но и соотношением длительности его воздействия с характерными временами деструкции и образования ковалентных связей, участвующих в процессе частиц.

### ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором при создании композиционных материалов с использованием углеродных наночастиц, таких как, например, графеновые чешуйки, углеродные нанотрубки, фуллерены, является воспроизводимость их макроскопических характеристик (механических, электрических и пр.), которая во многом определяется стабильностью аллотропной формы внедряемых углеродных частиц [1–5]. Обеспечить стабильность аллотропной формы углеродных наночастиц возможно только в процессе их формирования, в том числе с одновременным внедрением в полимерную матрицу по технологии *in situ*. Один из перспективных подходов к формированию композиционных полимерных материалов по этой технологии основан на использовании газовых разрядов [6–10], например барьерного коронного разряда переменного тока атмосферного давления [11]. Такой подход по-

зволяет синтезировать углеродные частицы непосредственно в процессе формирования полимера [11, 12]. На поверхностях углеродных наночастиц возможно образование оболочки, например олигомера, соответствующего мономеру, подаваемому в плазмохимический реактор. Такая оболочка способствует повышению адгезии углеродных наночастиц к полимерной матрице, что приводит к увеличению твердости и модуля упругости полимерной композиции [13, 14]. Следует отметить, что тип аллотропной формы образующихся углеродных наночастиц определяется параметрами газового разряда (например, напряженность электрического поля, плотность электрического тока, давление в плазмохимическом реакторе) и может быть различным. Причем параметры газового разряда могут изменяться в процессе роста полимерной пленки, наполненной углеродными частицами, что приводит к наличию в этой пленке углеродных частиц разных аллотропных форм [6–9].

Аллотропная форма углеродных частиц, а также ее разнообразие, влияет фактически на все физико-технические свойства полимерной композиции, в том числе удельную проводимость, теплопроводность, прочностные характеристики. Например, при создании датчиков температуры на основе проводящих полимерных композиций с использованием углеродных наночастиц в качестве наполнителя тип аллотропной формы этих частиц влияет на чувствительность датчиков, вид измерительной и вольтамперной характеристик [15, 16]. Механические свойства полимерной композиции также определяются типом аллотропной формы образующихся углеродных наночастиц [1–3]. Таким образом, актуальным является контроль аллотропной формы углеродных наночастиц при использовании такого подхода к получению полимерной композиции с воспроизводимыми физико-техническими характеристиками.

Контроль аллотропной формы формируемых наночастиц предполагает четкое представление о механизме их образования и роста в плазме газовых разрядов. Обзор работ, например [6–10, 17, 18], в которых проводятся исследования механизмов образования и роста углеродных наночастиц в газовых разрядах, показывает, что в основе всех механизмов лежат эффекты образования зародышей с последующим их ростом. Причина появления зародышей и их последующего роста заключается в термической деструкции углеводородов, когда разряд является источником энергии для объемного нагревания газовой среды. Так, в [18, 19] методом спектрографии определено, что в коронном разряде переменного тока при атмосферном давлении температура в каналах образующихся стримеров лежит в диапазоне 2000–6500°C. Такое значение температуры достаточно для образования кристаллических углеродных частиц, например чешуек графена [6, 8, 20]. Однако в литературе

отсутствует четкое обоснование механизма роста таких частиц.

Целью настоящей работы является уточнение механизма образования графеновых чешуек в плазме барьерного коронного разряда переменного тока при атмосферном давлении в системе электродов игла–плоскость в процессе формирования полимерной пленки.

Одним из основных ограничений при постановке и выборе метода решения этой задачи является определение “начальной” частицы, с которой начинается рассмотрение процесса образования конечной структуры. Отметим, что отдельные графеновые чешуйки – структура фрактальная [21–24]. Минимальным фракталом [24] в такой структуре является гексагональная структура из атомов углерода [24–30]. При этом физика формирования отдельных минимальных фракталов и фрактальной структуры, в которой базовым (неделимым) элементом является минимальный фрактал, может быть различна [22, 24]. Это, в свою очередь, требует различных подходов к исследованию процессов формирования отдельных минимальных фракталов и конечной структуры, построенной из них. В настоящей работе в качестве “начальной” частицы рассмотрен минимальный фрактал – гексагональная структура из атомов углерода в графеновых чешуйках [21].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводили на примере формирования углеродных наночастиц в процессе получения полистирольной пленки в плазме барьерного коронного разряда переменного тока при атмосферном давлении [11, 31]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Барьерный коронный разряд переменного (40 кГц) тока создавался коронатором в системе

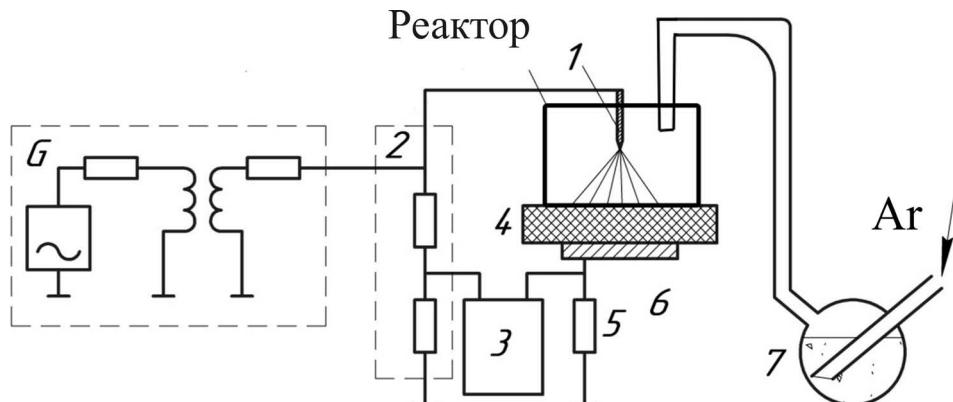


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: G – коронатор (КР1-300), 1 – коронирующий электрод игла, 2 – делитель напряжения, 3 – двухлучевой осциллограф (АСК-2205), 4 – диэлектрический барьер, 5 – шунт (50 Ом), 6 – плоский электрод, 7 – устройство барботирования.

электродов игла—плоскость. Расстояние между иглой и барьером изменялось в диапазоне 10–20 мм с точностью  $\pm 0.5$  мм. Напряженность электрического поля регулировалась в диапазоне 6–12 кВ/см с точностью  $\pm 0.5$  кВ/см. Напряжение на электродах плазмохимического реактора измеряли с помощью делителя напряжения и регистрировали двухлучевым осциллографом. В качестве плоского электрода использовали медную пластину размером 75 × 75 мм. Ток разряда измеряли с помощью шунта и также регистрировали осциллографом. На поверхности барьера происходило формирование полистирольной пленки из паров стирола, которые подавались в плазмохимический реактор из устройства барботирования. В качестве газоносителя использовался аргон. Расход паров стирола определялся давлением аргона, подаваемого из баллона через редуктор. Давление изменялось в диапазоне 1000–1020 гПа с точностью  $\pm 1$  гПа. Дополнительно проводили спектральные исследования такого газового разряда методом просвечивающей спектроскопии с использованием спектрометра StellarNet EPP2000 Spectrometer с разрешением 0.5 нм [31, 32].

Для уточнения механизма формирования графеновых чешуек в плазме барьера газового разряда переменного тока были исследованы три группы образцов полистирольных пленок, наполненных углеродными наночастицами:

— первая группа образцов была получена в отсутствие стримеров в плазмохимическом реакторе. Условия получения образцов: напряженность электрического поля 7.5 кВ/см, мощность на коронаторе  $\sim 45$  Вт. Для образца 1.1 избыточное давление в устройстве барботирования 3 гПа; для образца 1.2–17.5 гПа. В данной группе образцов повышение температуры (до  $\sim 800$ –950°C), при которой возможно формирование углеродных наночастиц

с упорядоченной структурой, происходит только в зоне чехла короны [8, 10, 32, 34];

— вторая группа образов была получена при редких стримерах в плазмохимическом реакторе. Условия получения образцов: образец 2.1: напряженность электрического поля 8.5 кВ/см, мощность на выходе коронатора  $\sim 50$  Вт, избыточное давление в устройстве барботирования 3 гПа; образец 2.2: напряженность электрического поля 9.5 кВ/см, мощность на коронаторе  $\sim 55$  Вт, избыточное давление в устройстве барботирования 17.5 гПа;

— третья группа образцов была получена при регулярных, периодически повторяющихся стримерах в плазмохимическом реакторе. Условия получения образцов: образец 3.1: напряженность электрического поля  $\sim 10$  кВ/см, мощность на коронаторе  $\sim 60$  Вт, избыточное давление в устройстве барботирования 3 гПа; образец 3.2: напряженность электрического поля  $\sim 11.5$  кВ/см, мощность на выходе коронатора  $\sim 70$  Вт, избыточное давление в устройстве барботирования 17.5 гПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типовые осциллограммы разрядного тока  $I$  при получении образцов второй и третьей группы приведены на рис. 2. На фоне емкостного тока разрядного промежутка наблюдаются короткие импульсы с длительностью 0.5–1 мкс, соответствующие увеличению тока в цепи за счет формирования стримеров.

При отрицательных полуволнах разрядного тока, что соответствует разряду с положительной короной (рис. 2), практически всегда наблюдаются только одиночные стримеры, при положительных полуволнах — количество стримеров в течение одного полупериода выходного напряжения

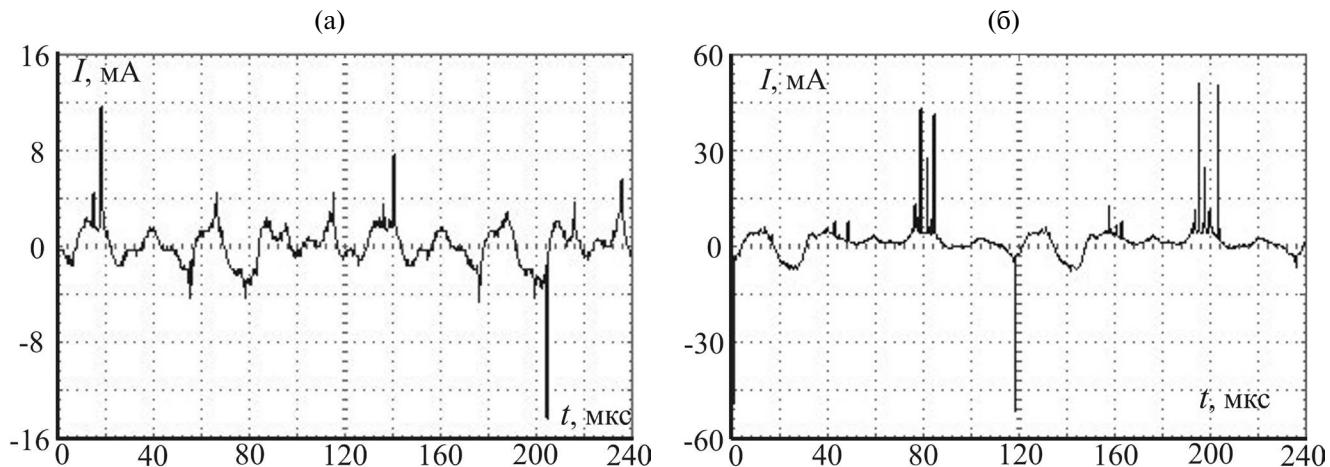


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока при получении образцов второй (а) и третьей (б) групп.

коронатора растет с ростом его выходной мощности. В работах по исследованию униполярного коронного разряда различной полярности [32, 35, 36] показано, что при отрицательной короне ее чехол отделен от коронирующего электрода. В случае образования стримеров пространственная структура чехла короны состоит из множества разрядных микроканалов, достигающих плоского электрода за время 0.5–1 мкс. При положительной короне чехол имеет небольшую толщину и повторяет форму игольчатого электрода [37]. За время длительности одного стримера при положительной короне емкость разрядного промежутка полностью разряжается. При отрицательной короне за время длительности одного стримера емкость разрядного промежутка разряжается не полностью и за полупериод питающего напряжения остаются условия для развития нескольких стримеров.

Идентификация аллотропных форм углеродных частиц осуществлялась на просвечивающем электронном микроскопе Zeiss Libra 120 со встроенным Омега-фильтром путем визуализации отдельных частиц и анализа дифракции электронов на этих частицах. Условия наблюдения следующие: ускоряющее напряжение 120 кВ, источник электронов –  $\text{LaB}_6$ . Для исследования углеродных частиц методом просвечивающей электронной микроскопии была получена их суспензия путем растворения полимерной пленки в ацетоне (99.9%). После чего полученный раствор объемом 2 мкл наносили на 3-мм медную сеточку с подложкой Formvar/Carbon (TedPella).

Типовые микрофотографии и картина дифракции электронов для углеродных частиц, полученных из полимерных пленок, приведены на рис. 3–5. Картина микродифракции получена со всей

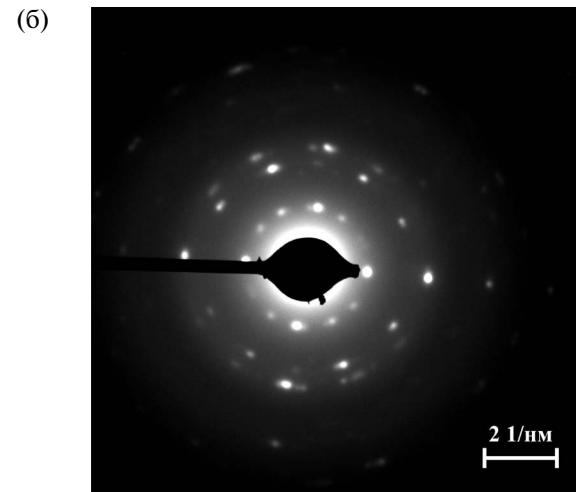
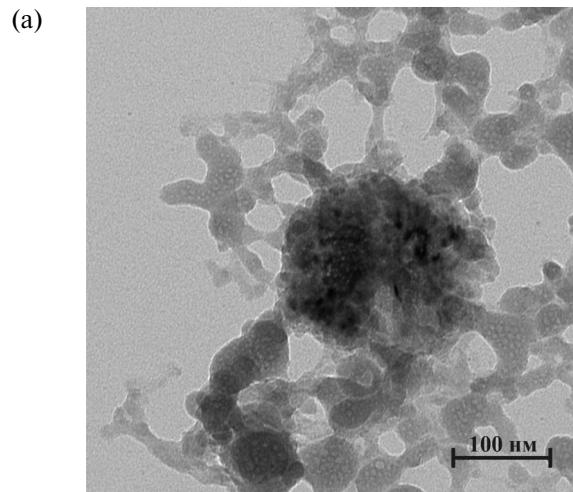


Рис. 3. Типовые микрофотография (а) и картина дифракции электронов на углеродных частицах (б), полученных из образцов первой группы.

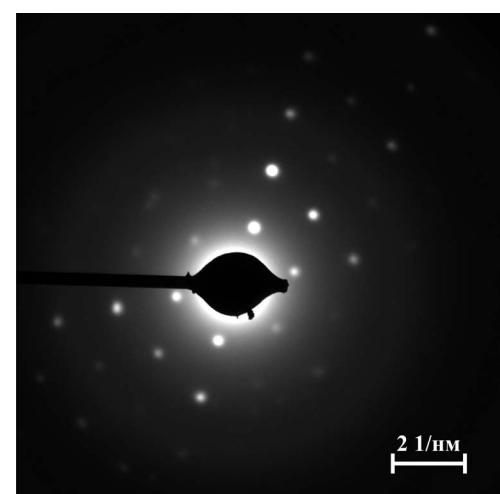
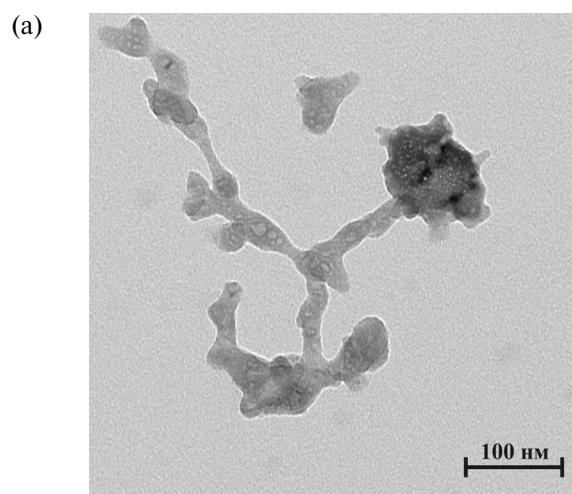


Рис. 4. Типовые микрофотография (а) и картина дифракции электронов на углеродных частицах (б), полученных из образцов второй группы.

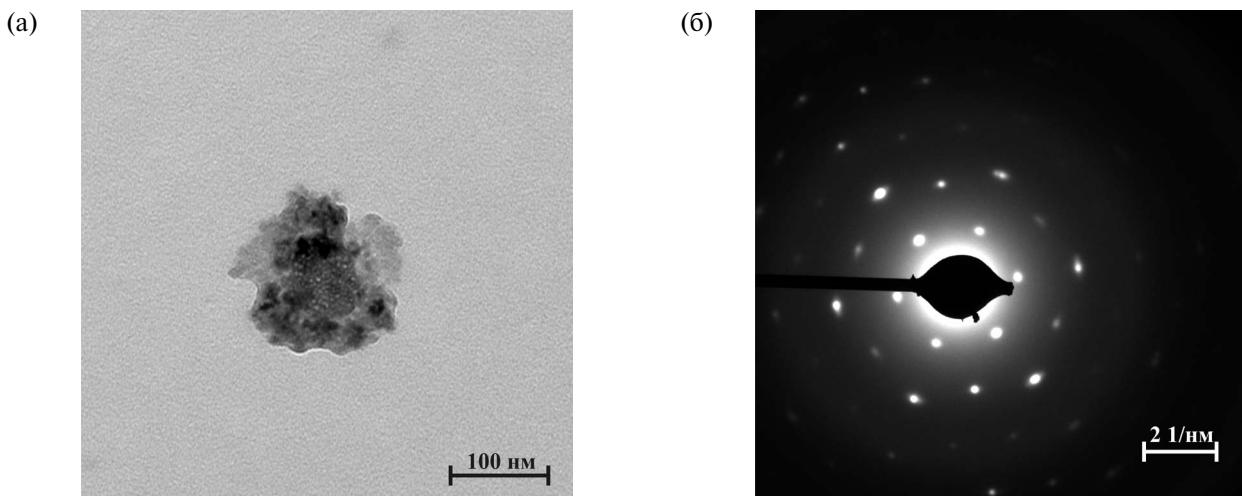


Рис. 5. Типовые микрофотография (а) и картина дифракции электронов на углеродных частицах (б), полученных из образцов третьей группы.

представленной на микрофотографиях области. Дифракционные кольца, имеющие размытую, нечеткую структуру (рис. 3б, 4б, 5б), соответствуют подложке, на которой располагались углеродные частицы, полученные из образцов. Следует отметить, что во всех образцах присутствуют углеродные частицы, как аморфные, так и поликристаллические. Анализ рефлексов дифракции электронов проводили по методике, приведенной в [25–29].

Структура углеродных частиц и расположение рефлексов на дифракционных картинах образцов первой группы соответствуют поликристаллической углеродной структуре типа луковиц (*onion-like carbon*) [25–27]. По всей видимости, в объеме агломератов углеродных частиц присутствуют молекулы углеводородов, не успевшие разрушиться в чехле короны [31]. В образцах второй группы, судя по микрофотографиям и картине дифракции электронов, помимо аморфных углеродных частиц присутствуют углеродные частицы как типа луковиц, так и типа неплоских графеновых чешуек [11, 25–27]. Образование стримеров, в которых продолжается деструкция молекул углеводорода, приводит к увеличению доли упорядоченного углерода (рис. 4б). При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля и мощности на выходе коронатора в плазмохимическом реакторе образуются регулярные стримеры. Причем увеличивается не только плотность тока в стримерах, но и интервал времени, в течение которого происходит деструкция молекул углеводородов. Это обусловлено увеличением количества стримеров на один полупериод выходного напряжения коронатора при отрицательной короне на игольчатом электроде (рис. 2). Структура и картина дифракции электронов на углеродных частицах образцов третьей группы показывают дальнейшее изменение их структуры

и соответствуют хаотично расположенным в агломератах графеновым чешуйкам [26–29]. Размеры отдельных углеродных чешуек в агломератах составляют  $\sim 100$  нм, а рефлексы соответствуют гексагональной структуре углерода в чешуйках (рис. 5б)  $d_{100}/d_{110} \approx 1.73$  [28].

Полученные экспериментальные результаты согласуются с теорией формирования упорядоченных, в том числе фрактальных, структур [22, 38, 39]. На начальной стадии образования графеновых чешуек формируются агломераты их зародышей с поликристаллической структурой типа *onion-like carbon*, расположенные хаотическим образом. В процессе роста зародышей в рамках условий эксперимента происходит повышение упорядоченности с формированием агломератов неплоских фрактальных графеновых чешуек, состоящих из ансамблей минимальных фракталов, которые обладают гексагональной симметрией [39, 40]. Дальнейший рост углеродных наночастиц происходит за счет регуляризации ансамблей минимальных фракталов, что приводит к еще большей упорядоченности в их структуре. Конечная аллотропная форма углеродных наночастиц, образующихся из зародышей, определяется энергетическими характеристиками газового разряда и интервалом времени, в течение которого выделяется тепло за счет протекания разрядного тока (чехол короны, стримера).

С ростом упорядоченности в структуре отдельных углеродных частиц, хаотически расположенных в их агломератах, наблюдается увеличение интенсивности широкой линии в спектрах поглощения (рис. 6) в диапазоне длин волн 250–300 нм. Спектры нормировались на спектр поглощения газового разряда в аргоне при атмосферном

давлении:  $J_{\text{отн}}(\lambda) = J_1(\lambda)/J_0(\lambda)$ , где  $J_1(\lambda)$  – интенсивность излучения, прошедшего через газовый разряд в среде смеси паров мономера с аргоном при атмосферном давлении,  $J_0(\lambda)$  – интенсивность излучения, прошедшего через газовый разряд в среде аргона при атмосферном давлении.

Широкую линию в диапазоне длин волн 250–300 нм возможно идентифицировать с углеродными частицами, имеющими регулярную (кристаллическую или поликристаллическую) структуру. Так, в [41, 42] показано, что эта линия присутствует в спектрах поглощения фуллеренов. Отметим, что в спектрах (рис. 6) отсутствуют типовые для фуллеренов линии поглощения 403.9 и 408 нм [42, 43] для всех групп образцов. Провал в спектре на 310 нм соответствует возбужденной  $\text{C}=\text{C}$ -связи [44], провалы на длине волны 379.5 нм соответствуют линиям молекулы аргона ( $\text{Ar}_2^+$ ), находящейся в возбужденном состоянии [45, 46].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе механизма формирования графеновых чешуек лежит зародышеобразование за счет деструкции углеводородов в барьерном разряде атмосферного давления, поликристаллических углеродных наночастиц с последующей их группировкой. Зародыш состоит из агломератов углеродных наночастиц типа луковиц (*onion-like carbon*), в объеме которых расположены молекулы углеводородов. При увеличении длительности протекания разрядного тока происходит дальнейший рост размеров углеродных наночастиц за счет деструкции молекул углеводородов оставшихся в агломератах зародышей с последующим присоединением вновь образованных минимальных фракталов. В результате этого формируются агломераты хаотически ориентированных графеновых чешуек, средний размер которых составляет  $\sim 100$  нм. Важно отметить, что аллотропная форма образующихся частиц определяется не только энергетикой, в данном случае барьерного коронного разряда, но и длительностью его воздействия, характерными временами деструкции и образования ковалентных связей, участвующих в процессе частиц (молекул углеводородов, углеродных частиц).

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-48-160024); частично (в части спектроскопии) при поддержке за счет субсидий, выделенных Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (3.1156.2017/4.6, 3.5835.2017/6.7).

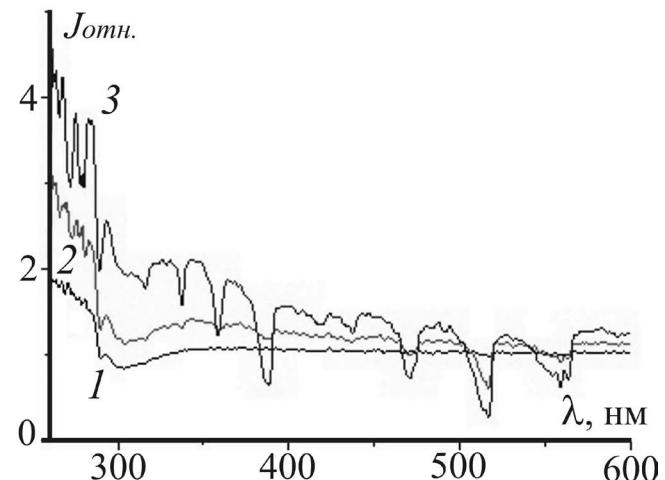


Рис. 6. Типовые нормированные спектры поглощения барьерного газового разряда, полученные при формировании углеродных наночастиц: 1 – образец 2.1; 2 – образец 2.2; 3 – образец 2.3.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumar R. Polymer-matrix composites (types, applications and performance). New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. 314 p.
2. Hussain F., Hojjati M. Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: AnOverview // J. Composite Materials. 2006. V. 40. № 17. P. 1511.
3. Zhandarov S., Mader E., Scheffler C. et al. Investigation of interfacial strength parameters in polymer matrix composites: Compatibility and reproducibility // Adv. Industrial Engineering Polymer Res. 2018. № 1. P. 82.
4. Чесноков В.В., Чичкань А.С., Пармон В.Н. Керамические нанопористые мембранны, модифицированные углеродными нанотрубками, для разделения газовых смесей // Российские нанотехнологии. 2017. Т. 12. № 3–4. С. 43.
5. Мансурова И.А., Исупова О.Ю., Бурков А.А. и др. Функционализация 1d углеродных наноструктур компонентами вулканизующей группы и их влияние на свойства резин // Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 9–10. С. 76.
6. Lone M.Y., Kumar A., Husain S. et al. Growth of Carbon Nanotubes by PECVD and its Applications: A Review // Current Nanoscience. 2017. V. 13. № 5. P. 536.
7. Arora N., Sharma N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review // Diamond and Related Materials. 2014. V. 50. P. 135.
8. Moutab Sahihazar M., Nouri M., Rahmani M. et al. Fabrication of Carbon Nanoparticle Strand under Pulsed Arc Discharge // Plasmonics. 2018. V. 13. № 6. P. 2377.
9. Ryzhkov V.A. Mechanism of carbon nanotube growth in arc-discharge // Carbon – Sci. Tech. 2008. № 1. P. 2.
10. Sufi Roslan M., Muneer Abd Rahma M. et al. Fullerene-to-MWCNT Structural Evolution Synthesized by Arc Discharge Plasma // J. Carbon Research. 2018. № 4. P. 1.
11. Богослов Е.А., Данилаев М.П., Польский Ю.Е. и др. Формирование полистирольной пленки в плазме газового разряда атмосферного давления // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 2. С. 23.

12. *Raniszewski G., Wiak S., Pietrzak L. et al.* Influence of Plasma Jet Temperature Profiles in Arc Discharge Methods of Carbon Nanotubes Synthesis // *Nanomaterials* (Basel). 2017. V. 7(3). <https://doi.org/10.3390/nano7030050>
13. *Bogomolova O.Y., Biktagirova I.R., Danilaev M.P. et al.* Effect of adhesion between submicron filler particles and a polymeric matrix on the structure and mechanical properties of epoxy-resin-based compositions // *Mechanics of Composite Materials*. 2017. V. 53. № 1. P. 117.
14. *Chaudhuri R.G., Paria S.* Core/Shell Nanoparticles: Classes, Properties, Synthesis Mechanisms, Characterization, and Applications // *Chem. Rev.* 2012. V. 112. № 4. P. 2373.
15. *Qian-ying Chen, Jing Gao, Kun Dai et al.* Nonlinear current-voltage characteristics of conductive polyethylene composites with carbon black filled pet microfibrils // *Chinese J. Polymer Sci.* 2013. V. 31. № 2. P. 211.
16. *Scordo G., Bertana V., Scaltrito L. et al.* A novel highly electrically conductive composite resin for stereolithography // *Materials Today Commun.* 2019. V. 19. P. 12.
17. *Sano N., Wang H., Alexandrou I. et al.* Properties of carbon onions produced by an arc discharge in water // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 92. № 5. P. 2783.
18. *Rui Hu, Mihai Alexandru Ciolan, Xiangke Wang et al.* Copper induced hollow carbon nanospheres by arc discharge method: controlled synthesis and formation mechanism // *Nanotechnology*. 2016. V. 27. P. 1.
19. *Борисоглебский П.В., Дмоховская Л.Ф., Ларионов В.П. и др.* Техника высоких напряжений. М.: Госэнергоиздат, 1963. 266 с.
20. *Александров Г.Н., Борисов В.В., Каплан Г.С.* Теория электрических аппаратов. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. 218 с.
21. Graphene – synthesis, characterization, properties and applications / Ed. Jian Ru Gong. Croatia: InTech Janeza Trdine, 2011. 184 p.
22. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2005. 527 с.
23. *Мандельброт Б.Б.* Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
24. *Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Польский Ю.Е.* Физические фракталы, структуры, моды // Нелинейный мир. 2008. № 2. С. 110.
25. *Szerencsi M., Radnoci G.* The mechanism of growth and decay of carbon nano-onions formed by ordering of amorphous particles // *Vacuum*. 2010. V. 84(1). P. 197.
26. *Peter J.F. Harris* Transmission Electron Microscopy of Carbon: A Brief History // *J. Carbon Research*. 2018. № 4. P. 1.
27. *Bogdanov K., Fedorov F., Osipov V. et al.* Annealing-induced structural changes of carbon onions: High-resolution transmission electron microscopy and Raman studies // *Carbon*. 2014. V. 73. P. 78.
28. *Müller U.* Symmetry Relationships between Crystal Structures. Applications of Crystallographic Group Theory in Crystal Chemistry. UK: Oxford University Press, 2013. 332 p.
29. *Meyer Jannik C., Geim A.K., Katsnelson M.I. et al.* The structure of suspended graphene sheets // *Nature*. 2007. V. 446. № 7131. P. 60.
30. *Cosslett V.E.* Recent progress in high voltage electron microscopy // *Modern diffraction and imaging techniques in materials science* / Eds. Amelinckx S. et al. Amsterdam: North Holland Press, 1970. P. 341.
31. *Danilaev M.P., Bogoslov E.A., Polskii Y.E. et al.* Formation mechanism of argon clathrates with carbon dendrites // *Technical Physics. The Russian J. Appl. Phys.* 2018. V. 63. № 6. P. 857.
32. *Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Петрушенко И.Н., Стишков Ю.К.* Некоторые особенности коронного разряда в воздухе // *Журнал технической физики*. 2008. Т. 78. № 7. С. 30.
33. *Kozak D., Shibata E., Iizuka A., Nakamura T.* Growth of carbon dendrites on cathode above liquid ethanol using surface plasma // *Carbon*. 2014. V. 70. P. 87.
34. *Кольцова Т.С., Ларионова Т.В., Шушарина Н.Н., Толочко О.В.* // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 8. С. 110.
35. *Алмазова К.И., Белоногов А.Н., Боровков В.В. и др.* Синтез углеродных нановолокон на медных частицах // *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89. № 1. С. 69.
36. *Алмазова К.И., Белоногов А.Н., Боровков В.В. и др.* Микроструктура искрового разряда в воздухе в промежутке острье-плоскость // *Журнал технической физики*. 2018. Т. 88. № 6. С. 827.
37. *Стишков Ю.К., Самусенко А.В., Ашихмин И.А.* Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе // *Успехи физических наук*. 2018. Т. 188. № 12. С. 1331.
38. *Хакен Г.* Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 423 с.
39. *Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2004. 256 с.
40. *Пригожин И.* Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. Ижевск: РХД, 2000. 207 с.
41. *Киселев О.Г., Березин А.Б., Майерс Ф.Э. и др.* Способ экстракции фуллеренов. Пат. 2272784 РФ, МПК7 C01B31/02, B01D11/02. Опубл. 27.03.2006. Бюл. № 9. с. 37.
42. *Павлович В.С., Шиплевский Э.М.* Спектры поглощения и флуоресценции концентрированных растворов фуллерена C60 в гексане и полистироле при 77–300 K // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2010. Т. 77. № 3. С. 362.
43. *Leach S., Vervloet M., Despres A. et al.* Electronic spectra and transitions of the fullerene C60 // *Chem. Phys.* 1992. V. 160. P. 451.
44. *Cohen A., Lundell J., Gerber R.B.* First compounds with argon-carbon and argon-silicon chemical bonds // *J. Chem. Phys.* 2003. V. 119. P. 6415.
45. *Liberman M.A., Lichtenberg A.J.* Principles of plasma discharges and materials processing. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc., 2005. 794 p.
46. Справочник по лазерам / Под ред. Прохорова А.М. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. 504 с.