

ФИЗИКА



Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Физика. Астрономия сериясы, 2021, том 136, №3, 8-16 беттер
<http://bulphysast.enu.kz>, E-mail: vest_phys@enu.kz

МРНТИ: 29.19.22

К.Н. Жангозин¹, Т.К. Жанабергенов², Д.Б. Каргин³

¹ НАО "Национальный аграрный научно-образовательный центр", Нур-Султан, Казахстан,

² ТОО "Научно-производственный центр агроинженерии", Алматы, Казахстан,

³ НАО "Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева", Нур-Султан, Казахстан

(E-mail: ³ kjb_orken@mail.ru)

О новом методе получения порошкового графена

Аннотация: в прошедшее десятилетие наблюдается бурный рост интереса к графену – одноатомному слою углерода, - связанный с уникальными его свойствами. В статье приводятся некоторые его характеристики и способы получения графена. Проведен анализ энергий атомов и слоев графена и влияния на расщепление слоев, необходимых для его получения механических воздействий. На основе рассмотрения особенностей жидкофазного расщепления графена с точки зрения флуктуаций, вызываемых тепловым движением атомов углерода, предложена методика и показана возможность разделения графитовых слоёв и получения порошкового графена с использованием центробежных концентраторов сегрегационного типа. Показана необходимость сочетания центрифуги с использованием поверхностно-активных веществ в качестве растворителя, так как для успешного отделения монослоев графена необходимо, чтобы энергия взаимодействия растворителя с поверхностью графена (энергия сольватации) была того же порядка, что и энергия связи между слоями. Предложено использование микрокластерной воды для повышения эффективности выхода графена без применения поверхностно активных веществ.

Ключевые слова: графен, графит, атом, углерод, энергия атома, молекула воды, монослой графена.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-136-3-8-16>

Поступила: 25.05.2021/ Допущена к опубликованию: 10.09.2021

Введение. Со времени присуждения Нобелевской премии А.К. Гейму и К.С. Новоселову в 2010 году за получение мономерного слоя углерода, получившего название графен, фактически складывается целая отрасль по его изготовлению и использованию в различных областях промышленности и техники. Графен, например, рассматривается как наиболее перспективный материал для нанoeлектроники будущего как в виде продолжения "классической" микроэлектроники, так и в варианте спинтроники, нейросетей и т.п. Считается, что полностью углеродная электроника будет избавлена от ряда трудноразрешимых проблем

современной сверхплотной электроники, таких как отвод тепла, увеличение быстродействия, достижение атомных размеров элементов и т.п.

Теоретические работы по изучению однослойного углерода начались задолго до получения реальных образцов. Так, проведенные расчёты 30-х годов прошлого века показали, что свободная двумерная плёнка должна быть термодинамически нестабильной. Монослойные структуры в связи с этим получали лишь на поверхности объёмных материалов.

Первые опыты по изготовлению одиночных углеродных слоёв были сделаны только в 60-х годах с использованием коллоидных растворов оксида графита и с применением методов химического осаждения углеводородов на металлические подложки и на их карбиды. Другие исследования показали, что высокотемпературная обработка карбида кремния с испарением кремния приводит к получению однослойной углеродной плёнки. Однако все попытки привели к получению плёнки толщиной не менее 20 слоёв, которая по своей сути не являлась графеном.

Новый этап развития графена начался с получением однослойных и двухслойных образцов в 2004 году, когда учёные А.К. Гейм и К.С. Новоселов с помощью многократного использования адгезионной ленты отделили монослой графена от объёмного графита и перенесли его на кремниевую подложку с окислом толщиной 300 нм. После демонстрации в этих работах уникальных электронных свойств графена началось бурное развитие графеновых исследований. Параллельно изучались разнообразные свойства графена, которые до этого были лишь теоретически предсказаны, исследовались новые методы получения экспериментальных образцов.

О вопросах применения графена. Высокая механическая прочность, а также высокая тепло- и электропроводимость в сочетании с возможностью химической модификации сделали графен одним из самых многообещающих материалов нашего столетия. Графен видится перспективным в качестве наполнителя композитных материалов, для получения композитных материалов с улучшенными механическими свойствами. Графеновые материалы, представляющие собой расщепленные частицы микронного размера, уже могут быть произведены в промышленных масштабах. Кроме того, для получения композитного материала их содержание может составлять до четверти объемной массы в зависимости от области применения. Литий-ионные батареи и суперконденсаторы - это еще одно из многообещающих сфер применения графена. Объясняется это тем, что необычайно большая удельная поверхность и высокая проводимость должны привести к большой ёмкости и эффективности этих устройств. Для электроники большой потенциал кроется в высокой проводимости и необычайно полевом эффекте графена. Большие изменения проводимости графена даже при слабом изменении зарядового состояния позволяют рассматривать его в качестве чувствительного материала в твердотельных газовых сенсорах.

Уже сейчас существует большой спрос на графен, связанный с его применением в следующих областях:

- композитные материалы (полимеры и пластики),
- функциональные покрытия (антикоррозийные защитные покрытия),
- в аккумуляторах для накопления заряда,
- в бетоне и других строительных материалах,
- в смазочных материалах,
- в электропроводящих красках и чернилах для гибкой печатной электроники и экранирующих покрытий,
- в тканях и текстиле для "носимой" электроники,
- научные исследования.

Цены на порошок графена зависят от чистоты, размера и толщины микрочастиц. Например, графен с такими характеристиками (Таблица 1, Рис.1-3) стоит у компании "Русграфен" около \$310 за кг [1]. На рисунке 2, представленном на их сайте, видно наличие тонких пленок, которые можно интерпретировать как малослойный графен. Однако наиболее достоверную

информацию о наличии графена и его качестве дает спектр комбинационного рассеяния (Рисунок 3). Симметрия пика при 2700 см^{-1} , называемого 2D-пиком, может служить хорошим индикатором количества слоев в графене. Асимметрия этого пика говорит о том, что чешуйки состоят из более чем 10 слоев. Романовская спектроскопия также может помочь в качественной идентификации структурных и химических дефектов в графене. Пик, называемый "дефектным", или D – пик, расположенный между 1280 см^{-1} и 1450 см^{-1} , образуется в результате внеплоскостных колебаний атомов углерода. Лежащее в основе этого пика событие требует наличия дефекта для сохранения импульса и может быть приписано структурным, или химическим дефектам. Пик, называемый G, находящийся в диапазоне между 1560 см^{-1} и 1610 см^{-1} возникает из-за внутривибрационных колебаний sp^2 - связанных атомов и иногда называется "графеновым". Считается, что отношение $D/G < 0,5$ в сочетании с четкой одиночной полосой 2D указывает на низкую плотность дефектов, менее 10^{11} дефектов на см^2 .

Таблица 1 - Характеристики порошка графена

ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Химический состав	углерод не менее 99 %
Толщина микрочастиц	от 3 до 10 нанометров
Диаметр микрочастиц	от 0,5 до 10 микрометров
Удельная проводимость*	93000 Сименс/метр
Плотность материала	$210 \pm 50\text{ кг/м}^3$

* измерение удельной проводимости проводилось четырёхконтактным способом спрессованной таблетки под давлением 70 атмосфер.



Рисунок 1 – Порошок графена

Свободный углерод в природе встречается в двух основных видах: алмаз и графит. Графит является наиболее устойчивой при нормальных условиях модификацией углерода. Существует три типа графитов с почти идеальной структурой: 1) природный графит; 2) слепевый или киш-графит (выделения графита, кристаллизующиеся в процессе выплавки чугуна); 3) искусственный графит (образуется при дегидрогенизации и полимеризации углеводородов из конденсированной или газовой фазы) [2].

2. Жидкофазное разделение графита. Графен делят на несколько категорий по способу его получения:

1. отщеплённый графен;
2. химический графен;

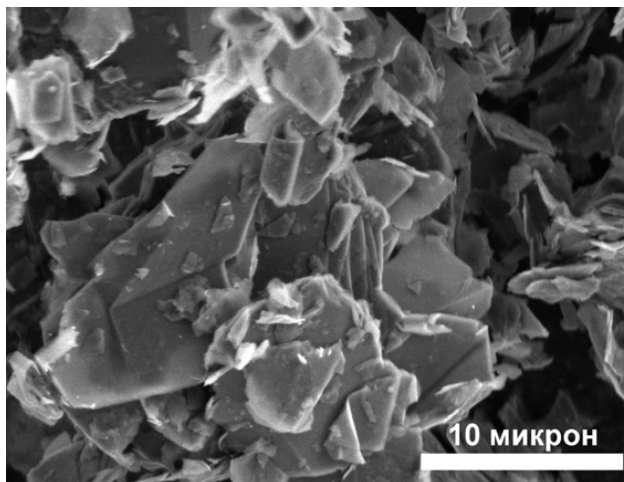


Рисунок 2 – Порошок графена в электронном микроскопе



Рисунок 3 – Спектр комбинационного рассеяния микрочастиц порошка графена

3. эпитаксиальный графен на металлах или эпитаксиальный графен на SiC;
4. CVD графен (на никеле или на меди).

Одним из разновидностей химического метода получения графена является жидкофазное расслоение графита. Именно этот метод рассмотрим более подробно.

Графит - хорошо изученный материал, представляющий слоистую структуру, а именно атомы углерода образуют слои, состоящие из сопряженных шестиугольников. Взаимодействие между слоями осуществляется слабыми ван-дер-ваальсовыми связями, энергия связи составляет 16,7 кДж/моль при 15 °С. Атомы углерода в слое образуют сетку правильных гексагонов с расстоянием между атомами углерода 1.415 Å, энергия связи – 167 кДж/моль при 15 °С [2]. Таким образом, энергия связи в слое более чем в десять раз превышает энергию взаимодействия между слоями, что во многом обуславливает как физические и химические свойства графита, так и возможность внедрения в межслоевое пространство и разделение на отдельные слои (графен). С материаловедческой точки зрения однослойный графен, пожалуй, это не материал, а вещество, более того это отдельная "молекула" и, надо сказать, не самая большая из известных. С химической же точки зрения однослойный графен – это полимер, можно сказать это всего одна "молекула" полимера с массой около пикограмма и состоящая из 10^9 атомов.

Рассмотрим вероятности расщепления слоев графена с точки зрения флуктуаций, вызываемых тепловым движением атомов углерода. Используем для анализа распределения энергии атомов максвелловское распределение по энергии:

$$f = \frac{2}{\sqrt{\pi}}(kT)^{-3/2}x^{1/2}e^{-x/(kT)} \quad (1)$$

здесь x – энергия атома, T – температура, k – постоянная Больцмана.

Тогда количество атомов, имеющих энергию выше энергии ван-дер-ваальсовской связи слоев графена $\varepsilon = 2,7 \cdot 10^{-20}$ Дж/ атом (16,7 кДж/моль), будет определяться интегралом

$$n = \frac{2N}{\sqrt{\pi}}(kT)^{-3/2} \int_{\varepsilon}^{\infty} x^{1/2}e^{-x/(kT)} dx \quad (2)$$

Для вычисления определенного интеграла (2) воспользуемся методом Монте-Карло.

Расчеты с использованием набора 500 000 случайных чисел показывают, что только около 0,2% атомов углерода имеют энергию превышающую энергию ван-дер-ваальсовского взаимодействия.

Использование центрифугирования, очевидно, поможет разделению слоев, так при использовании центрифуги радиусом 40 см, при частоте вращения 3 000 оборотов в минуту, энергия центробежного вращения этой "молекулы" составит около 4,7 кДж/моль. Средняя энергия теплового движения этой "молекулы" при температуре 15 °С - около 7,2 кДж/моль. Сделаем анализ вероятности расщепления слоев графена под действием этих двух факторов - теплового движения и вращательного движения "молекулы" в центрифуге. Считаем, что распределение этих энергий (x) среди атомов углерода имеет нормальное (гауссовское) распределение:

$$f = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

Принимаем среднее значение энергии (суммарная указанных энергий, влияющую на расщепление слоев графена) $\mu = 11,9$ кДж/моль (4,7кДж/моль+7,2кДж/моль). Найдем вероятность того, что эта суммарная энергия (x) превысит энергию ван-дер-ваальсовского взаимодействия слоев (16,7 кДж/моль), приняв стандартное отклонение энергии $\sigma = 4$ кДж/моль. Тогда стандартное нормальное распределение для суммарной энергии, влияющей на расщепление слоев будет $z = \frac{x-\mu}{\sigma} = 1,20$, из таблиц распределения стандартного нормального распределения находим, что вероятность достижения "молекулы" графена энергии Ван-дер-Ваальсовской связи около 11 %. Вероятность чувствительна к параметрам центрифугирования - диаметру центрифуги, скорости вращения. Так, при уменьшении диаметра до 20 см вероятность расщепления уменьшается до 1 %, при диаметре 100 см и скорости вращения 1500 оборотов в минуту вероятность равна 3%. Таким образом, подобрав параметры центрифугирования, можно существенно повысить вероятность расщепления слоев графена, что делает его применение очень эффективным для получения порошкового графена.

Оказалось, что использование поверхностно-активных органических жидкостей в сочетании с механическим воздействием позволяет резко увеличить разделение слоев и получать однослойный графит. При подобном подходе используется слоистая структура кристаллического графита, благодаря которой возможны проникновение атомов и молекул различной природы в пространство между слоями и увеличение расстояния между слоями. В результате оказывается возможным разделение графитовых слоёв при механическом воздействии на них. Длительная ультразвуковая обработка и центрифугирование мелкодисперсного графита в присутствии поверхностно-активного вещества (ПАВ) приводят к образованию некоторой суспензии, состоящей из однослойных листов графена, а также части графена, состоящего из нескольких слоёв. Суспензия, подготовленная подобным способом, содержит не только однослойные графеновые "чешуйки", но также изогнутые листы,

кроме того, достаточно много и двухслойных или многослойных модификаций графена [2]. Поперечные размеры этих объектов во всех случаях составляли несколько микрометров. Для последовательного отделения монослоев и их стабилизации необходимо, чтобы энергия взаимодействия растворителя с поверхностью графена (или энергия сольватации) была примерно равна энергии связи между слоями. Поэтому выбор растворителя для успешного диспергирования графита имеет большое значение. Так, простое использование додецилбензилсульфата натрия при действии ультразвука на порошок графита в воде даёт набор чешуек от 1-го до 16 слоев графена, а из этого числа уже 3% составляют однослойные чешуйки. Поскольку данные по энергиям сольватации графена отсутствуют, можно для выбора растворителя пользоваться результатами работ по диспергированию углеродных нанотрубок, проводимых в различных растворителях.

Сочетание центрифугирования и применения ПАВ, по-видимому, являются удачным инструментом для получения графена. Нами предлагается использовать для механического воздействия центробежные концентраторы сегрегационного типа в сочетании с применением ПАВ. Их применение позволило бы сделать получение графена более технологичным и массовым. Принцип действия всех центробежных концентраторов заключается в принудительном разделении обрабатываемого материала, подаваемого в виде пульпы на две фракции: тяжелую (в нашем случае графит), осаждаемую в кольцевых улавливающих рифлях, вращающихся вокруг вертикальной оси обогатительной чаши и легкую (графен), выносимую восходящим потоком пульпы через край чаши за пределы концентратора. В сегрегационных концентраторах, дополнительно к центробежным силам на пульпу дополнительно действуют высокочастотные вибрации чаши, регулируемые по частоте и амплитуде. Такие вибрации могут оказать дополнительный эффект, помогающий внедрению молекул ПАВ между слоями графена. Кроме того, такое взаимодействие сил, создающее режимы уплотнения и разрыхления материала с его интенсивным встряхиванием, наилучшим образом обеспечивает эффективность сегрегационного обогащения, основанного на создании условий для проникновения мелких и тонких тяжелых частиц через зазоры между легкими частицами и вытеснения последних из канавок чаши. В центробежных концентраторах центробежное ускорение может достигать значений 800g (g-ускорение свободного падения). Учитывая, что плотность графита и графена отличаются почти в 10 раз, можно ожидать эффективное разделение их в таком концентраторе. Результаты использования центробежных концентраторов сегрегационного типа, отработка оптимальных режимов его работы в сочетании с различными ПАВ будут описаны в следующих работах авторов статьи.

Интересно рассмотреть причины, по которым обычная вода не может приводить к расщеплению слоев графена. Ведь размер молекулы воды около 2,5 Å и она вполне могла бы проникая между слоями графена, расстояние между которыми 3,44 Å и приводить к их расщеплению за счет ослабления ван-дер-ваальсовского взаимодействия между слоями атомов углерода.

Особенности химического строения молекулы воды и слабые связи, обусловленные электростатическими силами и донорно-акцепторными взаимодействиями между соседними атомами водорода и кислорода в молекулах воды, создают благоприятные возможности для образования направленных межмолекулярных водородных связей (О-Н-О) с соседними молекулами воды, связывающие их в отдельные пространственные межмолекулярные ассоциаты, состав которых выражается общей формулой $(\text{H}_2\text{O})_n$. Именно создание межмолекулярных ассоциаций из большого количества молекул воды объясняет тот факт, что несмотря на малый размер одной молекулы вода не проникает в межслойное пространство графена. Отличительной особенностью водородной связи является сравнительно низкая прочность; она в 5-10 раз слабее химической ковалентной связи [3]. По энергии водородная связь занимает промежуточное положение между химическими связями и межмолекулярными ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями, удерживающими молекулы в твердой или жидкой фазе. Энергия водородной связи составляет около 40 кДж/моль, в то время как энергия

ковалентной связи ОН связи в воде - 450 кДж/моль. Водородная связь обладает свойством "кооперативности", т.е. образование одной водородной связи способствует образованию следующей водородной связи, она в свою очередь способствует образованию следующей водородной связи и т.д. Молекулы воды в жидком состоянии в нормальных условиях подвижны и способны совершать различные колебательные движения, также вращения вокруг своей оси и хаотические и направленные перемещения, за счет чего отдельные молекулы могут "перескакивать" из одного места в другое в объеме воды за счет кооперативных взаимодействий. В результате в водных растворах возможен отрыв протона H^+ от одной молекулы воды и последующим перемещением H^+ к соседней молекуле воды с образованием ионов гидроксония состава: H_3O^+ , H_5O^{2+} , H_7O^{3+} , и т.п. Это приводит к тому, что вода должна рассматриваться как ассоциированная жидкость из совокупности молекул H_2O , соединённых водородными связями и слабыми межмолекулярными ван-дер-ваальсовыми силами [3]. При рассмотрении воды как простой совокупности одиночных молекул H_2O её плотность должна быть 1,84 г/см³, а температура кипения - 63,5 °С. Как известно, при нормальных условиях эти параметры составляют 1 г/см³ и 100 °С соответственно. Если сравнить воду, считая ее гидридом кислорода - H_2O с ее аналогами по 6 группе Периодической системы Менделеева гидридами серы, селена и теллура: H_2S , H_2Se , H_2Te , рассматривая их как мономолекулярные соединения, то в жидком состоянии вода существовала бы в диапазоне температур от -90 °С до -70 °С. Однако у воды из-за наличия водородных связей между молекулами воды диапазон совсем другой. Распределение молекул в малой окрестности молекулы воды имеет определенную упорядоченность, немного напоминающую кристаллическую, хотя и более размытую. По этой причине структуру жидкости можно назвать квазикристаллической или кристаллоподобной, т. е. обладающей небольшой симметрией и характеризующейся слабой упорядоченностью во взаимном расположении атомов или молекул.

Методом Рамановской спектроскопии Р. Сейкали (Беркли (США)) в 2005 г. рассчитал возможное число водородных связей в зависимости от количества молекул воды в кластерах воды [4]. Ими было показано, что водородные связи между молекулами воды динамичны; они постоянно разрываются и образуются вновь. Установлено и возможное число водородных связей (до 100) в зависимости от количества молекул воды (до 250) в кластерах [5]. В [6] приводят данные о существовании кластеров воды, состоящих из 280 молекул воды размером до 3 нм. Таким образом, создание больших кластеров воды может объяснить необходимость поиска ПАВ для расщепления слоев графена вместо использования для этой цели обычной воды. По данным [7] методами ИК и фемтосекундной лазерной спектроскопии и масс-спектрометрии показано, что наиболее устойчивые кластерные ионы вида $(H_2O)_2O H_3O^+$ или $(H_2O)_{21} H^+$, которые образуются из 20 молекул H_2O и протона в составе иона гидроксония H_3O^+ .

Группа ученых из США запатентовала метод расщепления больших кластеров воды [8-10], и получения стабильных микрокластеров, состоящих из меньшего числа молекул. По данным [8], им удалось стабилизировать микрокластеры, содержащие 5-6 молекул воды, имеющих плоскую конфигурацию. В этом случае можно говорить, что минимальный размер таких микрокластеров в одном из трех измерений составляет размер атома кислорода (около 0,48 А). Очевидно, что вероятность внедрения таких микрокластеров между слоями углерода в графите достаточно большая, чтобы при использовании такой воды можно было бы обойтись без ПАВ при расслоении графита и получении графена. По данным [8] микрокластеры имеют заряд, т.е. представляют собой практически заряженные ионы. Средняя плотность зарядов и средняя плотность дипольных моментов в графите равны нулю, поэтому возникающие дальнедействующие силы между слоями углерода в графите имеют флуктуационное происхождение, и взаимодействие между микрокластерами и слоями углерода в графите будет иметь характер взаимодействия иона с наведенными диполями в слоях углерода. Энергия взаимодействия такого рода по порядку близка к энергии

водородной связи и лежит в диапазоне 40-50 кДж/моль, что значительно превышает энергию ван-дер-вааальсовского взаимодействия между слоями углерода (16 кДж/моль) в графите. Таким образом, можно ожидать высокую эффективность разделения слоев углерода графита микрокластерной водой при дополнительном механическом воздействии в центробежном концентраторе сегрегационного типа без применения ПАВ.

3. Выводы. Проведен анализ химического метода получения графена на основе жидкофазного расслоения слоев графита, основанного на применении центробежных концентраторов сегрегационного типа. Как показывает анализ, необходимость применения поверхностно активных веществ (ПАВ) при получении графена связана с тем, что большая часть молекул воды находится в виде кластеров, состоящих из большого количества молекул воды, связанных водородной связью (более 20 молекул), что мешает им эффективно проникать между слоями углерода. Предложено применение воды со стабильными кластерами (микрокластерами), состоящими из небольшого количества (5-6) молекул воды, что дает возможность получения графена при жидкофазном расслоении слоев графена без применения ПАВ.

Предложена новая технология получения графена с использованием центробежных концентраторов сегрегационного типа. Одна из возможных разновидностей такой технологии предполагает использование микрокластерной воды.

Список литературы

- 1 Графеновый порошок. [Электронный ресурс] - URL: <https://www.rusgraphene.ru/product-page/graphene-powder> (дата обращения: 05.04.2021).
- 2 Губин С.П., Ткачев С.В. Графен и материалы на его основе // Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2010. – Т. 2. - № 1-2. - С. 99-137.
- 3 Игнатов И., Мосин О.В., Великов Б. Математические модели, описывающие структуру воды. Институт Государственного управления, права и инновационных технологий (ИГУПИТ) Интернет-журнал "Науковедение". 2013. №3. [Электронный ресурс] - URL: <http://publ.naukovedenie.ru>. (дата обращения: 05.12.2020)
- 4 Saykally R. et al. Unified Description of Temperature-Dependent Hydrogen Bond Rearrangements in Liquid Water // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2005. – Т. 102. - № 40. - С. 14171–14174.
- 5 Sykes M. Simulations of RNA Base Pairs in a Nanodroplet Reveal Solvation Dependent Stability // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. -2007. – Т. 104. - № 30. – P. 12336–12340.
- 6 Loboda O., Goncharuk V. Theoretical Study on Icosahedral Water Clusters // Chemical Physics Letters. – 2010. – Т. 484. - № 4–6. – P. 144–147.
- 7 Cui J., Liu H., Jordan K.D. Theoretical Characterization of the (H₂O)₂₁ Cluster: Application of an n-body Decomposition Procedure // J. Phys. Chem. – 2006. - Vol. 110. - P. 18872-18878.
- 8 Jingong Pan, Lee H Lorenzen, Francisco Carrillo, Huawen Wu, MengChu Zhou, Zhi Y. Wang. Clustered Water and Bio-signal Networks. 0-7803-8566-7/04/\$20.00 2004 IEEE.
- 9 Lorenzen L.H. Process for preparing microclustered water // United States Patent 5,711,950 (1998).
- 10 Lorenzen L.H. Microclustered water // United States Patent 6, 033, 678 (2000).

Қ.Н. Жангозин¹, Т.Қ. Жаңаберген², Ж.Б. Каргин³

¹ "Ұлттық аграрлық ғылыми-білім беру орталығы" КеАҚ, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

² "Агроинженерия ғылыми-өндірістік орталығы" ЖШС, Алматы, Қазақстан

³ "Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті" КеАҚ, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

Ұнтақ графенді өндірудің жаңа әдісі туралы

Аннотация. Соңғы онжылдықта моноатомдық қабаты көміртектің ерекше қасиеттеріне байланысты - графенге деген қызығушылықтың тез өсуі байқалды. Мақалада оның кейбір сипаттамалары мен графенді алу әдістері келтірілген. Графеннің атомдары мен қабаттарының энергияларын, оны механикалық әрекеттермен алу үшін қажет қабаттардың бөлінуіне әсеріне талдау жүргізіледі. Графеннің сұйық фазалық бөлінуінің ерекшеліктерін көміртек атомдарының жылулық қозғалысы әсерінен болатын тербелістер тұрғысынан қарастырудың негізінде техника және графит қабаттарын бөлу және центрифугалық сегрегацияны қолданып ұнтақ графен алу мүмкіндігі қарастырылған. Типті концентраторлар көрсетілген. Центрифуганы еріткіш ретінде беттік-белсенді заттарды қолданумен біріктіру қажет екендігі көрсетілген, өйткені графеннің бір қабаттарын табысты бөлу үшін еріткіштің графен бетімен өзара әрекеттесу энергиясы еріту

энергиясымен бірдей болуы керек. Қабаттар арасындағы байланыс энергиясы ретіндегі шама графеннің өнімділігін арттыру үшін микрокластерлі суды беттік-белсенді заттарды қолданбау ұсынылады.

Түйін сөздер: графен; графит; атом; көміртек; атом энергиясы; су молекуласы, графеннің бір қабаты.

К. Zhangozin¹, **Т. Zhanabergenov**², **Ж. Kargin**³

¹ NPJSC "National Agrarian Science and Educational Centre", Nur-Sultan, Kazakhstan

² LLP "Scientific Production Center of Agricultural Engineering", Almaty, Kazakhstan

³ L.Gumilyov Eurasian National University", Nur-Sultan, Kazakhstan

A new method for producing powdered graphene

Abstract. Over the last decade, there has been a rapid increase in interest in graphene, a monoatomic layer of carbon associated with its unique properties. The article presents some of its characteristics and methods for obtaining graphene. The authors have carried out an analysis of the energies of atoms and layers of graphene and the effect of mechanical action on the splitting of layers. The article proposes a methodology and demonstrates a possibility of separating graphite layers and producing powdered graphene using segregation-type centrifugal concentrators based on consideration of the peculiarities of liquid-phase splitting of graphene in terms of vibrations caused by the thermal motion of carbon atoms. It is necessary to combine a centrifuge with the use of surfactants as a solvent, since for the successful separation of graphene monolayers it is necessary that the interaction energy of the solvent with the graphene surface solvation energy be of the same order of magnitude as the binding energy between the layers. It is proposed to use microcluster water to increase the efficiency of graphene yield without the use of surfactants.

Keywords: graphene; graphite; atom; carbon; atom energy, water molecule, graphene monolayer.

References

- 1 Grafenovyj poroshok [Graphene powder]. [Electronic resource] - Available at: <https://www.rusgraphene.ru/product-page/graphene-powder> (Accessed: 05.04.2021).
- 2 Gubin S.P., Tkachev S.V. Grafen i materialy' na ego osnove, Radioelektronika. Nanosistemy'. Informatsionny'e tekhnologii [Graphene and materials based on it, Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology], 2, 1-2(2), 99-137 (2010). [in Russian]
- 3 Ignatov I., Mosin O.V., Velikov B. Matematicheskie modeli, opisy'vayushhie strukturu vody'. Institut Gosudarstvennogo upravleniya, prava i innovatsionny'kh tekhnologij (IGUPIT) Internet-zhurnal "NAUKOVEDE-NIE" [Mathematical models describing the structure of water. Institute of Public Administration, Law and Innovative Technologies (IGUPIT) Online magazine "Science"], 2013. №3. [Electronic resource] - Available at: <http://publ.naukovedenie.ru>. (Accessed: 05.12. 2020).
- 4 Saykally R. et al. Unified Description of Temperature-Dependent Hydrogen Bond Rearrangements in Liquid Water, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 40(102), 14171–14174 (2005).
- 5 Sykes M. Simulations of RNA Base Pairs in a Nanodroplet Reveal Solvation-Dependent Stability, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 30(104), 12336–12340 (2007).
- 6 Loboda O., Goncharuk V. Theoretical Study on Icosahedral Water Clusters, Chemical Physics Letters, 4–6(484), 144–147 (2010).
- 7 Cui J., Liu H., Jordan K.D. Theoretical Characterization of the (H₂O)₂₁ Cluster: Application of an n-body Decomposition Procedure, J. Phys. Chem., 110, 18872-18878 (2006).
- 8 Clustered Water and Bio-signal Networks. Jingong Pan, Lee H Lorenzen, Francisco Carrillo, Huawei Wu, MengChu Zhou, Zhi Y. Wang. 0-7803-8566-7/04/\$20.00 2004 IEEE.
- 9 Lorenzen L.H. Process for preparing microclustered water, United States Patent 5, 711, 950 (1998).
- 10 Lorenzen L.H. Microclustered water, United States Patent 6, 033, 678 (2000).

Сведения об авторах:

Жангозин К.Н. - **основной автор**, главный менеджер НАО "Национальный аграрный научно-образовательный центр", Нур-Султан, Казахстан.

Жанабергенев Т.К. - с.н.с., ТОО "Научно-производственный центр сельскохозяйственного машиностроения", Алматы, Казахстан.

Каргин Ж.Б. - директор департамента коммерциализации технологий Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Zhangozin K.N. - **The main author**, chief manager of the National Agrarian Scientific and Educational Center NJSC, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Zhanabergenov T. K. - Senior Researcher, Research and Production Center of Agricultural Engineering LLP, Almaty, Kazakhstan.

Kargin Zh.B. - Director of the Department of Technology Commercialization of the L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.