

**В.М. Юров*, К.Н. Жангозин¹, Т.К. Жанабергенов¹, Д.Б. Каргин²**¹ТОО «Восток»,

010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Республика, д. 3/2

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,

010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2

*e-mail: exciton@list.ru

ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ ГРАФЕНА

Аннотация: Рассмотрен метод «лежащей капли» для определения поверхностной энергии твердых тел – γ . Для графита и графена этим методом были получены средние значения – $\gamma_2 = 53,6 \pm 2,1$ и $\gamma_1 = 44,8 \pm 14,7$ мДж/м². Методом раскалывания кристаллов для графита было получено среднее значения $\gamma_2 = 3250$ мДж/м², что в 60 раз превышает значение γ_2 , полученной методом «лежащей капли». Анализ обоих методов показал, что метод «лежащей капли» для определения поверхностной энергии твердых тел нельзя применять без его модификации. Нами предлагаются новые методы определения поверхностной энергии твердых тел: 1) через температуру плавления твердого тела; 2) через размерную зависимость физического свойства от толщины осаждаемого покрытия; 3) через измеряемую величину контактной разности потенциалов. Для графена получены следующие значения – $\gamma_1 = 947,1$; $\gamma_1 = 974$; $\gamma_1 = 960$ мДж/м², что на порядок выше, чем в методе «лежащей капли». Значения γ_1 нужно умножить на 3 и получим значения для графита – $\gamma_2 = 2841$; $\gamma_2 = 2922$, $\gamma_2 = 2880$ мДж/м², что незначительно отличается от метода раскалывания кристаллов.

Ключевые слова: графит, графен, поверхностная энергия, метод «лежащей капли», раскалывание кристалла, твердое тело.

Введение. Использование поверхностных явлений в производственной деятельности человека позволяет интенсифицировать существующие технологические процессы. Для техники важны такие поверхностные явления, как смазочное трение и износ, контактные взаимодействия, структурные изменения в композиционных материалах, а также электрические и электрохимические процессы и явления на поверхностях твердых тел. Знание поверхностных явлений в живой природе позволяет сознательно влиять на биологические процессы с целью повышения продуктивности сельского хозяйства, развития микробиологической промышленности, расширения возможностей медицины и ветеринарии. В биологии поверхностные явления играют важную роль, прежде всего, на клеточном, и молекулярном уровнях организации живых систем. Различные биологические мембраны отграничивают клетку от внешней среды и обеспечивают её микрогетерогенность. На мембранах клетки происходят фундаментальные для жизни процессы. Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления.

Графен, открытый 20 лет тому назад [1, 2], представляет собой удивительный материал, применяемый в различных областях человеческой деятельности (рис. 1) [3-5]. Графен – двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом ($R(l) = a = 0,246$ нм – постоянная решетки), находящихся в

состоянии sp^2 – гибридизации. Углеродные атомы в графеновых слоях находятся в трехкоординированном состоянии, т.е. каждый из них образует ковалентные связи с тремя соседями. В результате образуется сетка из гексагонов, вершинами которых являются атомы углерода, углерод-углеродные связи образуют соответствующие стороны. Методы получения графена довольно разнообразны, обзор которых проведен в работах [2-6]. В работах [7-9] предложена оригинальная инновационная методика для получения графена микрокластерной водой в сочетании с ультразвуком и электрическим полем.

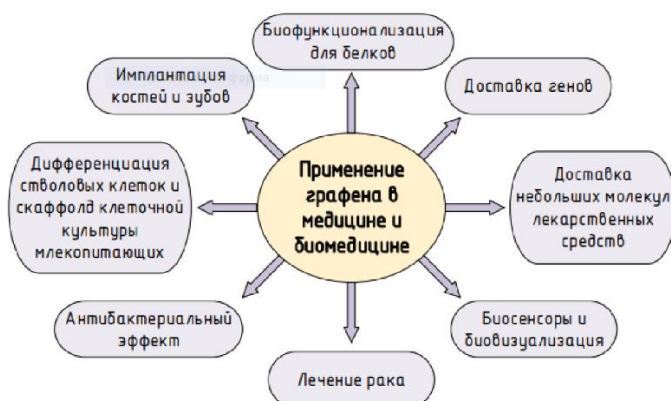


Рисунок 1 – Применение графена в медицине, биологии и биомедицине [6]

Целью настоящей статьи является краткий обзор определения поверхностной энергии (ПЭ) графена и предложение собственного теоретического и экспериментального метода определения ПЭ графена, играющей важную роль во всех процессах человеческой деятельности.

Определения поверхностной энергии графита и графена. В настоящее время известно более двадцати методов определения ПЭ (γ). Методам определения ПЭ твердых тел посвящено много монографий, статей и патентов (смотри библиографию в работах [10, 11]). Для графена и графита используют методы ПЭ: метод «лежащей капли» (рис. 2а) и метод раскалывания (расщепления) кристаллов (рис. 2б).

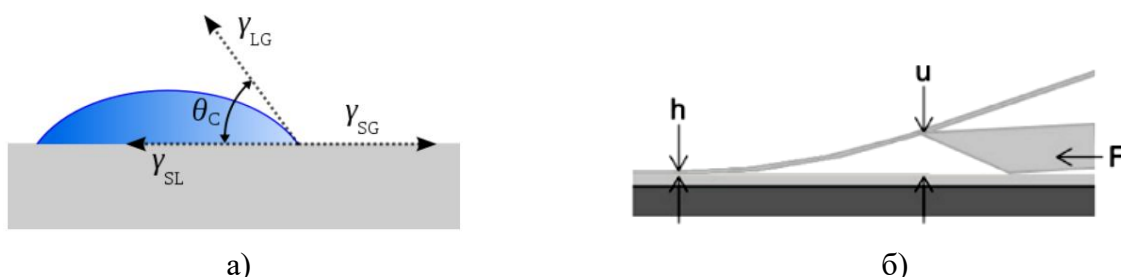


Рисунок 2 – Иллюстрация метода лежащей капли с жидкой каплей частичное смачивание твердой основы (а); расщепление кристаллов с помощью кварцевого клина (б)

В методе лежащей капли используется уравнение Юнга:

$$\cos \theta_C = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG}, \quad (1)$$

где γ_{SG} , γ_{SL} – величины поверхностных энергий на границах твердое тело/пар и твердое тело/жидкость соответственно; γ_{LG} – величина поверхностной энергии на границе жидкость/пар (энергия поверхностного натяжения).

В методе И.В. Обреимова раскалывания (расщепления) кристаллов производится по формуле:

$$\gamma = \frac{E \cdot h^2}{24(1 - \mu^2)} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \mu^2}, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, h – толщина пленки, u – угол между касательной к изогнутому контуру отщепившейся пластинки и направлением движения устья развивающейся трещины.

В работе [12] методом лежащей капли ПЭ графена и оксида графена составляет 46,7 и 62,1 мДж/м² соответственно, в то время как чешуйки природного графита демонстрируют свободную поверхностную энергию 54,8 мДж/м² при комнатной температуре. В работе [13] показано, что ПЭ взвешенного монослойного графена равна нулю, что свидетельствует о его супергидрофобности. Это следует из уравнения (1), где угол контакта θ любой капли жидкости на подвешенном монослое графена равен 180°. Этот экспериментальный результат был подтвержден теоретически методом молекулярной динамики. В работе [14] отмечено: одним из преимуществ угла смачивания для измерения ПЭ является то, что это широко используемый, относительно простой эксперимент, не требующий дорогостоящего специализированного оборудования. В этой работе было получено, что ПЭ базисной плоскости графита равна 63±7 мДж/м², независимо от размера чешуек графита. Поверхностная энергия базисной плоскости графена составляет 62±4 мДж/м², независимо от размера нанолита. В последней работе [15] показано, что средние значения ПЭ графена, оксида графена и графита составляют соответственно 44,8 ± 14,7, 47,9 ± 7,2 и 53,6 ± 2,1 мДж/м². Обратимся к предыдущей статье этих авторов и представим их результаты в виде таблицы 1 [16].

Таблица 1 – Статические углы контакта и связанная с ними свободная энергия поверхности

Подложка	Жидкость	$\theta \pm 1$	γ , мДж/м ²
Si	Вода	64	66,75
Si/графен	Вода	92	42,49
Си-чистый	Вода	68	60,42
Си-чистый	5.123M NaCl	87	44,76
Си/графен	Вода	86	45,27
Си/графен	1.256M NaCl	77	51,06
Си/графен	2.022M NaCl	71	56,72
Си/графен	2.468M NaCl	80	48,85
Си/графен	2.775M NaCl	72	55,65
Си/графен	3.677M NaCl	75	52,74
Си/графен	5.173M NaCl	76	51,87

Наиболее надежный вариант метода определения γ , основанный на расщеплении кристалла, был предложен в 1930 г. И.В. Обреимовым [17]. Идея этой работы заключается в следующем. От кристалла слюды по плоскости спайности отщепляется пластинка, которая под влиянием момента сил, действующего против поверхностных сил, частично изгибается (рис. 26). Это пластинка может быть использована в качестве динамометра, измеряющего отщепляющее усилие. Недавно в работе [18] проведено исследование посредством расщепления слюды способом, аналогичным подходу Обреимова, но уже используя современные методы исследования. Энергия адгезии: $W_a = 2\gamma = 0,81 \pm 0,38$ Дж/м², у Обреимова [17] $W_a = 0,76$ Дж/м², в работах [19, 20] $W_a = 0,6 \pm 0,8$ Дж/м², а в нашей теоретической работе $W_a = 0,809$ Дж/м² [21].

Метод Обреимова использовался для графита в работах [21-24], анализ которых был проведен в работе [25]. ПЭ призматической грани графита оказалась равной $\gamma_a = 1500-5000$ мДж/м², ПЭ базисной грани графита оказалась равной $\gamma_c = 130-150$ мДж/м². Это значительная разница между значениями для графита (смотри, выше). Причина, по которой методы лежащей капли и расщепление кристаллов дают значения с разницей на порядок величин заключается в следующем: во-первых, классическое уравнение Юнга, полученное на основании термодинамического подхода, не работает. Поэтому уравнение краевого угла смачивания требует серьезного пересмотра. И такой пересмотр был сделан в работе [26]. Новое уравнение краевого угла смачивания называют сейчас уравнением Юнга-Верхоломова:

$$\cos \theta_c = (\gamma_A - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG}, \quad (3)$$

где γ_A – сила адгезии на границе твердое тело/пар; γ_{SL} , γ_{LG} – поверхностные натяжения жидкости на границах раздела жидкость/твердое тело и жидкость/пар, соответственно.

Во-вторых, метод лежащей капли дает значение поверхностного натяжения жидкости на твердом теле, а не саму поверхностную энергию этого же твердого тела. Это значит, что все работы [12-16], основанные на методе лежащей капли не могут давать значение ПЭ твердого тела. Это связано с тем, что по Гиббсу необходимо различать поверхностную энергию и поверхностное натяжение твердых тел, они совпадают только для жидкостей. На сегодня связь между величиной поверхностной энергии γ и поверхностным натяжением σ определяется уравнением Шаттльворта:

$$\gamma = \sigma + \Omega \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_T \quad (4)$$

Здесь Ω – площадь поверхности твердого тела; T – температура. Значит, в таблице 1 нужно заменить величину γ на величину σ . Сказанное подтверждается тем, что в табл. 1 для меди Cu с водой получено $\gamma = 60.42$ мДж/м². Однако, точное измерение поверхностной энергии меди методом «нулевой ползучести» [27] дано в табл. 2.

Таблица 2 – Поверхностная энергия чистых металлов [27]

Металл	γ , мДж/м ²	Металл	γ , мДж/м ²	Металл	γ , мДж/м ²
Ag	1205	δ -Fe	1910	Si	2130
Au	1410	γ -Fe	2170	Sn	673
Al	1140	Ga	767	Ta	2480
Bi	504	Cd	820	Ti	1938
Cd	675	In	633	Tl	562
Co	2424	Mo	2630	V	1950
Cr	2090	Nb	2210	W	2690
Cu	1520	Ni	1940	Zn	868

Из сравнения таблиц 1 и 2 видно, что метод лежащей капли не подходит для графита и графена. Для графена не подходит и метод Обреимова, так как имеется одна одноатомная плоскость, и потому раскалывать нечего.

Наши методы определения поверхностной энергии графена. В работе [28] показано, что ПЭ объемного кристалла (графита) γ_2 с точностью до 3% равна:

$$\gamma_2 = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m [\text{J/m}^2], \quad (5)$$

где T_m – температура плавления графена ($T_m = 4510$ K).

В нанослое графита (графен) нужно учесть размерный эффект и ПЭ графена становится равной γ_1 [29]:

$$\gamma_1 = \gamma_2 (1 - R(l)/R(l) + h) \approx 0,3 \gamma_2, \quad (6)$$

Уравнение (6) показывает, что ПЭ в три раза меньше ПЭ основного кристалла.

Из уравнений (5) и (6) для графена следует – $\gamma_1(\text{Гр}) = 947,1$ мДж/м². ПЭ призматической грани графита оказалась равной $\gamma_a = 1500$ -5000 мДж/м². Среднее значение $\gamma_a = 3250$ мДж/м², а $\gamma_a/\gamma_1(\text{Гр}) \approx 3$, т.е. в 3 раза меньше графита (основного кристалла). Значит для графена теоретическое значение ПЭ – $\gamma_1(\text{Гр}) = 947,1$ мДж/м². Метод лежащей капли дает, что значения ПЭ графена - $44,8 \pm 14,7$, что на порядок отличаются от нашего значения.

В работах [30-32] нами были предложены новые методы определения ПЭ. Они были основаны на размерной зависимости осаждаемого покрытия. В первом методе предусматривается измерение ПЭ путем определения зависимости микротвердости от толщины осаждаемого покрытия. Во втором методе предусматривается измерение ПЭ по зависимости электропроводности Ω покрытия от его толщины h . Формулы эти таковы:

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{h} \right), \quad \Omega = \Omega_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{h} \right), \quad (7)$$

где μ – микротвердость осаждаемого покрытия; μ_0 – «толстого» образца; h – толщина осаждаемого покрытия, Ω_0 – электрическая проводимость массивного образца.

Параметр d связан с ПЭ σ формулой:

$$d = \frac{2\gamma \cdot \nu}{RT}, \quad (8)$$

где γ – ПЭ массивного образца (графита); ν – объем одного моля; R – газовая постоянная; T – температура.

В координатах $\mu \sim 1/h$ ($1/h$ – обратная толщина осаждаемого покрытия) получается прямая, тангенс угла наклона который определяет d , и по формуле (8) рассчитывается ПЭ осаждаемого покрытия (γ).

Рассмотрим теперь определение ПЭ графита, осаждаемого на кварцевую пластину магнетронным методом. Результаты показаны на рисунке 3.

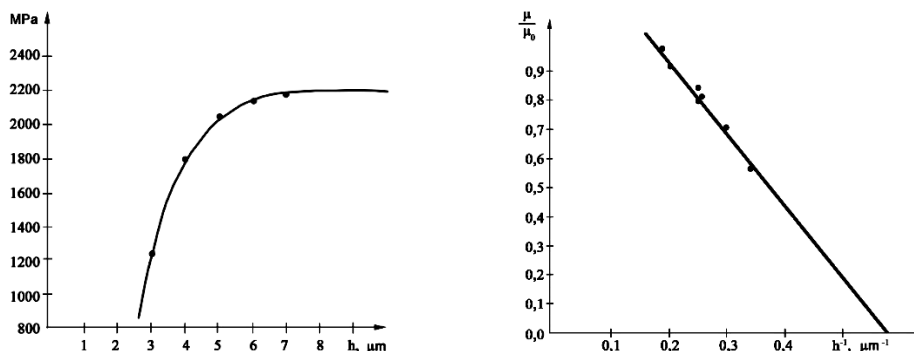


Рисунок 3 – Зависимость микротвердости от толщины (а) и обратной толщины (б) покрытия графена на кварцевой подложке.

В координатах $\mu/\mu_0 \sim 1/h$ экспериментальная кривая спрямляется в соответствии с формулой (7), давая значение $h = 0,8$ мкм. Для графена $\nu = 5,3$ см³/моль и из соотношения (8) для ПЭ получено $\gamma(\text{Гр}) = 974$ мДж/м². Это, в принципе, согласуется с полученным значением $\gamma(\text{Гр}) = 947,1$ мДж/м² в пределах ошибки экспериментов.

Чтобы определить ПЭ твердых тел нами разработан прибор [33], суть которого состоит в следующем. Разработанный нами способ измерения контактной разности потенциалов (КРП) имеет особенности: КРП измеряется осциллографом, регистрирующим напряжение и частоту периодически изменяющейся КРП между контролируемой образцом и измерительным электродом ИЭ датчика прибора; экранирование элементов датчика и проводов; усиление регистрируемой КРП; подготовка поверхностей детали и датчика к измерению КРП. В качестве регистратора КРП нами был выбран портативный цифровой осциллограф Micsig TO1104 планшетного типа, имеющий чувствительность измерения электрического напряжения 0,5 мВ. Датчик, подключаемый к осциллографу, авторы разработали сами. Основную часть конструкции датчика прибора измерения КРП составляет электронная схема, которая позволяет контактирующему с металлической деталью ИЭ датчика работать в автоколебательном режиме. Кроме того, в состав датчика входит предварительный усилитель сигнала. Комплекс измерения КРП, разработанный авторами, представлен на рис. 3а. Принципиальная схема датчика представлена на рисунке 4.

Энергия γ вычислялась по формуле:

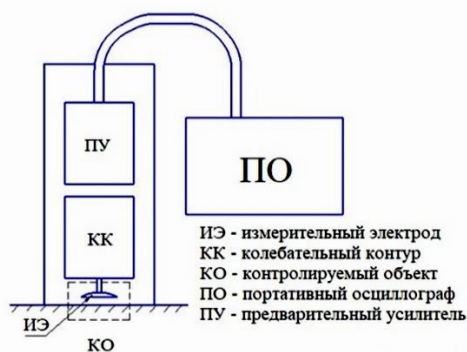
$$\gamma = 0.028 \cdot 10^{19} \cdot \frac{\varphi - U \cdot 1.6022 \cdot 10^{-19}}{S} \cdot \left(\frac{\hat{I} \hat{A}}{\hat{I}_1} \right)^{0.3358} + 0.083. \quad (9)$$

Все обозначения в формуле (9) даны в работе [33]. Здесь U = КРП. Чешуйки графена для измерения КРП изготавливались по методике [8] путем расщепления графита микрокластерной водой. Измерение КРП для графена дало результат – $U = 4,75$ эВ и постановка его в уравнение (9) (с остальными параметрами) дало результат $\gamma(\text{Гр}) = 960$ мДж/м².

Если теперь сравнить значения величин: $\gamma(\text{Гр}) = 974$ мДж/м²; $\gamma(\text{Гр}) = 947,1$ мДж/м² и $\gamma(\text{Гр}) = 960$ мДж/м² то можно утверждать, что метод лежащей капли, не пригоден для определения ПЭ графена, а может быть и для других твердых тел.



а)



б)

Рисунок 4 – Комплекс измерения контактной разности потенциалов (а);
принципиальная схема датчика (б)

Закключение. Первое экспериментальное определение ПЭ твердых тел было начато Тамманом почти 100 лет тому назад (1927) и продолжается до сих пор (Федоров, 2023). Метод «лежачей капли» не требует специального дорогого оборудования и этим методом для графена и графита за последние 15 лет получены значения ПЭ близкие по своему значению, но для графита эта величина ПЭ на порядок отличается от метода раскалывания кристаллов. Анализ этих методов показал, что, несмотря на простоту исполнения метода «лежачей капли», его нельзя применять для определения ПЭ твердых тел. В статье предлагаются новые методы определения ПЭ твердых тел.

Список литературы

1. Electric field effect in atomically thin carbon films / K.S. Novoselov et al // Science. – 2004. – V. 306, № 5696. – P. 666-669.
2. Новоселов К.С. Графен: материалы Флатландии / К.С. Новоселов // УФН. – 2011. – Т. 181, № 12. – С. 1299-1311.
3. Баимова Ю.А. Графен, нанотрубки и другие углеродные наноструктуры / Ю.А. Баимова, Р.Р. Мулюков. – М.: Российская академия наук, 2018. – 212 с.
4. Zhang T. Graphene. From Theory to Applications / T. Zhang. – Springer, 2022. – 142 p.
5. Gupta R.K. 3D Graphene. Fundamentals, Synthesis and Emerging Applications / R.K. Gupta. – Springer, 2023. – 441 p.
6. Гаршев А.В. Мониторинг развития и внедрения технологий получения графена, его производных, других 2D кристаллов и производства изделий на основе 2D кристаллов в Российской Федерации и мире / А.В. Гаршев. – М.: Отчет РФ, 2019. – 396 с.
7. Жангозин К.Н. О новом методе получения порошкового графена / К.Н. Жангозин, Т.К. Жанабергенов, Д.Б. Каргин // Вестник ЕНУ им. Л. Гумилёва. – 2021. – Том 136, № 3. – С. 8-16.
8. Жангозин К.Н. Новый метод получения графена интеркаляцией графита микрокластерной водой / К.Н. Жангозин. – Алматы: Darkhan, 2023. – 102 с.
9. Поверхностные явления в графите и получение из него графена / В.М. Юров и др. // Новости науки Казахстана. – 2024. – № 1. – С. 11-23.
10. Шебзухова И.Г. Поверхностные энергия и натяжение металлических кристаллов, кинетика адсорбции компонентов бинарных систем: дис. докт. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Шебзухова Ирина Гусейновна; Кабард.-Балкар. гос. ун-т им. Х.М. Бербекова. – Нальчик, 2013. – 370 с.
11. Федоров В.Т. Поверхностная энергия в процессах измельчения твердых тел / В.Т. Федоров, М.Н. Кокоев // Вестник Дагестанского ГТУ. Технические науки. – 2023. – Т. 50(3). – С. 181-189.
12. Wettability and surface free energy of graphene films / S. Wang et al // Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids. – 2009. – Vol. 25, № 18. – P. 11078-11081.
13. Su R. Wettability and Surface Free Energy Analyses of Monolayer Graphene / R. Su, X. Zhang // Journal of Thermal Science. – 2018. – Vol. 27(5934). – P. 1-5.
14. Ferguson A. The Surface Energetics of Low Dimensional Nanomaterials / A. Ferguson. – Trinity College Dublin. – 2016. – 188 p.

15. Rohman N. Surface free energy of graphene-based coatings and its component elements / N. Rohman, T. Mohiuddin, M. Al-Rugeishi // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2023. – Vol. 153(4). – P. 10855-110855.
16. Graphene Surface Energy by Contact Angle Measurements / M.S. Al-Rugeishi et al // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2022. – P. 1-6.
17. Obreimoff J.W. The splitting reigth of mica / J.W. Obreimoff // *Proc. Roy. Soc.* – 1930. – V. A127. – P. 290-293.
18. Obreimoff revisited: Controlled heterogeneous fracture through the splitting of mica / M. Johnson et al // *Mechanics of Materials*. – 2019. – V. 136(01). – P. 103088.
19. Interfacial energy states of moisture-exposed cracks in mica / K.-T. Wan et al // *J. Mater. Res.* – 1990. - V. 5(1). – P. 172-182.
20. Wan K.-T. Fracture and contact adhesion energies of mica-mica, silica-silica, and mica-silica interfaces in dry and moist atmospheres / K.-T. Wan, D.T. Smith, B.R. Lawn // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1992. – V. 75(3). – P. 667-676.
21. Yurov V. About the mechanism of mica splitting / V. Yurov, K. Zhangozin // *Sciences of Europe*. – 2024. – № 133. – P. 97-104.
22. Ножкина А.В. Поверхностная энергия алмаза и графита / А.В. Ножкина, В.И. Костиков // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения*. – 2017. – Вып. 20. – С. 161-167.
23. Турчанинов М.А. Механизмы кристаллизации жидкого углерода, полученного при плавлении графита импульсом лазера в газовых средах с давлением ~ 10 МПа : диссертация ... кандидата физико-математических наук: 01.04.14 / Турчанинов Михаил Александрович; Объед. ин-т высок. температур РАН. – Москва, 2010. – 128 с.
24. Jiang Q. Thermodynamic phase stabilities of nanocarbon / Q. Jiang, Z.P. Chen // *Carbon*. – 2006. – Vol. 44, iss. 1. – P. 79-83.
25. Сенють В.Т. Термодинамический анализ процесса формирования наноструктурного поликристаллического материала на основе наноалмазов, модифицированных неалмазным углеродом (часть 2) / В.Т. Сенють, П.А. Витязь, А.М. Парницкий // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2023. – № 4(65). – С. 76-84.
26. Verkholomov V.K. Physical Features of the New Equation (Equation Jung - Verkholomov) of Contact Angle. / V.K. Verkholomov // *Materials of the XII international research and practice conference «Science, Technology and Higher Education»*. – December 21-22, 2016. – Westwood, Canada. – P. 97-110.
27. Хоконов Х.Б. Поверхностная энергия и поверхностное натяжение металлов и их бинарных сплавов в твердом состоянии / Х.Б. Хоконов, Т.М. Таова, Б.Б. Алчагиров // *КБГУ*. – 2019. – Т. IX, № 2. – С. 5-19.
28. Рехвиашвили С.Ш. К расчету постоянной Толмена / С.Ш. Рехвиашвили, Е.В. Кишტიкова, Р.Ю. Кармокова // *Письма в ЖТФ*. – 2007. – Т. 33, Вып. 2. – С. 1-7.
29. Юров В.М. Исследование первичных нанотрещин атомарно-гладких металлов / В.М. Юров, В.И. Гончаренко, В.С. Олешко // *Письма в ЖТФ*. – 2023. – Том 49, вып. 8. – С. 35-38.
30. Юров В.М., Портнов В.С., Пузеева М.П. Пат. 58155 Республика Казахстан. Способ измерения поверхностного натяжения и плотности поверхностных состояний диэлектриков. опубл. 15.12.2008, Бюл. № 12.
31. Пат. 58158 Республика Казахстан. МПК: G01N 27/76. Способ измерения поверхностного натяжения магнитных материалов / Юров В.М., Портнов В.С., Пузеева М.П.; заявитель и патентообладатель Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова. – № G01N 27/76 (2006.01); заявл. 07.06.2006; опубл. 15.12.2008, Бюл. № 12. – 3 с.
32. Пат. 23223 Республика Казахстан. МПК G01N 27/76 (2009.01). Способ измерения поверхностного натяжения осаждаемых покрытий / Юров В.М., Гученко С.А., Ибраев Н.Х.; заявитель и патентообладатель Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова; заявл. 27.05.2009; опубл. 15.11.2010, Бюл. № 11. – 3 с.
33. Development of a device for determining work electron output / V.M. Yurov et al // *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2020. – Vol. 17, № 1(33). – P. 127-131.

References

1. Electric field effect in atomically thin carbon films / K.S. Novoselov et al // *Science*. – 2004. – V. 306, № 5696. – P. 666-669. (in English).
2. Novoselov K.S. Grafen: materialy Flatlandii / K.S. Novoselov // *UFN*. – 2011. – T. 181, № 12. – S. 1299-1311. (in Russian).
3. Baimova YU.A. Grafen, nanotrubki i drugie uglerodnye nanostruktury / YU.A. Baimova, R.R. Mulyukov. – M.: Rossiiskaya akademiya nauk, 2018. – 212 s. (in Russian).
4. Zhang T. Graphene. From Theory to Applications / T. Zhang. – Springer, 2022. – 142 p. (in English).
5. Gupta R.K. 3D Graphene. Fundamentals, Synthesis and Emerging Applications / R.K. Gupta. – Springer, 2023. – 441 p. (in English).
6. Garshev A.V. Monitoring razvitiya i vnedreniya tekhnologii polucheniya grafena, ego proizvodnykh, drugikh 2D kristallov i proizvodstva izdelii na osnove 2D kristallov v Rossiiskoi Federatsii i mire / A.V. Garshev. – M.: Otchet RF, 2019. – 396 s. (in Russian).
7. Zhangozin K.N. O novom metode polucheniya poroshkovogo grafena / K.N. Zhangozin, T.K. Zhanabergenov, D.B. Kargin // *Vestnik ENU im. L. Gumileva*. – 2021. – tom 136, № 3. – S. 8-16. (in Russian).
8. Zhangozin K.N. Novyi metod polucheniya grafena interkalyatsiei grafita mikroklasternoi vodoi / K.N. Zhangozin. – Almaty: Darkhan, 2023. – 102 s. (in Russian).
9. Poverkhnostnye yavleniya v grafite i poluchenie iz nego grafena / V.M. Yurov i dr. // *Novosti nauki Kazakhstana*. – 2024. – № 1. – S. 11-23. (in Russian).
10. Shebzukhova I.G. Poverkhnostnye ehnergiya i natyazhenie metallicheskih kristallov, kinetika adsorbtsii komponentov binarnykh sistem: dis. dokt. fiz.-mat. nauk: 01.04.07 / Shebzukhova Irina Guseinovna; Kabard. – Balkar. gos. un-t im. KH.M. Berbekova. – Nal'chik, 2013. – 370 s. (in Russian).
11. Fedorov V.T. Poverkhnostnaya ehnergiya v protsessakh izmel'cheniya tverdykh tel / V.T. Fedorov, M.N. Kokoev // *Vestnik Dagestanskogo GTU. Tekhnicheskie nauki*. – 2023. – T. 50(3). – S. 181-189. (in Russian).
12. Wettability and surface free energy of graphene films / S. Wang et al // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. – 2009. – Vol. 25, № 18. – P. 11078-11081. (in English).
13. Su R. Wettability and Surface Free Energy Analyses of Monolayer Graphene / R. Su, X. Zhang // *Journal of Thermal Science*. – 2018. – Vol. 27(5934). – P. 1-5. (in English).
14. Ferguson A. The Surface Energetics of Low Dimensional Nanomaterials / A. Ferguson. – Trinity College Dublin. – 2016. – 188 p. (in English).
15. Rohman N. Surface free energy of graphene-based coatings and its component elements / N. Rohman, T. Mohiuddin, M. Al-Rugeishi // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2023. – Vol. 153(4). – P. 10855-110855. (in English).
16. Graphene Surface Energy by Contact Angle Measurements / M.S. Al-Ruqeishi et al // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2022. – P. 1-6. (in English).
17. Obreimoff J.W. The splitting reigth of mica / J.W. Obreimoff // *Proc. Roy. Soc.* – 1930. – V. A127. – P. 290-293. (in English).
18. Obreimoff revisited: Controlled heterogeneous fracture through the splitting of mica / M. Johnson et al // *Mechanics of Materials*. – 2019. – V. 136(01). – R. 103088. (in English).
19. Interfacial energy states of moisture-exposed cracks in mica / K.-T. Wan et al // *J. Mater. Res.* – 1990. – V. 5(1). – R. 172-182. (in English).
20. Wan K.-T. Fracture and contact adhesion energies of mica-mica, silica-silica, and mica-silica interfaces in dry and moist atmospheres / K.-T. Wan, D.T. Smith, B.R. Lawn // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1992. – V. 75(3). – R. 667-676. (in English).
21. Yurov V. About the mechanism of mica splitting / V. Yurov, K. Zhangozin // *Sciences of Europe*. – 2024. – № 133. – R. 97-104. (in English).
22. Nozhkina A.V. Poverkhnostnaya ehnergiya almaza i grafita / A.V. Nozhkina, V.I. Kostikov // *Porodorazrushayushchii i metalloobrabatyvayushchii instrument – tekhnika, tekhnologiya ego izgotovleniya i primeneniya*. – 2017. – Vyp. 20. – S. 161-167. (in Russian).
23. Turchaninov M.A. Mekhanizmy kristallizatsii zhidkogo ugleroda, poluchennogo pri plavlenii grafita impul'som lazera v gazovykh sredakh s davleniem ~ 10 MPa : dissertatsiya ... kandidata fiziko-matematicheskikh nauk : 01.04.14 / Turchaninov Mikhail Aleksandrovich; Ob"ed. in-t vysok. temperatur RAN. – Moskva, 2010. – 128 s. (in Russian).

24. Jiang Q. Thermodynamic phase stabilities of nanocarbon / Q. Jiang, Z.P. Chen // Carbon. – 2006. – Vol. 44, iss. 1. – P. 79-83. (in English).
25. Senyut' V.T. Termodinamicheskii analiz protsessa formirovaniya nanostruktornogo polikristallicheskogo materiala na osnove nanoalmazov, modifitsirovannykh nealmaznym uglerodom (chast' 2) / V.T. Senyut', P.A. Vityaz', A.M. Parnitskii // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. – 2023. – № 4(65). – S. 76-84. (in Russian).
26. Verkholomov V.K. Physical Features of the New Equation (Equation Jung – Verkholomov) of Contact Angle. / V.K. Verkholomov // Materials of the XII international research and practice conference «Science, Technology and Higher Education». – December 21-22, 2016. – Westwood, Canada. – P. 97-110. (in Russian).
27. Khokonov KH.B. Poverkhnostnaya ehnergiya i poverkhnostnoe natyazhenie metallov i ikh binarnykh splavov v tverdom sostoyanii / KH.B. Khokonov, T.M. Taova, B.B. Alchagirov // KBGU. – 2019. – T. IX, № 2. – S. 5-19. (in Russian).
28. Rekhviashvili S.SH. K raschetu postoyannoi Tolmena / S.SH. Rekhviashvili, E.V. Kishtikova, R.YU. Karmokova // Pis'ma v ZHTF. – 2007. – T. 33, Vyp. 2. – S. 1-7. (in Russian).
29. Yurov V.M. Issledovanie pervichnykh nanotreshchin atomarno-gladkikh metallov / V.M. Yurov, V.I. Goncharenko, V.S. Oleshko // Pis'ma v ZHTF. – 2023. – Tom 49, vyp. 8. – S. 35-38. (in Russian).
30. Yurov V.M., Portnov V.S., Puzeeva M.P. Pat. 58155 Respublika Kazakhstan. Sposob izmereniya poverkhnostnogo natyazheniya i plotnosti poverkhnostnykh sostoyanii dielektrikov. opubl. 15.12.2008, Byul. № 12. (in Russian).
31. Pat. 58158 Respublika Kazakhstan. MPK: G01N 27/76. Sposob izmereniya poverkhnostnogo natyazheniya magnitnykh materialov / Yurov V.M., Portnov V.S., Puzeeva M.P.; zayavitel' i patentoobladatel' Karagandinskii gosudarstvennyi universitet im. E.A. Buketova. – № G01N 27/76 (2006.01); zayavl. 07.06.2006; opubl. 15.12.2008, Byul. № 12. – 3 s. (in Russian).
32. Pat. 23223 Respublika Kazakhstan. MPK G01N 27/76 (2009.01). Sposob izmereniya poverkhnostnogo natyazheniya osazhdaemykh pokrytii / Yurov V.M., Guchenko S.A., Ibraev N.KH.; zayavitel' i patentoobladatel' Karagandinskii gosudarstvennyi universitet im. E.A. Buketova; zayavl. 27.05.2009; opubl. 15.11.2010, Byul. № 11. – 3 s. (in Russian).
33. Development of a device for determining work electron output / V.M. Yurov et al // Eurasian Physical Technical Journal. – 2020. – Vol. 17, № 1(33). – R. 127-131. (in English).

Информация о финансировании

Данная научная статья опубликована в рамках выполнения грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН № AP32488258 «Разработка инновационной технологии получения графена интеркаляцией графита микрокластерной водой и модификация графеном ВТСП керамики» (исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).

В.М. Юров*, К.Н. Жанғозин¹, Т.Қ. Жаңабергенов¹, Д.Б. Қаргин²

¹ЖШС «Восток»,

010000, Қазақстан, Астана қ., пр. Республика, 3/2, ап. 40

² Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

010008, Қазақстан, Астана, көш. Сәтбаева, 2

*e-mail: exciton@list.ru

ГРАФЕННІҢ БЕТІНІҢ ЭНЕРГИЯСЫ

Қатты денелердің беттік энергиясын анықтаудың «отырған тамшы» әдісі – γ – қарастырылады. Графит пен графен үшін бұл әдіс орташа мәндерді алды: $\gamma_2 = 53,6 \pm 2,1$ және $\gamma_1 = 44,8 \pm 14,7$ мДж/м². Графит үшін кристалдарды бөлу әдісін қолдану арқылы $\gamma_2 = 3250$ мДж/м² орташа мәні алынды, бұл «отырған тамшы» әдісімен алынған γ_2 мәнінен 60 есе жоғары. Екі әдісті талдау қатты денелердің беттік энергиясын анықтауға арналған «отырған тамшы» әдісін өзгертусіз қолдануға болмайтынын көрсетті. Қатты денелердің беттік энергиясын анықтаудың жаңа әдістерін ұсынамыз: 1) қатты дененің балку температурасы арқылы; 2) тұндырылған жабынның қалыңдығына физикалық қасиетінің өлшемдік тәуелділігі арқылы; 3) контакт потенциалының айырмасының өлшенген мәні арқылы. Графен үшін келесі мәндер алынды: $\gamma_1 = 947,1$; $\gamma_1 = 974$; $\gamma_1 = 960$ мДж/м², бұл «отырған тамшы» әдісіне қарағанда үлкен дәреже. γ_1 мәндерін 3-ке көбейту керек және

графит үшін мәндерді аламыз – $\gamma_2 = 2841$; $\gamma_2 = 2922$, $\gamma_2 = 2880$ мДж/м², бұл кристалды бөлу әдісінен аздап ерекшеленеді.

Түйін сөздер: графит, графен, беттік энергия, отырықсыз түсу әдісі, кристалды бөлу, қатты.

V.M. Yurov*, K.N. Zhangozin¹, T.K. Zhanabergenov¹, D.B. Kargin²

¹LLP «Vostok»,

010000, Kazakhstan, Astana, Respublika Ave., 3/2, apt. 40

²L.N. Gumilyov Eurasian National University,

010008, Kazakhstan, Astana, Satpayev str., 2

*e-mail: exciton@list.ru

SURFACE ENERGY OF GRAPHENE

The «sessile drop» method for determining the surface energy of solids – γ is considered. For graphite and graphene, this method yielded average values of $\gamma_2 = 53.6 \pm 2.1$ and $\gamma_1 = 44.8 \pm 14.7$ mJ/m². Using the crystal cleavage method for graphite, the average value of $\gamma_2 = 3250$ mJ/m² was obtained, which is 60 times higher than the value of γ_2 obtained by the "sessile drop" method. Analysis of both methods showed that the "sessile drop" method for determining the surface energy of solids cannot be used without modification. We propose new methods for determining the surface energy of solids: 1) through the melting point of a solid; 2) through the size dependence of a physical property on the thickness of the deposited coating; 3) through the measured value of the contact potential difference. The following values were obtained for graphene: $\gamma_1 = 947.1$; $\gamma_1 = 974$; $\gamma_1 = 960$ mJ/m², which is an order of magnitude higher than in the sessile drop method. The values of γ_1 must be multiplied by 3 and we obtain the values for graphite – $\gamma_2 = 2841$; $\gamma_2 = 2922$, $\gamma_2 = 2880$ mJ/m², which differs slightly from the crystal splitting method.

Key words: graphite, graphene, surface energy, sessile drop method, crystal cleavage, solid.

Сведения об авторах

Виктор Михайлович Юров* – ведущий научный сотрудник ТОО «ТСК-Восток», кандидат физико-математических наук, доцент; e-mail: exciton@list.ru

Канат Накошевич Жангозин – директор, ведущий научный сотрудник ТОО «ТСК-Восток», кандидат физико-математических наук, доцент; e-mail: 4kzh@mail.ru

Тимурхан Кудайбергенович Жанаберенов – ведущий научный сотрудник ТОО «ТСК-Восток», доктор PhD; e-mail: 4tkz@bk.ru

Джумат Бейсенбекович Каргин – кандидат физико-математических наук, доцент, директор департамента коммерциализации технологий Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева; e-mail: kargin_db@enu.kz

Авторлар туралы мәліметтер

Виктор Михайлович Юров* – «TSC-Vostok» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент; e-mail: exciton@list.ru

Қанат Накошұлы Жангозин – «TSC-Vostok» ЖШС директоры, жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент; e-mail: 4kzh@mail.ru

Тимурхан Құдайбергеноұлы Жаңаберенов – «TSC-Vostok» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері, PhD докторы; e-mail: 4tkz@bk.ru

Жұмат Бейсенбекұлы Қаргин – физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Еуразия ұлттық университетінің технологияларды коммерцияландыру департаментінің директоры. Л.Н. Гумилев; e-mail: kargin_db@enu.kz

Information about authors

Viktor Mikhailovich Yurov* – Leading researcher of TOO «TSK-Vostok», candidate of physical and mathematical sciences, associate professor; e-mail: exciton@list.ru

Kanat Nakoshevich Zhangozin – Director, Leading Researcher of «TSK-Vostok» LLP, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor; e-mail: 4kzh@mail.ru

Timurkhan Kudaibergenovich Zhanabergenov – Leading researcher of «TSK-Vostok» LLP, PhD; e-mail: 4tkz@bk.ru

Djumat Beisenbekovich Kargin – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, director of the department of technology commercialization of the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov; e-mail: kargin_db@enu.kz

Поступила в редакцию 22.06.2024

Поступила после доработки 01.07.2024

Принята к публикации 03.07.2024