

**ИЗОТЕРМЫ АДСОРБЦИИ ИОНОВ СВИНЦА (II)  
ГРАФЕНОВЫМИ НАНОКОМПОЗИТАМИ**

**А. Е. Кучерова<sup>1</sup>, И. В. Буракова<sup>1</sup>, А. Е. Бураков<sup>1</sup>, К. В. Брянкин<sup>2</sup>**

*Кафедры: «Техника и технологии производства нанопродуктов» (1);  
anastasia.90k@mail.ru; «Химия и химические технологии» (2),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** адсорбция; графеновые материалы; изотермы; ионы тяжелых металлов; классификация Смита; уравнение Ленгмюра; уравнение Фрейндлиха.

**Аннотация:** Исследована адсорбция ионов свинца (II) на графеновых материалах. Исследования равновесия проводились с использованием моделей Фрейндлиха, Ленгмюра. Применимость двух изотерм говорит о том, что возможны как монослойная адсорбция, так и гетерогенное энергетическое распределение активных центров на поверхности адсорбента. Максимальная экспериментальная адсорбционная емкость по отношению к свинцу (II) для паст многослойного и малослойного графенов равна 230 и 170 мг/г соответственно. Дано обоснование применения разработанных графеновых композитов для удаления тяжелых металлов из промышленных стоков.

---

В связи со стремительно развивающейся индустриализацией человеческого общества различные загрязнители, такие как ионы тяжелых металлов, органические вещества, бактерии, вирусы и т. д., попадают в сточные воды, нанося серьезный вред здоровью человека. Среди всех вредных компонентов, содержащихся в воде, ионы тяжелых металлов из ряда Pb (II), Cd (II), Zn (II), Ni (II) и Hg (II) обладают наиболее высокими токсическими и разрушающими свойствами, которые могут вызывать серьезные проблемы со здоровьем у людей и животных. Например, свинец представляет риск для здоровья человека, вызывая бессонницу, боль, головокружение, анемию, раздражительность, мышечную слабость, галлюцинации и почечную недостаточность [1].

Присутствие вышеупомянутых тяжелых металлов в водных системах представляет серьезную экологическую проблему. В связи с этим предложены различные методы их удаления, такие как ионный обмен, мембранная фильтрация, коагуляция, флокуляция, флотация и электрохимические способы [2], среди которых наиболее эффективным является адсорбция, которая широко используется в методах разделения [3], очистке сточных вод [4], охлаждении, контроле окружающей среды и устройстве жизнеобеспечения в космических аппаратах и, очевидно,

гетерогенном катализе [5]. Среди широкого класса традиционных адсорбционных материалов (активированные угли различной химической природы, природные и синтетические цеолиты, глины и т.д.) используются новые перспективные поглотители на основе углеродных наноструктур, такие как углеродные нанотрубки различных модификаций, фуллерены, оксид графена и их возможные сочетания.

Графен, новый углеродный наноматериал, обладающий уникальными физическими, химическими, электрическими и механическими свойствами [6 – 9]. За счет высокой адсорбционной способности и быстрой скорости поглощения, он является наиболее перспективным материалом для удаления тяжелых металлов из водных растворов [10 – 13].

Учитывая вышесказанное, необходимо разработать новые графеновые материалы для эффективного извлечения свинца (II) из водных растворов.

Электронные изображения образцов на основе графена получены с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на двухлучевом приборе Neon 40 (Carl Zeiss, Йена, Германия) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на приборе JeM-200CX (JEOL, Токио, Япония). Равновесную концентрацию свинца (II) в водных растворах определяли атомно-абсорбционной спектрометрией на приборе МГА-915МД (ООО «Атомприбор», Санкт-Петербург, Россия).

### Экспериментальная часть

Графеновые композиты представляют собой водную пасту, содержащую многослойный или малослойный графены. Графеновые пасты синтезировались согласно методике, представленной в работе [14]. Графит интеркалировали раствором персульфата аммония в серной кислоте, затем выдерживали 3 ч при 40 °С для расширения, после чего проводили гидролиз и промывали водой до удаления кислоты. Добавление поверхностно-активных веществ (ПАВ) способствует образованию малослойного графена. Как правило, массовое содержание графена в пасте многослойного графена (ПМНГ) составляло 5 %, а в пасте малослойного графена (ПМАГ) – 12 % в расчете на графеновый углерод. Графен содержал около 10 % масс. окисных групп по отношению к графеновому углероду.

Типичные изображения СЭМ и ПЭМ ПМНГ представлены на рис. 1, откуда видно, что размер нанопластинок составляет порядка 5...10 нм, а число слоев 15 – 25.

Как показано на рис. 2, ПМАГ представляет собой малослойные нанопластины графена размером порядка 5...10 нм и с числом слоев 3 – 5.

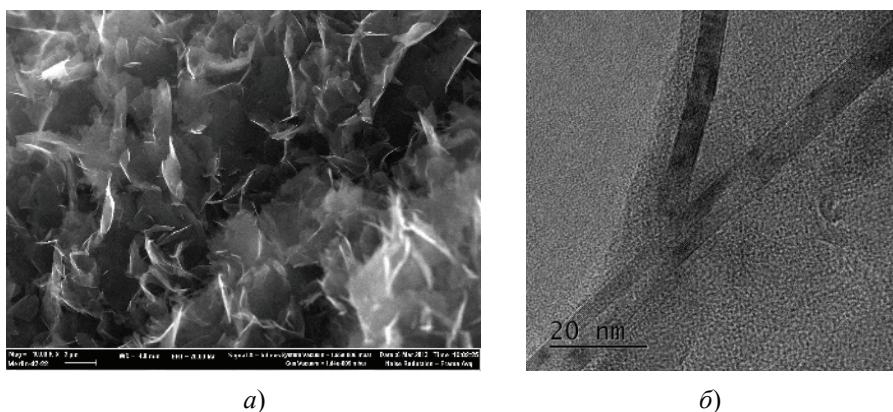


Рис. 1. Изображения СЭМ (а) и ПЭМ (б) ПМНГ

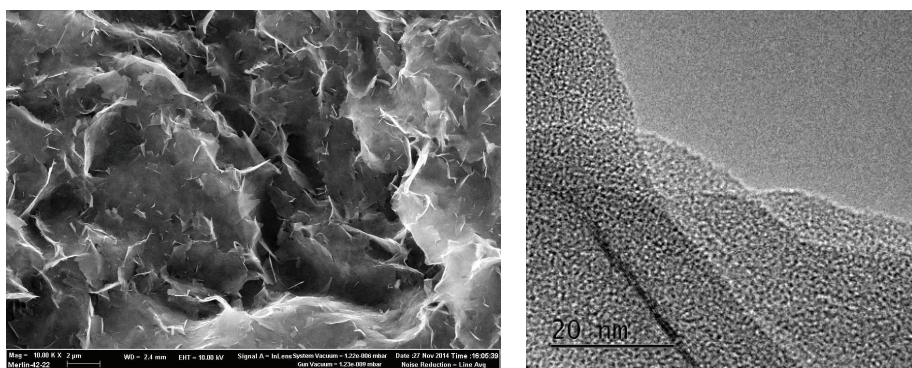


Рис. 2. Изображения СЭМ (а) и ПЭМ (б) ПМАГ

### Методика исследования

Экспериментальное изучение процесса адсорбции ионов свинца (II) из водных растворов проводили на графеновых материалах (ПМНГ, ПМАГ). В серию из 7 пробирок объемом 50 мл, содержащих сорбент, вносили с помощью пипетки Пастера 15 мл раствора нитрата свинца ( $Pb(NO_3)_2$  концентрацией: 200, 500, 700, 1000, 1700, 2400, 3500 мг/л, содержимое пробирок встряхивали при 100 об/мин в ротаторах BioRS-24 (Biosan, Рига, Латвия) в течение равновесного времени сорбента. По окончании процесса сорбции растворы центрифугировали (Centrifuge 5810 R (Эппендорф, Гамбург, Германия)) на скорости 10000 об/мин в течение 10 минут, в целях разделения фаз. Затем с помощью пипетки Пастера жидкую фазу помещали в пробирки объемом 30 мл, не допуская попадания в них твердой фазы и ее взвеси. После чего растворы измеряли методом количественного элементного анализа по атомным спектрам поглощения на атомно-абсорбционном спектрометре.

Равновесная адсорбционная способность  $q_e$ , мг/г, металла рассчитывалась с использованием баланса массы по формуле

$$q_e = (C_0 - C_e)V/m, \quad (1)$$

где  $C_0$ ,  $C_e$  – начальная и равновесная концентрации свинца (II) в растворе, мг/л;  $V$  – объем образца, л;  $m$  – масса адсорбентов, г.

### Результаты и обсуждение

Чтобы оптимизировать процесс удаления адсорбата, важно установить наиболее подходящую корреляцию для равновесных данных. В соответствии с экспериментальными результатами были реализованы две модели изотерм адсорбции – Ленгмюра и Фрейндлиха. Модель Ленгмюра предполагает, что адсорбция происходит на определенных однородных участках, расположенных на поверхности адсорбента. Его форма приведена в уравнении

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{b C_e + 1}, \quad (2)$$

где  $q_{\max}$  – максимальная адсорбционная емкость монослоя, мг/г;  $b$  – постоянная Ленгмюра для данной пары «адсорбент – адсорбат», величина (отношение констант скоростей десорбции и адсорбции), численно равная концентрации адсорбата, при которой занята половина активных центров.

Модель Фрейндлиха, которая может быть применена для адсорбции на гетерогенных поверхностях в нескольких слоях, выражается уравнением

$$q_e = k_f(C_e)^{1/n}, \quad (3)$$

где  $k_f$  – константа равновесия, которая указывает на адсорбционную емкость;  $n$  – для  $1/n = 1$  адсорбция линейная,  $1/n < 1$  означает, что адсорбция имеет химический характер, а если  $1/n > 1$ , адсорбция благоприятная и физической природы.

Несмотря на то что разработаны и использованы многие другие модели для описания изотерм [16], можно видеть, что изотермы Ленгмюра и Фрейндлиха по-прежнему остаются двумя наиболее часто используемыми уравнениями равновесной адсорбции из-за их простоты и легкости оценки их регулируемых параметров. Как видно на рис. 3, изотермы могут быть хорошо аппроксимированы прямыми линиями, тем самым подтверждая применимость как модели Ленгмюра, так и модели Фрейндлиха для описания адсорбции свинца (II) на всех исследованных графеновых материалах.

При изучении изотерм адсорбции на ПМНГ и ПМАГ можно сделать предположение, что они соответствуют кривой класса  $L$ . На рис. 4 просматривается выгнутый начальный участок относительно оси концентраций, что говорит об образовании мономолекулярного слоя. Наличие второго плато после насыщения адсорбционного слоя, что характерно для изотерм IV типа, может быть обусловлено полимолекулярной адсорбцией [17 – 19].

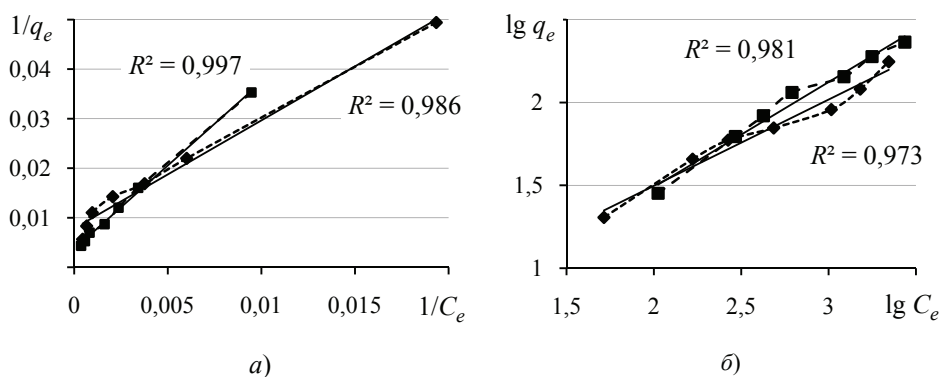


Рис. 3. Изотермические кривые Ленгмюра (а) и Фрейндлиха (б):  
 -■- - ПМНГ; ...◆... - ПМАГ

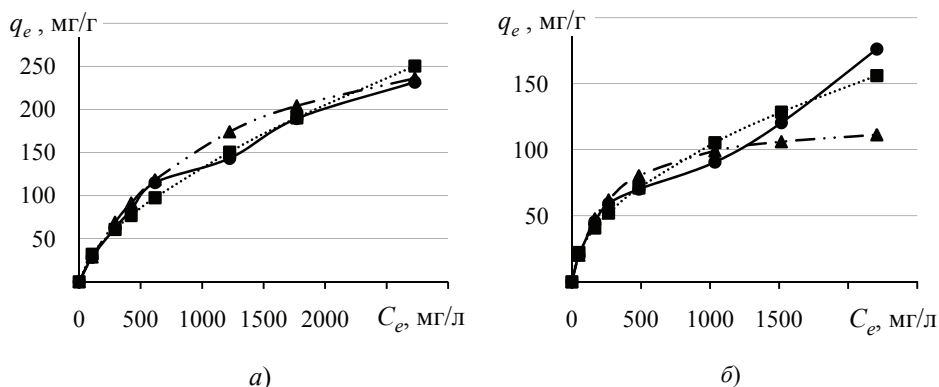


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические изотермы адсорбции свинца (II) на ПМНГ (а) и ПМАГ (б):  
 -●- - эксперимент; -▲- - Ленгмюр; -■- - Фрейндлих

Из изотермических исследований (табл. 1) установлено, что все кривые хорошо согласуются с экспериментальными данными, указывая тем самым на эффективность графеновых материалов, используемых в качестве адсорбентов тяжелых металлов. Отметим, что максимальная экспериментальная адсорбционная способность исследуемых материалов изменяется в следующей последовательности: ПМНГ > ПМАГ.

Сравнивая коэффициенты корреляции  $R^2$  для двух используемых моделей, можно видеть, что их значения соизмеримы. Это указывает на то, что адсорбция свинца (II) на графеновых материалах носит комплексный характер, в частности, из-за наличия активных центров с различной энергией связи на поверхности адсорбента.

В диапазоне малых концентраций (200...700 мг/л) предпочтительно использовать модель Ленгмюра. На основании полученных значений констант адсорбционного равновесия данного уравнения можно предположить, что ионы свинца (II) в их малых концентрациях взаимодействуют с активными сорбционными центрами, расположенными на поверхности исследуемых материалов и ответственными за физическую адсорбцию. Диапазон высоких концентраций не удовлетворяет граничным условиям применимости модели Ленгмюра с мономолекулярным сорбционным механизмом, а активная адсорбция в данном диапазоне может служить основой для косвенного подтверждения применимости модели Фрейндлиха.

Согласно полученным значениям  $1/n$ , можно предположить благоприятные условия для химической адсорбции, так как  $1/n < 1$ . Данный тип адсорбции связан с энергетической неоднородностью адсорбционных центров. На основе систематизации приведенных результатов предложены рекомендации по использованию графеновых материалов в процессах жидкофазной сорбции ионов свинца (II). Полученные эмпирические зависимости (табл. 2) позволяют прогнозировать параметры сорбционного процесса.

Таблица 1

**Константы изотерм адсорбции свинца (II),  
полученные на материалах ПМНГ и ПМАГ**

Материал	Константы Ленгмюра			Константы Фрейндлиха		
	$q_{\max}$	$b$	$R^2$	$k_f$	$1/n$	$R^2$
ПМНГ	333,33	$8,89 \cdot 10^{-4}$	0,997	1,659	0,634	0,981
ПМАГ	250	$3,45 \cdot 10^{-4}$	0,989	2,850	0,520	0,908

Таблица 2

**Уравнения Ленгмюра и Фрейндлиха,  
полученные на основе экспериментальных данных**

Материал	Уравнение Ленгмюра	Уравнение Фрейндлиха
ПМНГ	$q_e = \frac{333,33 \cdot 8,89 \cdot 10^{-4} C_e}{8,89 \cdot 10^{-4} C_e + 1}$	$q_e = 1,659(C_e)^{0,634}$
ПМАГ	$q_e = \frac{250 \cdot 3,45 \cdot 10^{-4} C_e}{3,45 \cdot 10^{-4} C_e + 1}$	$q_e = 2,85(C_e)^{0,52}$

## Заключение

Проведенное исследование показало высокую адсорбционную способность графеновых материалов по отношению к тяжелым металлам в водных растворах, а также подтвердило потенциал использования их в качестве эффективных адсорбентов для извлечения металлических загрязнителей из жидкой фазы как при малых, так и высоких концентрациях. Данный результат может иметь большое значение для промышленной очистки сточных вод. Максимальная сорбционная способность к свинцу (II) при н.у. составила 230 мг/г, следовательно, обширные исследования в этой области необходимы для развития данного экологического направления.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта государственного задания ГК № 16.1384.2017/ПЧ.*

### Список литературы

1. Naseem, R. Removal of Pb(II) from Aqueous Solution by Using Bentonite as an Adsorbent / R. Naseem, S.S. Tahir // Water Research. – 2001. – Vol. 35. – P. 3982 – 3986.
2. Fu., F. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A review / F. Fu., Q. Wang // Journal of Environmental Management. – 2011. – Vol. 92, No. 3. – P. 407 – 418.
3. Sudhakar, Y. Removal of Endosulfan Using Aerobic Mixed Bacterial Culture / Y. Sudhakar, A. K. Dikshit // International Journal of Environmental Pollution. – 2001. – Vol. 15. – P. 543 – 552.
4. Radovic, L. R. Carbon Materials as Adsorbents in Aqueous Solutions / L. R. Radovic, C. Moreno-Castilla, F. Rivera-Utrilla // Chemistry and Physics of Carbon. – 2001. – Vol. 27. – P. 227 – 405.
5. Carbon Materials in Environmental Applications / F. Derbyshire [et al.] // Chemistry and Physics of Carbon. – 2000. – Vol. 27. – P. 1 – 66.
6. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov [et al.] // Science. – 2004. – Vol. 306. – No. 5696. – P. 666 – 669.
7. Gomez-Navarro, C. Atomic Structure of Reduced Graphene Oxide / C. Gomez-Navarro, M. Burghard, K. Kern // Nano Letters. – 2008. – Vol. 8. – P. 2045 – 2049.
8. Graphene Oxide Papers Modified by Divalent Ions-Enhancing Mechanical Properties Via Chemical Cross-Linking / S. Park [et al.] // ACS Nano. – 2008. – Vol. 2, No. 3. – P. 572 – 578.
9. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene / A. A. Balandin [et al.] // Nano Letters. – 2008. – Vol. 8, No. 3. – P. 902 – 907.
10. Chandra, C. Highly Selective Adsorption of  $Hg^{2+}$  by a Polypyrrole-Reduced Graphene Oxide Composite / C. Chandra, K. S. Kim // Chemical Communication. – 2011. – Vol. 47. – P. 3942 – 3944.
11. The Adsorption Properties of Pb (II) and Cd (II) on Functionalized Graphene Prepared by Electrolysis Method / X. Deng [et al.] // Journal Hazards Materials – 2010. – Vol. 183. – P. 923 – 930.
12. Folding/Aggregation of Graphene Oxide and Its Application in  $Cu^{2+}$  Removal / S.T. Yang [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. – 2010. – Vol. 351, Issue 1. – P. 122 – 127.

13. Fabrication of Highly Porous Biodegradable Monoliths Strengthened by Graphene Oxide and Their Adsorption of Metal Ions / N. Zhang [et al.] // *Carbon*. – 2011. – Vol. 49, Issue 3. – P. 827 – 837.
14. Melezhyk, A. V. Synthesis of Graphene Nanoplatelets from Peroxosulfate Graphite Intercalation Compounds / A. V. Melezhyk, A. G. Tkachev // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2014. – Vol. 5, No. 2. – P. 294 – 306.
15. Graphene-Based Nano-composites for Enhanced Pb<sup>2+</sup> Adsorption / A. E. Kucherova [et al.] // *Nano hybrids and composites*. – 2016. – Vol. 13. – P. 323–329.
16. Kumar, K. V. Pseudo Second Order Kinetics And Pseudo Isotherms for Malachite Green onto Activated Carbon: Comparison of Linear and Non-Linear Regression Methods / K. V. Kumar, S. Sivanesan // *Journal of Hazards Materials B*. – 2006. – Vol. 136. – P. 721 – 726.
17. Adsorption from Solution at the Solid/Liquid Interface / G. D. Parfitt, C. H. Rochester (Ed.). – London : Academic press, 1983. – 475 p.
18. Mukhin, V.M. Active Carbon as Nanoporous Material for Solving Environmental Problem / V. M. Mukhin, I. V. Burakova, A. E. Burakov // *Advanced Materials & Technologies*. – 2017. – No. 2. – P. 50 – 56. doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.050-056
19. Технологические основы функционализации многостенных углеродных нанотрубок стеаратом титана для последующего производства композитов / А. Г. Ткачев [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 501 – 509. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.501-509

---

## Graphene Composites for Lead (II) Extraction: an Equilibrium Study

A. E. Kucherova<sup>1</sup>, I. V. Burakova<sup>1</sup>, A. E. Burakov<sup>1</sup>, K. V. Bryankin<sup>2</sup>

*Department of Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing (1); anastasia.90k@mail.ru; Department of Chemistry and Chemical Technologies (2), TSTU; Tambov, Russia*

**Keywords:** adsorption; Freundlich equation; graphene materials; heavy metal ions; isotherms; Langmuir equation; Smith classification.

**Abstract:** The present paper describes a study on the adsorption of lead (II) ions on graphene materials. An equilibrium studies implementing the Freundlich and Langmuir isotherm models were performed. The applicability of the two isotherms for sorption processes shows that both monolayer adsorption and heterogeneous energetic distribution of active sites on the adsorbent surface may take place. The maximum experimental lead (II) adsorption capacities of the materials under study – multi-layered graphene paste, and few-layered graphene paste – were found to be 230 and 170 mg/g, respectively. Due to the high sorption characteristics and unique physical and chemical properties of these materials, the adsorption technologies developed herein can act as sustainable options for heavy metal removal from industrial effluents.

### References

1. Naseem R., Tahir S.S. Removal of Pb(II) from Aqueous Solution by Using Bentonite as an Adsorbent, *Water Research*, 2001, vol. 35, pp. 3982-3986.
2. Fu. F., Wang Q. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A review, *Journal of Environmental Management*, 2011, vol. 92, No. 3, pp. 407-418.

3. Sudhakar, Y., Dikshit, A.K. Removal of endosulfan using aerobic mixed bacterial culture, *International Journal of Environmental Pollution*, 2001, vol. 15, pp. 543-552.
4. Radovic L.R., Moreno-Castilla C., Rivera-Utrilla F. Carbon Materials as Adsorbents in Aqueous Solutions, *Chemistry and Physics of Carbon*, 2001, vol. 27, pp. 227-405.
5. Derbyshire F., Jagtoyen M., Andrews R., Rao A., Martin-Guillon I., Grulke E.A. Carbon Materials in Environmental Applications, *Chemistry and Physics of Carbon*, 2000, vol. 27, pp. 1-66.
6. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, 2004, vol. 306, no. 5696, pp. 666-669.
7. Gomez-Navarro C., Burghard M., Kern K. Atomic structure of reduced graphene oxide, *Nano Letters*, 2008, vol. 8, pp. 2045-2049.
8. Park S., Lee K.S., Bozoklu G., Cai W., Nguyen S.B.T., Ruoff R.S. Graphene oxide papers modified by divalent ions-enhancing mechanical properties via chemical cross-linking, *ACS Nano*, 2008, vol. 2, no. 3, pp. 572-578.
9. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene, *Nano Letters*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 902-907.
10. Chandra, C., Kim, K.S. Highly selective adsorption of Hg<sup>2+</sup> by a polypyrrole-reduced graphene oxide composite, *Chemical Communication*, 2011, vol. 47, pp. 3942-3944.
11. Deng X., Lu L., Li H., Luo F. The Adsorption Properties of Pb (II) and Cd (II) on Functionalized Graphene Prepared by Electrolysis Method, *Journal Hazards Materials*, 2010, vol. 183, pp. 923-930.
12. Yang S.T., Chang Y., Wang H., Liu G., Chen S., Wang Y., Liu Y., Cao A. Folding/aggregation of graphene oxide and its application in Cu<sup>2+</sup> removal, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, vol. 351, issue 1, pp. 122-127.
13. Zhang N., Qiu H., Si Y., Wang W., Gao J. Fabrication of highly porous biodegradable monoliths strengthened by graphene oxide and their adsorption of metal ions, *Carbon*, 2011, vol. 49, issue 3, pp. 827-837.
14. Melezhyk A.V., Tkachev A.G. Synthesis of Graphene Nanoplatelets from Peroxosulfate Graphite Intercalation Compounds, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 294-306.
15. Kucherova A.E., Romantsova I.V., Burakov A.E., Krasnyansky M.N., Memetov N.R. Graphene-Based Nano-composites for Enhanced Pb<sup>2+</sup> Adsorption, *Nano hybrids and composites*, 2016, vol. 13, pp. 323-329.
16. Kumar K.V., Sivanesan S. Pseudo second order kinetics and pseudo isotherms for malachite green onto activated carbon: comparison of linear and non-linear regression methods, *Journal of Hazards Materials B.*, 2006, vol. 136, pp. 721-726.
17. Parfitt G.D., Rochester C.H. *Adsorption from Solution at the Solid/Liquid Interface*, London: Academic press, 1983, 475 p.
18. Mukhin, V.M., Burakova I.V., Burakov A.E. Active Carbon as Nanoporous Material for Solving Environmental Problem, *Advanced Materials & Technologies*, 2017, no. 2, pp. 50-56, doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.050-056
19. Tkachev A.G., Tarov D.V., Tarov V.P., Shubin I.N. [Technological Bases of Functionalization of Multiwalled Carbon Nanotubes by Titanium Stearate for Subsequent Production of Composites], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 501-509, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.501-509 (In Russ., abstract in Eng.)

## **Isothermen der Adsorption von Ionen, Blei (II) durch Graphen-Nanoverbundwerkstoffe**

**Zusammenfassung:** Die vorliegende Arbeit ist der Untersuchung der Adsorption der Ionen von Blei (II) auf Graphen-Materialien gewidmet. Gleichgewichtsstudien wurden mit Hilfe der Freundlich- und Langmuir-Modelle durchgeführt. Die Anwendbarkeit aller zwei Isothermen zeugt davon, dass sowohl die Monoschichtadsorption als auch die heterogene Energieverteilung aktiver Zentren auf der Oberfläche des Adsorptionsmittels möglich sind. Die maximale experimentelle Adsorptionskapazität für Blei (II) für mehrschichtige Graphenpaste und Graphenpaste mit wenigen Schichten beträgt 230 bzw. 170 mg/g. Aufgrund der hohen Sorptionseigenschaften und einzigartigen physikalisch-chemischen Eigenschaften können die entwickelten Graphen-Nanoverbundwerkstoffe als vielversprechende Optionen bei der Entfernung von Schwermetallen aus Industrieabwässern dienen.

---

## **Les isothermes d'adsorption des ions de plomb (II) par des nanocomposites de graphene**

**Résumé:** Le présent article est consacré à l'étude de l'adsorption des ions de plomb (II) sur les matériaux de graphene. Les recherches de l'équilibre ont été réalisées à l'aide des modèles de Freundlich, de Langmuir. L'applicabilité de tous les deux isothermes dit que sont possibles l'adsorption de multiples couches ainsi que la répartition énergétique hétérogène des centres actifs sur la surface de l'adsorbant. La capacité maximale expérimentale d'adsorption par rapport au plomb (II) pour les pâtes de graphene de multiples couches et ceux de petites couches est égale à 230 et 170 mg/g, respectivement. Grâce aux hautes caractéristiques d'adsorption et des propriétés physico-chimiques uniques conçues les composites de graphene peuvent servir de variants dans l'élimination des métaux lourds à partir des effluents industriels.

---

**Авторы:** *Кучерова Анастасия Евгеньевна* – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Буракова Ирина Владимировна* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Бураков Александр Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---