

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРИЕНТАЦИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В МАТРИЦЕ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ

Э. Бахаа

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,  
bahaa.ezzeddin89@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** магнитная технология; математическая модель; ориентация углеродных нанотрубок; селективное покрытие; технологии для солнечной энергетики; улучшение поглощения света.

**Аннотация:** Неспособность ориентировать углеродные нанотрубки перпендикулярно падающим на них лучам снижает количество световой энергии, которую трубки поглощают и преобразуют в тепло, что может привести к уменьшению количества энергии, поглощаемой светопоглощающим слоем. Изучен процесс ориентации углеродных нанотрубок в матрице покрытия, используемой в солнечных панелях, чтобы получить максимальное поглощение этого слоя. Представлены конструкция машины, которая использует магнитную силу для ориентации углеродных нанотрубок, и модель, позволяющая рассчитать силу электрического тока и время, необходимое для достижения требуемой ориентации углеродных нанотрубок.

Обозначения	
$A$ – площадь движущейся нанотрубки, $\text{м}^2$ ;	$n$ – число витков катушки электромагнита;
$a$ – площадь поперечного сечения электромагнита, $\text{м}^2$ ;	$Re$ – число Рейнольдса;
$C$ – параметр, зависящий от конкретной геометрии и пространственного расположения препятствий;	$S$ – расстояние, пройденное каталитической частицей, $\text{м}$ ;
$d$ – диаметр нанотрубки, $\text{м}$ ;	$u$ – скорость объекта в жидкости, $\text{м/с}$ ;
$F$ – эффективная сила, $\text{Н}$ ;	$\gamma$ – коэффициент вязкости жидкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;
$H$ – магнитная постоянная $\cong 12,57 \times 10^{-7}$ , $\text{Н/м}$ ;	$\delta$ – длина молекулы поверхностно-активного вещества, $\text{м}$ ;
$i$ – интенсивность электрического тока, проходящего через катушку, $\text{А}$ ;	$\rho$ – плотность жидкости, $\text{кг/м}^3$ ;
$L$ – длина зазора между магнитом и каталитической частицей, $\text{м}$ ;	$\tau$ – время, необходимое каталитической частице для прохождения расстояния $S$ , равное времени шага, $\text{с}$
$l$ – длина нанотрубки, $\text{м}$ ;	
	Индексы
	$M$ – магнитная сила;
	$BT$ – вязкое трение

Использование нанотехнологий в процессе производства различных материалов позволяет улучшать имеющиеся или придавать новые свойства. Углеродные наноматериалы являются идеальным кандидатом для добавления в матрицу

полимерного покрытия в целях улучшения физических свойств модифицированного слоя [1 – 5], которые помогают в получении нового покрытия при невысокой стоимости, так что его можно применять в качестве абсорбирующего слоя в солнечных панелях, используемых для нагрева воды при легких и средних нагрузках. Однако, при использовании углеродных нанотрубок (УНТ), их ориентация влияет на поглощение электромагнитного спектра [6]. Для упорядочения структуры УНТ применяется несколько методов, в зависимости от среды, в которой они находятся [7, 8]. Проведено несколько исследований ориентации УНТ в полимерных материалах в зависимости от влияния магнитного поля, в которых удалось достичь требуемой ориентации, но эти исследования имеют ряд недостатков [9, 10]. Во-первых, отсутствует математическая модель, иллюстрирующая работу используемых устройств, а имеются только экспериментальные результаты. Во-вторых, применение ограничено небольшими лабораторными образцами, а не промышленным производством. В-третьих, для ориентации УНТ требуется магнитное поле с высокой напряженностью.

Предложена новая конструкция магнитного устройства, которое использует магнитную силу (меньшую, чем у аналогов) для ориентации УНТ параллельно подложке. Использование предлагаемой технологии позволяет достигать упорядоченной структуры УНТ в промышленных масштабах. Вместе с тем разработана математическая модель для расчета электрической силы, необходимой для получения требуемой ориентации УНТ.

В целях контроля ориентации УНТ используется магнитная сила, воздействующая на частицы железистого катализатора, прикрепленного к одному из концов углеродных нанотрубок. Данная магнитная сила применяется лишь перед сушкой слоя, в противном случае, УНТ не способны принимать необходимую ориентацию. Вектор действия магнитной силы параллелен поверхности подложки, которая в свою очередь будет проходить через электромагнит. Электромагнитная сила действует на частицы катализатора, создавая воздействие, которое заставляет атомы металла двигаться в направлении магнитной силы. В результате, частицы катализатора переместятся на определенное расстояние, УНТ будут ориентированы в соответствии с направлением приложенной магнитной силы.

Движение подложки происходит небольшими шагами; на каждом этапе покрытие распыляется, следом включается магнит на определенный период времени, затем подложка снова перемещается, проходит через узкую щель в магните, перпендикулярную магнитному полю. Это означает, что магнитная сила будет параллельна поверхности подложки (магнитная сила перпендикулярна магнитному полю). Схема процесса нанесения покрытия и ориентация УНТ представлены на рис. 1.

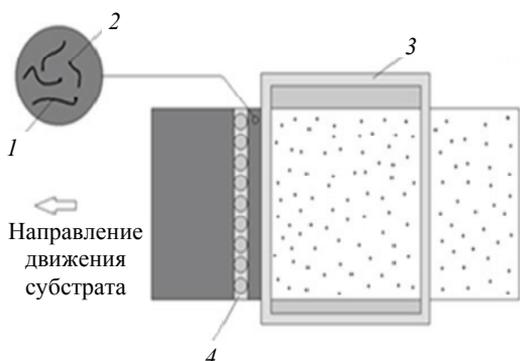
Чтобы переместить УНТ, прикрепленную к частице катализатора в жидкости, магнитная сила  $F_M$ , действующая на частицу катализатора, должна быть больше действующей на УНТ силы сопротивления  $F_{BT}$ , вызванной вязкостью жидкости (покрытия до высыхания) при движении твердого объекта (рис. 2).

Данное условие представлено математической формулой

$$F_M \geq F_{BT}. \quad (1)$$

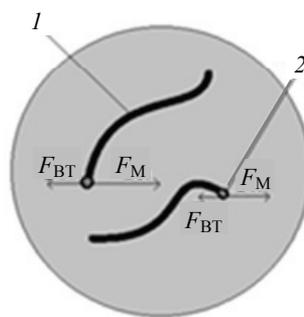
Магнитная сила (сила Лоренца), создаваемая электромагнитом, определяется по формуле

$$F_M = \frac{(ni)^2 Ha}{2L^2}. \quad (2)$$



**Рис 1. Последовательность процесса нанесения покрытия и ориентация УНТ:**

1 – УНТ; 2 – каталитическая частица;  
3 – электромагнит; 4 – сопло для распыления покрытия



**Рис 2. Действующие силы на УНТ в процессе ориентации:**

1 – УНТ; 2 – железная каталитическая частица

Движение наночастиц (УНТ) внутри жидкости с высокими скоростями ( $u > 100$  м/с) приводит к локальному снижению вязкости, ввиду выделяемого тепла из-за трения между УНТ и молекулами жидкости. Но в случае скоростей менее 100 м/с формула Стокса для расчета силы сопротивления также остается применимой [9]. Для определения силы сопротивления, действующей на УНТ, используется формула Навье–Стокса [9]

$$F_{BT} = \frac{CA\rho u^2}{2Re}. \quad (3)$$

Для круглого цилиндра, погруженного в область бесконечного потока, расчеты гидродинамики сплошной среды дают  $C = 4,467$ .

Число Рейнольдса жидкости, обтекающей нанотрубку, окруженную поверхностно-активным веществом, определяется по формуле

$$Re = \frac{\rho u(d + 2\delta)}{\gamma}. \quad (4)$$

Скорость движения УНТ в слое покрытия определяется по формуле

$$u = S/\tau. \quad (5)$$

Наибольшее расстояние, которое может пройти частица катализатора, равна двум длинам УНТ (в случае, когда она повернута на  $180^\circ$  от необходимой ориентации)

$$S \cong 2l. \quad (6)$$

Подставляя (4) – (6) в уравнение (3), определяем силу сопротивления

$$F_{BT} = \frac{\gamma CA l}{(d + 2\delta)\tau}. \quad (7)$$

Затем (7) и (2) в неравенство (1)

$$\frac{(ni)^2 Ha}{2L^2} \geq \frac{\gamma CA l}{(d + 2\delta)\tau}. \quad (8)$$

Из формулы (8) определяется сила электрического тока в катушках электромагнита, необходимая для осуществления процесса ориентации нанотрубок на каждом этапе подложки:

$$i \geq \sqrt{\frac{2L^2\gamma CAI}{n^2 Ha(d + 2\delta)\tau}}. \quad (9)$$

Отметим, что размер  $L$  представляет собой длину ступеньки, и чем ниже его значение, тем ниже градиент влияния магнитных сил, действующих на частицы катализатора, связанные с различными нанотрубками, рассеянными в слое покрытия.

Из математической модели в формуле (9) видно, что существует обратная пропорция между интенсивностью электрического тока, проходящего через провод катушки электромагнита, и временем, необходимым для процесса ориентации нанотрубок. Это связано с увеличением интенсивности электрического тока, что в свою очередь приводит к увеличению генерируемой катушкой магнитной силы, которая воздействует на частицу катализатора, увеличивает ее скорость движения (и, следовательно, движение нанотрубки, то есть сокращается время, требуемое для ориентации нанотрубки. Математическая модель также показывает, что увеличение числа витков катушки электромагнита позволяет снизить интенсивность используемого электрического тока, что важно, поскольку сила электрического тока вызывает нагрев электрической катушки магнита (эффект Джоуля). Вследствие этого, при снижении нагрева уменьшается потребность в охлаждении. Также, можно заметить, что уменьшение длины УНТ снижает время ориентации, необходимое при определенной интенсивности электрического тока, поскольку уменьшается значение силы сопротивления, действующей на них.

Анализируя полученные данные, обнаружено, что с помощью контролируемой магнитной силы, создаваемой электромагнитом, можно управлять ориентацией УНТ в матрице покрытия. Данный фактор важен, так как он сильно влияет на оптические и термические свойства слоя покрытия. Отметим, что рассмотренный метод может быть применен в промышленном масштабе, поскольку позволяет направлять УНТ параллельно поверхностям, используемым, например, в планарных солнечных коллекторах, и только в случае немагнитных металлических подложек, так что подложка не превращается в магнит при воздействии магнитного поля.

#### *Список литературы*

1. Enhancing Light Absorption and Carrier Transport of P3HT by Doping Multi-Wall Carbon Nanotubes / M. C. Wu, Y. Y. Lin, S. Chen [et al.] // *Chemical Physics Letters*. – 2009. – Vol. 468, Issues 1-3. – P. 64 – 68.
2. Thermal Properties of Carbon Nanotubes and Nanotube-Based Materials / J. Hone, M. C. Llaguno, M. J. Biercuk [et al.] // *Applied Physics A*. – 2002. – Vol. 74, Issue 3. – P. 339 – 343.
3. Hone, J. Phonons and Thermal Properties of Carbon Nanotubes / J. Hone // *Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications*. – М. : Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2001. – P. 273 – 286.

4. Оценка влияния модификатора на основе углеродных нанотрубок с сурфактантами на физико-механические характеристики строительных композитов / А. Г. Ткачев, Р. Д. А. Слдозян, З. А. Михалева, Ю. Н. Толчков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 660 – 670. doi: 10.17277/vestnik.2021.04.pp.660-670
5. Исследование теплопроводности наномодифицированных жидкостей / Е. Н. Туголуков, А. Дж. Аль-Шариф, Т. П. Дьячкова, Е. А. Буракова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 671 – 677. doi: 10.17277/vestnik.2021.04.pp.671-677
6. Gharbavi, K. Optical Properties of Armchair (7, 7) Single Walled Carbon Nanotubes / K. Gharbavi, H. Badehian // AIP Advances. – 2015. – Vol. 5, Issue 7. – P. 1 – 11.
7. Goh, P. S. Directional Alignment of Carbon Nanotubes in Polymer Matrices: Contemporary Approaches and Future Advances / P. S. Goh, A. F. Ismail, B. C. Ng // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2014. – Vol. 56. – P. 103 – 126.
8. Beigmoradi, R. Engineering of Oriented Carbon Nanotubes in Composite Materials / R. Beigmoradi, A. Samimi, D. Mohebbi-Kalhari // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2018. – Vol. 9, Issue 1. – P. 415 – 435.
9. Polymer Composites of Carbon Nanotubes Aligned by a Magnetic Field / T. Kimura, H. Ago, M. Tobita [et al.] // Advanced Materials. – 2002. – Vol. 14, Issue 19. – P. 1380 – 1383.
10. New Alignment Procedure of Magnetite-CNT Hybrid Nanofillers on Epoxy Bulk Resin with Permanent Magnets / S. G. Prolongo, B. G. Meliton, G. Del Rosario, A. Ureña // Composites Part B: Engineering. – 2013. – Vol. 46. – P. 166 – 172.
11. Nanoscale Fluid-Structure Interaction: Flow Resistance and Energy Transfer Between Water and Carbon Nanotubes / C. Chen, M. Ma, K. Jin [et al.] // Physical Review E. – 2011. – Vol. 84, Issue 4. – P. 046314.
12. Loos, M. Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNT Polymer Science and Technology / M. Loos. – M. ; Oxford : Elsevier, 2014. – 289 p.

---

## Spatial Orientation of Carbon Nanotubes in a Light-Absorbing Coating Matrix

E. Bahaa

*Department of Equipment and Technology of Manufacturing Nanoproducts,  
bahaa.ezzeddin89@gmail.com; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** magnetic technology; mathematical model; orientation of carbon nanotubes; selective coating; technologies for solar energy; improved light absorption.

**Abstract:** The inability to orient carbon nanotubes perpendicularly to the rays falling on them reduces the amount of light energy that the tubes absorb and convert into heat, which can lead to a decrease in the amount of energy absorbed by the light-absorbing layer. The process of orientation of carbon nanotubes in the coating matrix used in solar panels has been studied in order to obtain maximum absorption of this layer. The paper presents the design of a machine that uses magnetic force to orient carbon nanotubes, and a model that calculates the electric current and the time required to achieve the required orientation of carbon nanotubes.

## References

1. Wu M.C., Lin Y.Y., Chen S. [et al.] Enhancing Light Absorption and Carrier Transport of P3HT by Doping Multi-Wall Carbon Nanotubes, *Chemical Physics Letters*, 2009, vol. 468, issues 1-3, pp. 64-68.
2. Hone J., Llaguno M.C., Biercuk M.J. [et al.] Thermal Properties of Carbon Nanotubes and Nanotube-Based Materials, *Applied Physics A*, 2002, vol. 74, issue 3, pp. 339-343.
3. Hone J. *Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications*, Moscow: Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2001, pp. 273-286.
4. Tkachev A.G., Sldoz'yan R.D.A., Mikhaleva Z.A., Tolchkov Yu.N. [Assessment of the influence of a modifier based on carbon nanotubes with surfactants on the physical and mechanical characteristics of building composites], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 660-670, doi: 10.17277/vestnik.2021.04.pp.660-670 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Tugolukov Ye.N., Al'-Sharif A.Dzh., D'yachkova T.P., Burakova Ye.A. [Investigation of thermal conductivity of nanomodified liquids], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 671-677, doi: 10.17277/vestnik.2021.04.pp.671-677 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Gharbavi K., Badehian H. Optical Properties of Armchair (7, 7) Single Walled Carbon Nanotubes, *AIP Advances*, 2015, vol. 5, issue 7, pp. 1-11.
7. Goh P.S., Ismail A.F., Ng B.C. Directional Alignment of Carbon Nanotubes in Polymer Matrices: Contemporary Approaches and Future Advances, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol. 56, pp. 103-126.
8. Beigmoradi R., Samimi A., Mohebbi-Kalhari D. Engineering of Oriented Carbon Nanotubes in Composite Materials, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2018, vol. 9, issue 1, pp. 415-435.
9. Kimura T., Ago H., Tobita M. [et al.] Polymer Composites of Carbon Nanotubes Aligned by a Magnetic Field, *Advanced Materials*, 2002, vol. 14, issue 19, pp. 1380-1383.
10. Prolongo S.G., Meliton B.G., Del Rosario G., Ureña A. New Alignment Procedure of Magnetite-CNT Hybrid Nanofillers on Epoxy Bulk Resin with Permanent Magnets, *Composites Part B: Engineering*, 2013, vol. 46, pp. 166-172.
11. Chen C., Ma M., Jin K. [et al.] Nanoscale Fluid-Structure Interaction: Flow Resistance and Energy Transfer Between Water and Carbon Nanotubes, *Physical Review E*, 2011, vol. 84, issue 4, p. 046314.
12. Loos M. *Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNT Polymer Science and Technology*, Moscow; Oxford: Elsevier, 2014, 289 p.

---

### Räumliche Orientierung der Kohlenstoff-Nanoröhren in der Matrix der lichtabsorbierenden Beschichtung

**Zusammenfassung:** Die Unfähigkeit, Kohlenstoff-Nanoröhrchen senkrecht zu den auf sie einfallenden Strahlen auszurichten, verringert die Lichtenergiemenge, die die Röhren absorbieren und in Wärme umwandeln, was zu einer Verringerung der von der lichtabsorbierenden Schicht absorbierten Energiemenge führen kann. Es ist der Prozess der Orientierung von Kohlenstoffnanoröhren in der verwendeten Beschichtungsmatrix in Sonnenkollektoren erlernt, um eine maximale Absorption dieser

Schicht zu erzielen. Der Artikel präsentiert das Design der Maschine, die magnetische Kraft nutzt, um Kohlenstoff-Nanoröhrchen auszurichten, und das Modell, das den elektrischen Strom und die erforderliche Zeit berechnet, um die erforderliche Ausrichtung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen zu erreichen.

---

### **Orientation spatiale des nanotubes de carbone dans une matrice de revêtement absorbant la lumière**

**Résumé:** L'incapacité d'orienter les nanotubes de carbone perpendiculairement au faisceau qui les frappe réduit la quantité de l'énergie lumineuse que les tubes absorbent et convertissent en chaleur, ce qui peut entraîner une diminution de la quantité d'énergie absorbée par la couche absorbant la lumière. Est étudié le processus de l'orientation des nanotubes de carbone dans la matrice de revêtement utilisée dans les panneaux solaires pour obtenir l'absorption maximale de cette couche. Sont présentés la conception de la machine qui utilise la force magnétique pour orienter les nanotubes de carbone et un modèle permettant de calculer l'intensité du courant électrique et du temps nécessaire pour atteindre l'orientation requise des nanotubes de carbone.

---

**Автор:** *Бахаа Эзеддин* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Егоров Сергей Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.