

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В МЕДИЦИНЕ

Сакович М.С.<sup>1</sup>, Соловьёв А.Я.<sup>1</sup>, студенты гр.311801

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь

Дорошевич И.Л. – канд. физ.-мат. наук, доцент

**Аннотация.** В данной работе приводится краткое описание углеродных нанотрубок и их физических свойств. Рассмотрены возможности применения углеродных нанотрубок в медицине для изготовления имплантатов костной и хрящевой ткани, биологического припоя для лазерной сварки, искусственной мышцы, а также систем для адресной доставки лекарственных веществ.

**Ключевые слова.** Углеродные нанотрубки, искусственная мышца, биологический припой, система доставки лекарственных веществ, наноигла.

**Введение.** На протяжении последних лет объекты нанометрового масштаба по мнению экспертов названы самыми востребованными в различных сферах науки и техники. Они имеют широкую область применения, включая электронику, медицину, оптику, энергетику и другие отрасли. В числе наноструктур можно указать: графены, нанокристаллические ферромагнитные сплавы, фуллерены, нанокомпозиты, тонкопленочные многослойные наноструктуры, углеродные нанокольца, а также углеродные нанотрубки. Поэтому проблема использования углеродных нанотрубок в медицине очень актуальна в настоящее время.

Впервые углеродные нанотрубки были обнаружены в 1991 году японским микроскопистом Сумно Инжимой [1]. Он смог запечатлеть и выяснить структуру углеродных нанотрубок. Сумио Иидзима получил углеродные нанотрубки **методом электродугового разряда**. Этот метод заключается в создании электрической дуги между углеродными **катодом и анодом**. При этом происходит испарение углерода с анода и его осаждение на катоде в виде углеродных нанотрубок [2].

**Основная часть.** Углеродные нанотрубки – это аллотропная модификация углерода, представляющая собой полые цилиндрические структуры диаметром от 0,1 до нескольких десятков нанометров и длиной от 1 микрометра до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку графеновых плоскостей [3].

По количеству графеновых слоев углеродные нанотрубки делятся на однослойные (одностенные) и многослойные (многостенные). Однослойная УНТ похожа на «выкройку» графена, имеющей сеточную структуру и состоящую из бесчисленного множества правильных многоугольников. В многослойных УНТ расстояние между графеновыми слоями составляет 0,34 нм, как в обычном графите. Они характеризуются широким разнообразием форм и конфигураций. Типы многослойных УНТ:

- в виде совокупности коаксиально вложенных друг в друга цилиндрических трубок;
- в виде совокупности вложенных друг в друга коаксиальных (шестигранных) призм;
- в виде свитка.

По типу торцов УНТ бывают открытыми и закрытыми [4].

По электронным свойствам углеродные нанотрубки делятся на металлические и полупроводниковые.

Физические свойства нанотрубок находятся в прямой зависимости от хиральности (свойство молекулы не совмещаться в пространстве со своим зеркальным отражением). Хиральность характеризуется двумя целыми числами ( $m$ ,  $n$ ), которые указывают местонахождение того шестиугольника сетки, который в результате свертывания должен совпасть с шестиугольником в начале координат.

Свойства и преимущества углеродных нанотрубок:

- обладают адсорбционными свойствами. Могут хранить в себе различные газы. Попад внутрь атомы и молекулы уже не могут выйти наружу, т.к. концы трубки запаиваются;
- обладают капиллярным эффектом. Углеродные нанотрубки открытым концом втягивают в себя жидкие вещества и расплавленные металлы;
- улучшение эксплуатационных характеристик других материалов при добавлении в их структуру;
- высокая огнестойкость;
- рекордно высокая удельная поверхность – до 2 600 м<sup>2</sup>/г;
- высокая прочность. Углеродные нанотрубки прочнее стали в 50-100 раз;

- имеют в шесть раз меньшую плотность, чем обыкновенная сталь. Нанокабель длиной от Земли до Луны, состоящий из одной углеродной нанотрубки, можно намотать на катушку размером с маковое зернышко;
- модуль Юнга у углеродных нанотрубок вдвое выше, чем у обычных *углеродных волокон*;
- небольшая нить из углеродных нанотрубок диаметром 1 мм выдерживает груз весом 20 тонн, что в сотни миллиардов раз больше ее собственной массы;
- высокая гибкость. Под действием механических напряжений, нанотрубки не рвутся и не ломаются, а просто перестраиваются, сохраняя при этом высокую прочность, гибкость, прочие механические и электрические свойства;
- высокая устойчивость к изнашиваемости;
- повышенная электро- и теплопроводность. Проводимость меди, как лучшего металлического проводника таблицы Д.И. Менделеева, в 1000 раз хуже, чем у углеродных нанотрубок. При этом, электропроводность трубок зависит от индекса хиральности. В одних случаях нанотрубки могут быть полупроводниками, в других проявлять свойства практически идеальных проводников;
- с помощью углеродных нанотрубок можно создавать полупроводниковые гетероструктуры, т.е. структуры типа «металл/полупроводник». Для этого в процессе роста нанотрубки необходимо создать в ней структурный дефект (а именно, заменить один из углеродных шестиугольников пятиугольником) просто надломив его посередине особым образом. Тогда одна часть нанотрубки будет обладать металлическими свойствами, а другая - свойствами полупроводников;
- ловят радиоволны частотой от 40 до 400 МГц (обычные АМ и FM волны), а затем усиливают и передают их;
- гидрофобны. Отталкивают воду [5].

В таблице 1 приведены некоторые физические свойства углеродных нанотрубок.

Таблица 1 – Физические свойства углеродных нанотрубок

| Физическая величина            | Значение                                    |
|--------------------------------|---------------------------------------------|
| Плотность                      | $\rho \sim 1600 \text{ кг/м}^3$             |
| Максимальная плотность тока    | $J_{in} \sim 10^8 \text{ А/м}^2$            |
| Удельная проводимость          | $\sigma_{in} \sim 10^7 \text{ См/м}$        |
| Предел прочности на растяжение | $\sigma_{пр} \sim 50 \cdot 10^9 \text{ Па}$ |
| Модуль Юнга                    | $E \sim 10^{12} \text{ Па}$                 |

Недостатком УНТ является их токсичность и канцерогенность, аналогичная асбестовым волокнам. В настоящее время накопились многочисленные работы, посвященные исследованиям степени безопасности для здоровья человека углеродных нанотрубок и наноматериалов на их основе. Из них можно сформулировать следующие выводы:

- токсичность ОУНТ больше, чем у МУНТ;
- МУНТ не вызывают образования свободных радикалов, наоборот, они являются их «тушителями»;
- в биологической среде происходит окислительное ферментативное расщепление УНТ в течение восьми недель [6].

Углеродные нанотрубки открывают большие возможности для биологического и медицинского применения. Рассмотрим это более подробно.

Системы доставки антибиотиков. Амфотерицин В – противогрибковый препарат широкого спектра действия, но при этом его применение ограничено такими отрицательными качествами, как высокая токсичность, низкая растворимость в воде и способность агрегироваться на поверхности клеточной мембраны. При концентрации амфотерицина В, поступающего в ткани в чистом виде, в 10 мг/мл происходит гибель 40 % клеток ткани. Соединение данного антибиотика с УНТ позволяет повысить концентрацию антибиотика до 40 мг/мл без возникновения отрицательных эффектов [4].

Системы доставки ЛВ при химиотерапии рака. Метотрексат – широко известный противораковый лекарственный агент, который имеет такие отрицательные характеристики, как низкая биодоступность и токсичность. При использовании УНТ, имеющих встроенный «молекулярный адрес» для раковых клеток, наблюдается повышение его биодоступности и накопление метотрексата в тканях опухоли [4].

Имплантаты. В настоящее время изготавливаются различные композитные наноматериалы на основе УНТ, в которых матрицей служат полимеры, а наполнителем - углеродные нанотрубки различных

типов. Полимерные матрицы, армированные УНТ, могут быть использованы как конструкционный материал для костного цемента, а также в качестве структурного материала в кожной инженерии. Композит на основе полиуретана и УНТ, обладающий более выраженными электрическими и механическими свойствами, может быть использован для стимуляции роста костной и нервной тканей.

Соединения биологических тканей. Лазерная сварка (ЛС) является новым направлением, позволяющим значительно улучшить традиционные методы соединения и восстановления биологической ткани (БТ). При этом полученный шов практически не имеет грубых и сильно заметных рубцов. ЛС осуществляется путем нанесения на поверхность будущего шва специального биологического припоя, интенсивно поглощающего ЛИ. Последние исследования показали потенциальные возможности применения в лазерной сварке биологического припоя на основе водной дисперсии БСА + УНТ.

Искусственная мышца. Электрические приводы могут быть использованы в качестве мышц для человекоподобных роботов или биосовместимых имплантатов для человека. В медицинских приложениях подходящим является трехкомпонентный слоеный привод на основе ионно-металл-полимерного композита (ИМПК). Улучшить его свойства удалось путем замены ранее использовавшегося платинового или золотого электрода электродом на основе МУНТ. Приводы с МУНТ демонстрируют на 20 % большее смещение по сравнению с традиционным ИМПК на основе платины, причем они существенно дешевле. Данные проводящие наноматериалы имеют перспективы использования в качестве электродов в различных медицинских аппаратах: дефибрилляторах, кардиографах, энцефалографах и др. Приводы с УНТ развивают удельные мощности больше относительно натурной мышечной ткани человека [6].

Нанотрубки против ВИЧ. Ученные установили, что углеродные нанотрубки могут доставлять фрагменты ДНК и РНК в человеческие Т-клетки. В случае с вирусом иммунодефицита человека нанокапсулы не могут проникнуть внутрь Т-клеток. Для превращения нанотрубки в «носитель» ученые нанесли на поверхность наноструктуры фосфолипиды, благодаря которым нанотрубка могла проникнуть внутрь клетки. К концам фосфолипидов были добавлены РНК-отрезки. При попадании нанотрубок с грузом в Т-клетку сульфидный мостик, удерживающий РНК, рвется, и молекула «защищает» клетку от вируса.

Наноигла. Доставка генов и молекул РНК внутрь клетки - одно из потенциальных применений наноиглы. Она также позволит больше узнать о внутриклеточных процессах. Наиболее подходящими на роль «иглолки» в наноразмерном диапазоне являются углеродные нанотрубки. Они имеют характерную игловидную форму и достаточно гибки и жестки, чтобы проткнуть мембрану. Установка состоит из зонда атомно-силового микроскопа, к которому прикреплена многослойная углеродная нанотрубка. Сам же атомно-силовой микроскоп управляет иглой с нанометровым разрешением.

**Заключение.** Углеродные нанотрубки открывают новые возможности для биологического и медицинского применения: визуализация молекулярных, клеточных и тканевых структур; создание биосенсоров и электродов на их основе; целевая доставка разнообразных веществ; лучевая и фототермическая терапия. Однако, в связи с неясностью вопроса биосовместимости и цитотоксичности углеродных нанотрубок возможность их практического применения тормозится. Перед внедрением углеродных нанотрубок в практическое здравоохранение необходимо предусмотреть все возможные последствия их использования.

#### **Список использованных источников:**

1. О преимуществах применения углеродных нанотрубок в дисплеях и светодиодах /Данилов И. И., Бураев Д. А., Старухин А. В., Краско Е. С. // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 34. № 1. С. 105-113.
2. Углеродные нанотрубки. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/uglerodnye-nanotrubki-8b1fb1> - Дата доступа: 22.03.2025.
3. Углеродные нанотрубки. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [//ru.wikipedia.org/wiki/Углеродные\\_нанотрубки](https://ru.wikipedia.org/wiki/Углеродные_нанотрубки) - Дата доступа: 22.03.2025.
4. Нанобиотехнологии в медицине и фармации: учебное пособие / И. А. Мурашкина, А. А. Маркеев; Иркутский государственный медицинский университет, Кафедра фармакогнозии и фармацевтической технологии. – Иркутск : ИГМУ, 2022. – 80 с.
5. Углеродные нанотрубки, их производство, свойства и применение. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://втораяиндустриализация.рф/uglerodnye-nanotrubki-ih-proizvodstvo-svoystva-i-primeneniye/#fizicheskie-svoystva> - Дата доступа: 22.03.2025.
6. Перспективные наноматериалы с углеродными нанотрубками в биомедицинских приложениях/ А.Ю. Герасименко, Л.П. Ичкитидзе, В.М. Подгаецкий, С.В. Селищев // Медицинская техника. 2014. № 6. С. 23-27.
7. Наноуглеродная основа высокотехнологичного будущего. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://issek.hse.ru/trendletter/news/163193005.html> - Дата доступа: 22.03.2025
8. Российские ученые предупредили о вреде медицинских нанотрубок. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://hi-tech.mail.ru/news/120729-rossijskie-uchenye-predupredili-o-vrede-meditsinskih-nanotrubok/> - Дата доступа: 22.03.2025.

## THE USE OF CARBON NANOTUBES IN MEDICINE

*Sakovich M.S.<sup>1</sup>, Salauyou A.Y.<sup>1</sup>*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Doroshevich I.L. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor*

**Annotation.** This paper provides a brief description of carbon nanotubes and their physical properties. The possibilities of using carbon nanotubes in medicine for the manufacture of bone and cartilage tissue implants, biological solder for laser welding, artificial muscles, as well as systems for targeted drug delivery are considered.

**Keywords.** Carbon nanotubes, artificial muscle, biological solder, drug delivery system, nanoneedles.