

Список литературы:

1. *Ежов В.В., Салюк В.А., Вторенко В.И., Дымковец В.П., Манькин А.А.* Контрастная термолазерная терапия ВПЧ-ассоциированной патологии шейки матки (КТЛТ) // *Лазерная медицина*. 2011. Т. 15. Вып. 2. С. 80.
2. *Ежов В.В., Данилейко Ю.К., Вторенко В.И., Дымковец В.П., Манькин А.А., Салюк В.А., Салиев А.А.* Физиологические аспекты контрастной термолазерной терапии с примерами элиминации вируса папилломы человека с поверхности шейки матки // *Лазерная медицина*. 2013. Т. 17. Вып. 2. С. 19-24.
3. *Belov S.V., Danyleiko Y.K., Ezhov V.V., Elkanova E.E., Nefedov S.M., Osiko V.V., Salyuk V.A., Sidorov V.A.* Shock-Wave Destruction of Tissues as a Method for Treatment of Degenerative Diseases in Gynecology // *Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 49. № 6. PP. 366-369.
4. *Белов С.В., Данилейко Ю.К., Ежов В.В., Салюк В.А.* Метод лазерного ударно-волнового воздействия на патологические ткани при лечении дистрофических заболеваний влагалища и вульвы // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2016. № 4. С. 79-84.
5. *Белов С.В., Данилейко Ю.К., Ежов В.В., Лебедева Т.П., Неведов С.М., Манькин А.А., Осико В.В., Салюк В.А.* Тепловой взрыв поглощающих включений как механизм деструктивного воздействия на биологические ткани // *Доклады Академии наук*. 2013. Т. 452. № 5. С. 503-506.
6. *Belov S.V., Danyleiko Y.K., Ezhov V.V., Elkanova E.E., Salyuk V.A.* Laser Shock-Wave Destruction of the Mucous Membrane and Skin Tissues as a Method of Treatment of Pathological Processes in Gynecology // *Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 50. № 6. PP. 380-384.
7. *Чудновский В.М., Юсупов В.И., Дыдыкин А.В., Невожай В.И., Кисилев А.Ю., Жуков С.А., Баграташвили В.Н.* Лазероиндуцированное кипение биологических жидкостей в медицинских технологиях // *Квантовая электроника*. 2017. Т. 47. № 4. С. 361-370.
8. *Мейрманов А.М.* Задача Стефана. – Новосибирск: Наука, 1986. С. 239.

Сергей Владимирович Белов,

д-р техн. наук, вед. научный сотрудник,

Юрий Константинович Данилейко,

д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторий,

Алексей Борисович Егоров,

научный сотрудник,

Виктор Афанасьевич Салюк,

д-р техн. наук, ст. научный сотрудник,

Леонид Георгиевич Шилин,

научный сотрудник,

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,

Александр Михайлович Шулуток,

д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой,

кафедра факультетской хирургии № 2

лечебного факультета,

ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова»

Минздрава РФ,

г. Москва,

e-mail: ser79841825@yandex.ru

В.С. Деева, С.М. Слободян

Математическая модель взаимодействия однослойной нанотрубки – иглы зонда с биоповерхностью

Аннотация

Исследованы особенности колебаний произвольно ориентированной иглы зонда, выполненной из однослойной углеродной нанотрубки (SWCNT), применительно к биологическим поверхностям произвольного масштаба. Создана математическая модель, устанавливающая связь параметров SWCNT иглы с особенностями ее осцилляций по принципу Даламбера. Посредством моделирования изучено влияние жесткости и геометрии иглы на ее положение в трехмерном пространстве с учетом прикладных аспектов биологии.

Введение

Углеродные нанотрубки (CNT) [1], [2] – важный компонент материалов в области медицины, биологии и электроники [3]-[15], изучаемых методами сканирующей микроскопии различных типов [4]-[17]. Однослойная углеродная нанотрубка (SWCNT) – это плоскость одноатомной толщины листа графена, свернутая в цилиндр [2]. Диаметр трубок изменяется от одного до десятков нанометров при длине до нескольких сантиметров.

Исследования показывают, что развитие нанотехнологии в области биологии и электроники требует повышения качества методов наблюдения, оценки параметров и контроля состояния игл и консолей зондов [2]-[12], [18]-[22]. Недостаточная точность оценки положения игл при движении – причина жестких контактов игл с выступами исследуемой поверхности [19]-[21]. Поэтому изучение взаимодействия «игла – поверхность» и создание модели более точного ее динамического поведения [13], [14], [21]-[25] являются важными и актуальными задачами.

Исследование поведения SWCNT в условиях различных сред и внешних физических воздействий – предмет пристального внимания [14], [23]-[27], в том числе в области объектов живой природы [14]-[17]. На перспективы SWCNT и особенности их применения как элемента наноразмерной техники указывают исследования ученых Южной Кореи, США и Китая [3], в которых показана важная для медицины способность SWCNT к преобразованию механической энергии растяжения и кручения в электрическую. Развитие этого направления тесно связано с решением проблем динамики взаимодействия SWCNT с телами биологической среды. Во многих работах вопросы диагностики состояния и взаимодействия биологических тел исследуются путем решения систем нелинейных дифференциальных уравнений [4]-[6]. Есть работы, основанные на использовании корреляционной функции для характеристики нелинейного поведения траекторий слежения за биологическими поверхностями [6]-[8]. Кроме того, например в работе [8], рассчитана асимптотическая сходимость биологической системы к точке равновесия. G. Chesì [9] доказал существование точки равновесия такого движения на примере ре-

шения модели неопределенности генетических регуляторных сетей. Наличие запаздывания и искажения параметров при взаимодействии биосред показано в [10].

Одной из проблем, нерешенных на современном этапе развития биотехнологий, является получение SWCNT заданных форм и размеров. Отсутствие такой технологии рождает необходимость исследования возможностей применения в микроскопии зондов из SWCNT без ограничения длины. В этом случае представляют интерес закономерности изменения свойств SWCNT с учетом случайности зазора – диэлектрика [24]-[26], [28]-[30] в цепи «игла – биологическая поверхность».

Целью рассматриваемой работы является создание математической модели SWCNT-зонда, учитывающей случайное изменение величины зазора «игла – поверхность» под влиянием собственных колебаний иглы на неустойчивость положения SWCNT-нанотрубки в трехмерном пространстве независимо от ее геометрии. Аналитические зависимости модели должны быть справедливы для широкого диапазона игл в условиях случайного изменения величины зазора между иглой и шероховатостью биологической поверхности при отсутствии возможности прямого измерения этого параметра.

Методы исследования. Основные положения

Любое движение иглы порождает ее колебания. Зондовая микроскопия не является исключением [14]. Любая динамически меняющаяся нагрузка на иглу, закрепленную на консоли зонда [20]-[22], вызывает ответную реакцию – ускорение движения иглы [16] как самого чувствительного элемента системы измерения [14]-[21], [26]. Поэтому при изучении и моделировании динамики движения иглы из однослойной нанотрубки – SWCNT, используемой в качестве зонда [2], [27]-[29], [31], учтем возникающие при этом силы инерции, скорость движения иглы и кинетическую энергию, передающуюся ей при воздействии на нее выступа биологической поверхности. Колебания иглы в зондовой микроскопии оказывают большое влияние на формирование сигнала [14], [17]-[21], [32]. При учете колебаний возможны два подхода: в первом подходе главной задачей будет разработка мер подавления колебаний иглы [18], во втором [19] – их использование. В обоих подходах важно знать закон собственных колебаний иглы. Чтобы корректно описать колебания игл и их модельное представление, необходимо учесть наиболее значимые факторы. При всем разнообразии игл и природы колебаний в их движении есть общие известные закономерности.

С первого применения SWCNT как чувствительного элемента зонда [25] способы крепления игл на консоли систем микроскопии поверхности в большинстве известных применений практически не изменились. Вблизи исследуемой биологической поверхности положение SWCNT-иглы не остается статичным и неподвижным. На свободный конец SWCNT-иглы влияют мощные силы межмолекулярного и межатомного взаимодействия, усиливающиеся при малом зазоре «игла – биологическая поверхность», который необходим для достижения среднего разрешения 2...6 нм в плоскости поверхности и до 2 Å по вертикальной оси к поверхности [26]-[29].

Рассмотрим собственные продольные колебания стержня из свернутого листа графена (SWCNT), приняв модель маятника с сосредоточенной на свободном конце приведенной точечной массой. Вес SWCNT равен $P = m \cdot g$ (m – масса иглы длиной l ; g – ускорение свободного падения). Это модель иглы SWCNT как системы с одной степенью свободы. Состояние иглы определяет смещение приведенной массы m . Смещение центра массы (δ) от положения равновесия, вызванное любым воздействием, для произвольного времени обозначим y . Смещение иглы рождает восстанавливающую упругую силу F_r , возвращающую приведенную массу и свободный конец SWCNT длины l в состояние равновесия. Зависимость центра массы иглы от упругой силы смещения та же, что при действии единичной силы тяжести в статическом состоянии: $y = P \cdot \delta$. Перемещение точки приложения массы иглы под действием

единичной силы $\delta = 1 \cdot l / (E \cdot A)$, где E – модуль продольной упругости; A – площадь поперечного сечения SWCNT. Для горизонтально расположенной SWCNT как невесомой консоли с массой на свободном конце перемещение ее торца под действием той же единичной силы будет больше: $\delta = 1 \cdot \beta / (3 \cdot E \cdot I)$, где I – момент инерции сечения SWCNT.

Момент инерции SWCNT как однородного тонкого стержня массы m и длины l относительно оси, проходящей перпендикулярно игле через ее конец, равен $I = ml^2 / 3$. Полярный момент инерции $I_p = \int \rho^2 dA$ для цилиндра сплошного сечения диаметром d равен $I_p = \pi d^4 / 32$. Но SWCNT имеет центральное отверстие диаметром d , а наружный ее диаметр равен D . Поэтому полярный момент кольцевого сечения однослойной трубки SWCNT равен $I_p = \pi d^4 [1 - (d^4 / D^4)] / 32$.

Результаты

Перемещение $y = P\delta$ приведенной массы иглы m представим в виде

$$y = P / c, \quad (1)$$

где c – жесткость SWCNT, в данном случае равная силе упругости при единичном ее смещении. Связь действия собственной силы тяжести SWCNT на вызванное ею упругое перемещение y получим из уравнения (1) и, сравнивая выражения $y = P\delta$ и $P = yc$, увидим, что жесткость SWCNT-иглы – величина, обратная упругому смещению ее торца под действием единичной силы: $c = 1 / \delta$. Учитывая многообразие форм и размеров SWCNT, для анализа их поведения примем, что для SWCNT некоторой длины l_0 известно интегральное значение жесткости $c(l_0)$. При моделировании влияния параметров SWCNT примем эти величины l_0 и $c(l_0)$ за опорные значения для нормирования параметров. Результат нормирования для относительного изменения жесткости $k_c = c(l) / c(l_0)$ SWCNT с кольцевым сечением трубки (d – внутренний диаметр, D – внешний диаметр) в сравнении с SWCNT – эквивалентом сплошного сечения диаметром D представлен на рис. 1 в относительных единицах (о. е.).

Учтя в равенстве $c = 1 / \delta$ значение $\delta = 1 \cdot l / (E \cdot A)$, получим, что жесткость SWCNT, расположенной вертикально, обратно пропорциональна ее длине: $c = (E \cdot I) / l$. Зависимость изменения ее жесткости от относительной длины (l / l_0) показана на рис. 2, где относительная длина дана в сравнении с SWCNT-эквивалентом длины l_0 .

Для консоли, расположенной горизонтально, зависимость жесткости от длины кубически обратно пропорциональна длине SWCNT: $c = (3 \cdot E \cdot I) / l^3$.

Кроме восстанавливающей силы $F_r = c \cdot y$, на SWCNT-иглу действуют и силы инерции. Применяя принцип Даламбера, получим смещение y SWCNT от положения равновесия при свободных колебаниях как результат действия силы инерции F_i , равной

$$F_i = -m \cdot y'', \quad (2)$$

где $y'' = d^2y / dt^2$ – ускорение иглы при осцилляции. Известное условие равновесия действия сил F_r и F_i : $F_r - F_i = 0$. Используя его, из равенств $P = y \cdot c$ и (2) получим уравнение смещения свободного конца иглы под действием собственной силы тяжести: $c \cdot y - m \cdot y'' = 0$. Деление уравнения на m с учетом равенства $c / m = \omega^2$ (ω^2 – квадрат частоты колебаний) приводит к уравнению собственных колебаний иглы как системы с одной степенью свободы:

$$y'' + \omega^2 y = 0. \quad (3)$$

В отсутствии сил сопротивления решение уравнения (3) показывает незатухающие отклонения иглы от положения статического равновесия с частотой собственных резонансных колебаний $\omega = c^{1/2} / m$. Интегрирование уравнения (3) при отклонении иглы от положения равновесия, равного y_0 , и скорости иглы, равной v_0 в начальный момент времени ($t = 0$), дает функцию пространственной осцилляции иглы: $y = y_0 \cos(\omega t) +$

+ $v_0 \sin(\omega t) / \omega$. Это уравнение показывает, что траектория осцилляции иглы относительно положения равновесия в любой момент времени формируется суммой двух компонентов: косинусоидальной составляющей начального ее отклонения от равновесия, учитывающей вклад начальной скорости колебаний, и интеграла от первообразной $\cos(\omega t)$. Преобразование тригонометрической формы дает вид траектории осцилляции:

$$y = A_m \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (4)$$

Траектория осцилляции SWCNT-иглы, представленная выражением (4), – это гармоническая форма собственных колебаний SWCNT-иглы с амплитудой A_m , круговой частотой ω , периодом $T = 2\pi / \omega$ и начальной фазой φ_0 . Частота собственных колебаний SWCNT-иглы определена известным равенством $\omega^2 = c / m$. Относительное изменение резонансной частоты собственных колебаний вертикально расположенной SWCNT некоторой длины l с ростом относительной длины (l / l_0) подобно кривой изменения ее жесткости, представленной на рис. 2.

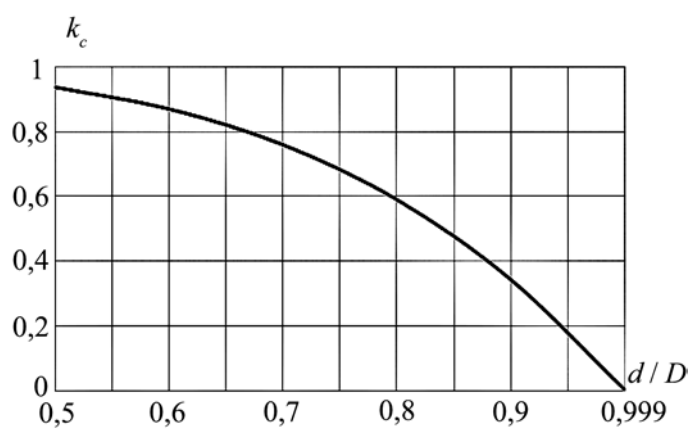


Рис. 1. Зависимость изменения жесткости k_c SWCNT от толщины стенки

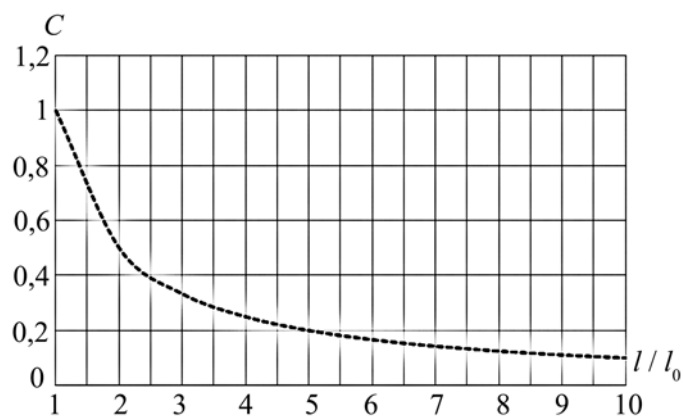


Рис. 2. Изменение жесткости вертикальной SWCNT от ее длины

Выражение (4) устанавливает форму собственных колебаний SWCNT-иглы в предположении определенного действия сил F_r и F_i , силы $P = y \cdot c$ и смещения y . В динамике движения SWCNT над неравномерной поверхностью силы межмолекулярного и межатомного взаимодействия при малом зазоре «игла – поверхность» не являются детерминированными, действие сил является вероятностным и осцилляция иглы будет случайной. Случайный рельеф поверхности биологических объектов [30] предопределяет стохастичность измерения [18], [22] и данных, получаемых зондовой системой.

Рассмотрим выражение $y = y_0 \cos(\omega t) + v_0 \sin(\omega t) / \omega$, являющееся функцией осцилляции иглы. Из этого уравнения видим, что закономерность изменения траектории осцилляции SWCNT относительно положения равновесия в любой момент

времени находится в явной зависимости от значения y_0 – амплитуды начального отклонения свободного конца SWCNT-иглы от положения равновесия и от значения v_0 – начальной скорости колебаний свободного конца SWCNT, подверженного действию многих сил. Кроме рассмотренного выше действия на свободный конец SWCNT собственной силы тяжести P , восстанавливающей силы F_r и силы инерции F_i , при малом зазоре «игла – поверхность» [26] наблюдается [27], [30] мощное действие сил межмолекулярного и межатомного взаимодействия – сил Кулона и ван дер Ваальса. Их проявления в большой степени зависят от зазора «игла – поверхность» [30]-[32] и физических свойств объектов биологической природы молекулярного и атомного масштабов поверхности: полинуклеотидов, липидов и протеинов. Синхронное действие межмолекулярных и межатомных сил взаимодействия в зазоре «игла – поверхность» на вязкоупругую поверхность биологического объекта [16] и осциллирующий свободный конец SWCNT может существенно изменять структуру и форму исследуемой биологической поверхности объекта. Поэтому повышение точности оценки биологической поверхности объектов с учетом знания физического изменения исследуемой поверхности силами межмолекулярного и межатомного взаимодействия в зазоре «игла – поверхность», случайности сигнала и его вероятностных свойств [11], [24] для зондовой системы является важным и необходимым.

Адекватность функционирования математической модели устойчивости и закономерности поведения SWCNT, учитывающей изменение зазора «SWCNT-игла – биологическая поверхность», подтверждается результатами численного моделирования и экспериментальными данными, приведенными во многих работах других исследователей, в том числе [2], [3], [12], [14], [15], [18]-[23], [25], [26], [28], [29], [32]-[34]. Из опубликованных в последнее время работ как основу для верификации предложенной модели и экспериментальный пример выделим работу [33], в которой убедительно показано, что учетом свойств колебаний SWCNT-иглы принципиально возможно достичь высокого качества изображения разных типов поверхностей, включая биомолекулы, наноматериалы и полимеры.

Заключение

Представлена математическая модель связи основных параметров иглы зонда из однослойной нанотрубки – SWCNT, учитывающая изменение зазора «SWCNT-игла – поверхность». Сравнением по жесткости выявлен приоритет вертикального положения SWCNT-игл, обеспечивающий их наибольшую жесткость. Показана стохастичность как самого измерения, так и данных, получаемых в зондовой микроскопии, что доказывает важность учета случайного характера сил межмолекулярного и межатомного взаимодействия при малом зазоре «SWCNT-игла – поверхность». Результаты работы применимы в атомно-силовой и емкостной микроскопии большинства типов (AFM, TEM, SEM, AEM), при анализе изображений, в энтропийной методике оценок и в инженерии биологических структур.

Список литературы:

1. *Ichkitidze L.P., Selishchev S.V., Gerasimenko A.Y., Podgaetsky V.M.* Mechanical properties of bulk nanocomposite biomaterial // *Biomedical Engineering*. 2016. Vol. 49. PP. 308-311.
2. *Graphene: Fabrication, Characterizations, Properties and Applications / Editors by: H. Zhu, Z. Xu, D. Xie, Y. Fang.* – Beijing: Academic Press, 2018.
3. *Kim S.H., Haines C.S., Li N., Kim K.J. et al.* Harvesting electrical energy from carbon nanotube yarn twist // *Science*. 2017. Vol. 357 (6353). PP. 773-778.
4. *Angeli D., Sontag E.D.* Multi-stability in monotone input/output systems // *Syst. Control Lett.* 2004. Vol. 51. PP. 185-202.

5. *Chaves M., Eissing T., Allgower F.* Bistable biological systems: A characterization through local compact input-to-state stability // *IEEE Trans. Autom. Control.* 2008. Vol. 52. PP. 87-100.
6. *Chesiand G., Huang Y.S.* Stability analysis of uncertain genetic sum regulatory networks // *Automatica.* 2008. Vol. 44. PP. 2298-2305.
7. *Chen L., Aihara K.* Stability of genetic regulatory networks with time delay // *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.* 2002. Vol. 49. PP. 602-608.
8. *Pan W., Wang Z., Gao H., Liu X.* Monostability and multistability of genetic regulatory networks with different types of regulation functions // *Nonlinear Anal.: Real World Appl.* 2010. Vol. 11. PP. 3170-3185.
9. *Chesi G.* Robustness analysis of genetic regulatory networks affected by model uncertainty // *Automatica.* 2010. Vol. 47 (6). PP. 1131-1138.
10. *Wang Z., Gao H., Cao J., Liu X.* On delayed genetic regulatory networks with polytopic uncertainties: Robust stability analysis // *IEEE Trans. Nano Biosci.* 2008. Vol. 7 (2). PP. 154-163.
11. *Deeva V., Slobodyan S.* Assessment of the tribological contact between sliding surfaces via an entropy approach // *Journal of Tribology.* 2019. Vol. 141. PP. 031602-031602-6.
12. *Komarov I.A., Rubtsova E.N., Lapashina A.S., Golovin A.V., Bobrinetskiy I.I.* Chemiresistive sensors for thrombin assay based on nanosize carbon nanotube films on flexible supports // *Biomedical Engineering.* 2017. Vol. 51. PP. 377-380.
13. *Arutyunov V.A., Slobodyan S.M.* Investigation of a CCD wave front sensor of an adaptive optics radiation focusing system // *Instruments and Experimental Techniques.* 1985. Vol. 28 (1 pt. 2). PP. 176-178.
14. *Atomic Force Microscopy in Molecular and Cell Biology / Editor: Cai J.* – Singapore: Springer Singapore, 2018.
15. *Zhao W., Cui W., Xu S., Wang Y., Zhang K., Wang D., Cheong L.-Z., Besenbacher F., Shen C.* Direct investigation of charge transfer in neurons by electrostatic force microscopy // *Ultramicroscopy.* 2019. Vol. 196. PP. 24-32.
16. *Schwille P.* There and back again: From the origin of life to single molecules // *European Biophysics Journal.* 2018. Vol. 47. PP. 493-498.
17. *Cho Y., Shin N., Kim D., Park J.Y., Hong S.* Nanoscale hybrid systems based on carbon nanotubes for biological sensing and control // *Bioscience Reports.* 2017. Vol. 37. PP. 3-30.
18. *Slobodyan S.* Optimization of a bimorph drive in optical measuring systems with feedback // *Measurement Techniques.* 2003. Vol. 46 (1). PP. 28-34.
19. *Caplins B.W., Holm J.D., Keller R.* Transmission imaging with a programmable detector in a scanning electron microscope // *Ultramicroscopy.* 2019. Vol. 196. PP. 40-48.
20. *Özer H.Ö.* Atomic resolution force imaging through the static deflection of the cantilever in simultaneous scanning tunneling/atomic force microscopy // *Ultramicroscopy.* 2019. Vol. 196. PP. 54-57.
21. *Wang Y., Wu S., Xu L., Zeng Y.* A new precise positioning method for piezoelectric scanner of AFM // *Ultramicroscopy.* 2019. Vol. 196. PP. 67-73.
22. *Slobodyan M.S., Slobodyan S.M., Tsupin A.* Optical deflector of a wave-front tilt corrector // *Journal of Optical Technologies.* 2008. Vol. 75. PP. 301-305.
23. *Mohammadi S.Z., Moghaddam M., Pishkenari H.N.* Dynamical modeling of manipulation process in trolling-mode AFM // *Ultramicroscopy.* 2019. Vol. 197. PP. 83-94.
24. *Deeva V., Slobodyan S.* Entropy estimation of a dynamical system via a contact interaction / *Safety and Reliability – Theory and Applications. Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017.* PP. 2577-2584.
25. *Dai H., Hafner J., Rinzler A., Colbert D., Smalley R.* Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy // *Nature.* 1996. Vol. 384. PP. 147-150.
26. *Zhang B., Liu Y., Chen Q., Lai Z., Sheng P.* Observation of high T_c one dimensional super conductivity in 4 angstrom carbon nanotube arrays // *AIP Advances.* 2017. Vol. 7. P. 025305.
27. *Romanishina S.A., Barchukov D.A., Slobodyan S.M.* The stability of single-walled carbon nanotube: Lyapunov function for probe needle / *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2019. Proceedings* 8783881. PP. 21-25.
28. *Burke P.J.* An RF circuit model for carbon nanotubes // *IEEE Transaction of Nanotechnology.* 2003. Vol. 2. PP. 55-58.
29. *Heath G.R., Scheuring S.* High-speed AFM height spectroscopy reveals μ s-dynamics of unlabeled biomolecules // *Nature Physics.* 2018. Vol. 9. PP. 1-11.
30. *Romanishina T.A., Romanishina S.A., Deeva V.S., Slobodyan S.M.* Numerical modeling of synovial fluid layer / *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, YSF 2017.* 2017. PP. 143-146.
31. *Edgcombe C., Masur S., Linscott E., Whaley B.J., Barnes C.* Analysis of a capped cnt by linear-scaling density-functional theory // *Ultramicroscopy.* 2019. Vol. 198. PP. 26-32.
32. *Wagner T.* Steady-state and transient behavior in dynamic atomic force microscopy // *Journal of Applied Physics.* 2019. Vol. 125. PP. 044301-044301-13.
33. *Slattery A.D., Shearer C.J., Shapter J.G., Blanch A.J., Quinton J.S., Gibson C.T.* Improved application of carbon nanotube atomic force microscopy probes using peakforce tapping mode // *Nanomaterials.* 2018. Vol. 8 (4). PP. 807-819.
34. *Wong C., West P., Olson K., Mecartney M., Starostina N.* Tip dilation and AFM capabilities in the characterization of nanoparticles // *JOM.* 2017. Vol. 59. PP. 12-16.

Вера Степановна Деева,
 канд. техн. наук, доцент,
 Томский политехнический университет,
 г. Томск,
 Степан Михайлович Слободян,
 д-р техн. наук, профессор,
 Тверской государственный технический университет,
 г. Тверь,
 e-mail: sms_46@ngs.ru

* * * * *