Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018

© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 620.179.118.2:539.211

О ПАРАМЕТРАХ НАНОТОПОГРАФИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЕЁ ПРОФИЛЯ

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22

iz2v@tvcom.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.313

Аннотация: Рассмотрены высотные и шаговые параметры нанотопографии технических поверхностей и некоторые их корреляционные связи в сравнении с аналогичными параметрами и связями для микромасштабного уровня (микрошероховатость). Показано, что на наномасштабном уровне хорошо выполняются как теоретические, так и эмпирические зависимости, характеризующие топографию поверхностей на микромасштабном уровне.

Ключевые слова: *поверхность, топография, наношероховатость, микрошероховатость, высотные параметры, шаговые параметры, корреляционные связи.*

1. Введение

Топография технических поверхностей играет важную роль в протекании многих процессов, связанных с функционированием современных технических устройств. К таким процессам относятся трение, изнашивание, перенос энергии (механической, тепловой, электрической), адсорбция, отражение электромагнитных волн, утечка через уплотнения и др. Современные технологии освоили микромасштабный и активно осваивают наномасштабный уровни характерных размеров, что вызвало закономерный интерес к изучению микро- и нанотопографии поверхностей. Освоению наномасштабного уровня в научном и технологическом плане способствовало появление высокочувствительных средств измерения топографии поверхностей, таких, как сканирующая туннельная и атомная силовая микроскопии.

Исследованию микрогеометрии технических поверхностей посвящено много работ, начиная с середины XX века [1-5]. При этом основное внимание уделялось шероховатости поверхностей – отклонениям от идеальной геометрической формы в диапазоне от десятых долей миллиметра до сотых долей микрометра. Помимо детерминированного подхода к описанию микрогеометрии поверхности в виде набора фиксированных стандартных высотных и шаговых параметров, широко использовались статистические методы. В общем случае микрошероховатость технической поверхности как объект математического описания содержит как детерминированную, так и случайную составляющие. В силу специфики процессов технологической обработки поверхностей, для грубых поверхностей (с относительно большой шероховатостью) существенна детерминированная

составляющая, для гладких поверхностей преобладает случайная составляющая. В последнем случае для описания микрогеометрии использовались представления профиля поверхности в виде случайного процесса и поверхности как таковой в виде случайного поля [2, 5, 6]. Но даже при детерминированном подходе широко используются статистические методы, например, для отыскания корреляционных связей между различными параметрами шероховатости или для оценки достоверности результатов измерения тех или иных параметров.

С введением в научный обиход понятия фрактального объекта закономерно появилось много работ, основанных на фрактальном представлении технической поверхности и ее профиля [3, 5, 7-9]. Однако надо иметь в виду, что далеко не всякую техническую поверхность можно априори считать фрактальным объектом [4].

Цель данной работы – сравнение некоторых характеристик наношероховатости технических поверхностей (наномасштабный уровень) и их корреляционных связей с аналогичными характеристиками и связями для микрошероховатости (микромасштабный уровень). Необходимость такого сравнения вызвана тем, что микро- и наношероховатость технических поверхностей отличаются по своей природе. Микрошероховатость определяется в основном технологическими факторами, хотя свойства обрабатываемого материала также играют определенную роль в ее формировании. Наношероховатость в большой (если не бóльшей) степени связана с кристаллическим строением твердых тел и его дефектами, а также со строением и свойствами различных по природе поверхностных пленок (оксидных и др.).

2. Образцы и методика исследований

Исследовалась нанотопография поверхностей образцов из высоколегированной стали и высокочистого серебра, полученных финишной абразивной обработкой (доводкой). Параметры соответствующей поверхности и её профиля определяли с помощью атомного силового микроскопа SOLVER P47-PRO средствами штатного программного обеспечения, кроме того, некоторые параметры профиля исследуемой поверхности определяли обработкой профилограмм, полученных на этом же приборе. Статистически устойчивые (стабильные) параметры наношероховатости исследованных поверхностей приведены в Таблице 1. Эти характеристики аналогичны характеристикам, определяемым следующими государственными стандартами для микрошероховатости [10-13]. Далее в основном использованы обозначения параметров согласно [12, 13]. Аналогичные параметры и их обозначения используются в других национальных стандартах. К сожалению,

параметры, определяемые стандартами ИСО, содержат в своих обозначениях до 4 символов, что делает их малопригодными для использования в математических выражениях.

Таблица 1. Некоторые параметры нанощероховатости исследованных поверхностей

Материал	Параметры поверхности			Параметры профиля		
	S_a , нм	S_q , нм	S_{10z} , нм	R_a , нм	R_q , нм	R_z , нм
Сталь	2,6	3,3	13,4	2,5	3,2	12,9
Серебро	4,3	5,3	20,8	4,9	5,9	16,7

Обозначения: S_a – среднее арифметическое значение высоты поверхности, S_q – среднее квадратическое значение высоты поверхности, S_{10z} – высота поверхности по десяти точкам, R_a – среднее арифметическое отклонение профиля, R_q – среднее квадратическое отклонение профиля, R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам.

Длина оценивания параметров нанощероховатости составляла 5 мкм для стальной поверхности и 3 мкм для серебряной, что в несколько раз меньше шага неровностей микрошероховатости.

3. Параметры нанощероховатости и их корреляционные связи

Подробный анализ аналогичных соотношений для параметров микрошероховатости проведен в работе [14] на основании статистического исследования шероховатости поверхностей большого диапазона высот (от десятых долей до нескольких единиц микрометров), полученных различными технологическими способами обработки. Ориентируясь на результаты этого исследования, проведем аналогичный анализ для параметров нанощероховатости указанных в Таблице 1 поверхностей.

Соотношение шаговых параметров профиля $\psi = S / S_m = n_0 / 2n_m$, где S – средний шаг местных выступов профиля, S_m – средний шаг неровностей профиля, n_0 – среднее число пересечений профилем своей средней линии, n_m – среднее число максимумов профиля. Данный параметр характеризует ширину спектра профиля [14]. Значения ψ , близкие к 1, соответствуют узкополосному процессу (значение $\psi = 1$ соответствует синусоидальному профилю), значения ψ , существенно меньшие единицы, соответствуют широкополосному процессу (случайной шероховатости). Сравнение значений параметра ψ для микро- и нанощероховатости представлено в Таблице 2.

Высотные параметры профиля и их соотношения

Соотношение R_q / R_a . По величине данного соотношения также можно судить о степени случайности поверхности и ее профиля. Для регулярной шероховатости, профиль которой близок к синусоиде,

теоретическое значение $R_q / R_a = \pi / (2\sqrt{2}) \approx 1,11$. Для нормального (гауссовского) случайного профиля теоретическое значение $R_q / R_a = \sqrt{\pi}/2 \approx 1,25$. Для микрошероховатости типичные значения $R_q / R_a = 1,20 \div 1,35$ (см. Таблицу 2), хотя для грубообработанных поверхностей наблюдались значения $R_q / R_a = 1,45$ [14]. Полученные нами соотношения для наношероховатости, которая по своей природе, безусловно, ближе к случайной, чем к регулярной, также приведены в Таблице 2. Практически, полученные экспериментально значения параметра R_q / R_a для наношероховатости совпадают в пределах погрешности с теоретическим значением для нормального случайного профиля.

Таблица 2. Соотношения параметров шероховатости технических поверхностей на различных масштабных уровнях

Параметры и их соотношения	Масштабный уровень неровностей		
	Микрошероховатость [14, 15]	Наношероховатость	
		Стальная поверхность	Серебряная поверхность
$\psi = n_0 / 2n_m$	0,4÷0,7	0,42±0,06	0,38±0,07
$C = R_q / R_a$	1,20÷1,35	1,26±0,02	1,21±0,03
$R_{\max} / R_a$	5,5÷6,8	8,0±1,0	5,2±0,7
R_p / R_a	2,8÷3,4	2,9±0,2	2,6±0,4
R_z / R_a	4,0÷5,0	5,2±0,3	3,4±0,3
S_m / R_a	40÷120	85	85
S / R_a	20÷80	35	35

Соотношения $R_{\max} / R_a$ и R_p / R_a , где $R_{\max}$ – полная высота профиля, R_p – высота наибольшего выступа профиля. Параметры $R_{\max}$ и R_p по своей природе статистически гораздо менее устойчивы (менее надежны, более изменчивы), чем параметры R_a или R_q . Так, для исследованных нами поверхностей коэффициенты вариации параметров $R_{\max}$ и R_p в 2÷2,5 раза больше, чем параметров R_a или R_q . Это не удивительно, поскольку параметры $R_{\max}$ и R_p представляют собой экстремальные оценки, тогда как параметры R_a и R_q получаются в результате статистического усреднения.

В связи с этим представляет практический интерес установление корреляционных связей, например, между устойчивым параметром R_a и менее надежными параметрами $R_{\max}$, R_z или R_p .

Для микрошероховатости на очень большом статистическом

материале для очень широкого спектра технологических способов обработки поверхностей, начиная от доводки и кончая обработкой напильником или абразивной бумагой, экспериментально получены следующие корреляционные соотношения $R_{\max} = (5,5 \div 6,8)R_a$ и $R_z = (4,0 \div 5,0)R_a$ [15]. Для симметричного профиля, соответственно, $R_p = (2,8 \div 3,4)R_a$.

Для модели профиля поверхности в виде нормального стационарного случайного процесса можно воспользоваться формулой, связывающей параметры R_p и R_a [2]:

$$E\{R_p\} \approx E\{R_a\} \sqrt{\pi \ln(E\{n_0\}/2)}, \quad (1)$$

где символ E означает математическое ожидание соответствующего параметра на длине оценки. Расчет по формуле (1) для исследованных нами поверхностей дает следующие результаты: для стальной поверхности $E\{R_p\} \approx 3,2E\{R_a\}$, для серебряной поверхности $E\{R_p\} \approx 2,5E\{R_a\}$.

Экспериментально для наносероховатости нами получены соотношения параметра R_a с параметрами $R_{\max}$, R_z и R_p , приведенные в Таблице 2. Полученные соотношения в целом хорошо соответствуют результатам расчетов по формуле (1) и приведенным выше статистическим данным, относящимся к микрошероховатости [15].

Соотношение величины параметра $R_{\max}$ и длины оценивания. Как уже отмечалось, параметр $R_{\max}$ обладает невысокой статистической устойчивостью, поскольку определяется одним единственным значением на длине оценивания. Оценка данного параметра зависит от длины оценивания [16] согласно следующей формуле:

$$R_{\max}^{(nL)} = R_{\max}^{(L)} \sqrt{1 + \ln n / \ln(L / Rq)}, \quad (2)$$

где $R_{\max}^{(L)}$ — значение параметра, определенное на длине оценивания L , $R_{\max}^{(nL)}$ — то же на длине оценивания в n раз больше. Аппаратные возможности и размеры поверхности не всегда позволяют существенно увеличивать длину оценивания. Если считать, что профиль поверхности обладает свойством эргодичности (что не всегда выполняется), то увеличение длины оценивания в n раз эквивалентно увеличению во столько же раз числа коротких длин оценивания (базовых длин), по которым находится оценка того или иного параметра.

Для исследованных поверхностей при $n=10$ экспериментально найденное отношение $R_{\max}^{(nL)} / R_{\max}^{(L)}$ равно $1,17 \pm 0,13$ для стальной поверхности и $1,18 \pm 0,10$ для серебряной поверхности. Расчет по формуле (2) дает соответственно величины указанного отношения 1,14 для стальной поверхности и 1,17 для серебряной, что в пределах погрешности

полностью совпадает с экспериментальными результатами.

Однако даже уточненное таким образом значение параметра $R_{\max}$ для профиля остается меньше аналогичного значения $S_{\max}$ для поверхности – на 16% для стальной поверхности и на 12% для серебряной. На это обстоятельство указывается также в работе [17], где отмечается, что значения экстремальных параметров для поверхности на 5÷20% больше, чем для профиля. Причина такого расхождения в том, что на поверхности имеются очень немногочисленные, единичные, но глубокие впадины. Вероятность попадания этих впадин на оцениваемый профиль пренебрежимо мала, на эксплуатационные свойства поверхности и контакта они практически не оказывают влияния. То же относится к самым высоким выступам. Однако эти единичные выступы и впадины увеличивают величину $S_{\max}$ и, соответственно, отношения $S_{\max} / R_{\max}$.

Соотношение высотных и шаговых параметров. В работе [14] экспериментально получены отношения шаговых параметров микрошероховатости S и S_m к величине среднего арифметического отклонения профиля R_a : $S_m / R_a \approx (40 \div 120)$, $S / R_a \approx (20 \div 80)$. Большие значения соответствуют более гладким поверхностям, меньшие – более грубым. Для нанощероховатости нами получены практически совпадающие для стальной и серебряной поверхностей значения S_m / R_a и S / R_a (см. Таблицу 2). Оба значения находятся в приведенных выше интервалах, первое значение соответствует середине соответствующего интервала, второе – одной трети.

4. Заключение

Проведенный анализ параметров нанотопографии технических поверхностей и их корреляционных связей показал, что на наномасштабном уровне хорошо выполняются как теоретические, так и эмпирические зависимости, характеризующие топографию поверхностей на микромасштабном уровне (микрошероховатость). Это объясняется статистической природой как микро-, так и нанощероховатости и соответственно общими подходами к их теоретическому описанию с помощью моделей в виде случайных полей (поверхность) и случайных процессов (профиль).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00614).

Библиографический список:

1. Дунин-Барковский, И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и

- некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
2. **Рудзит, Я.А.** Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей / Я.А. Рудзит. – Рига: Зинатне, 1975. – 210 с.
3. **Григорьев, А.Я.** Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А.Я. Григорьев. – Минск: Беларуская навука, 2016. – 247 с.
4. **Уайтхауз, Д.** Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы / Д. Уайтхауз. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. – 472 с.
5. **Thomas, T.R.** Rough surfaces / T.R. Thomas. – London: Imperial College Press, 1999. – 278 p.
6. **Хусу, А.П.** Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
7. **Тихомиров, В.П.** Фрактальные модели инженерных поверхностей / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, П.В. Тихомиров // Вестник БГТУ. – 2014. – № 3. – С. 72-80.
8. **Брылкин, Ю.В.** Соотношение фрактальной размерности и различной шероховатости для образцов меди / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2013. – Вып. 5. – С. 33-38.
9. **Антонов, А.С.** Исследования морфологии рельефа пленок меди на поверхности слюды / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов, К.Б. Подболотов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 19-26.
10. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности: ГОСТ Р ИСО 4287-2014; введ. 01.01.2016.
11. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Часть 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности: ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014; введ. 01.01.2016.
12. Шероховатость поверхности. Термины и определения (с Изменением № 1): ГОСТ 25142-82; введ. 01.01.1983.
13. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики (с Изменениями № 1, 2): ГОСТ 2789-73. – Взамен ГОСТ 2789-59; введ. 01.01.1975.
14. **Экслер, Л.И.** Экспериментальные соотношения для высотных и шаговых параметров шероховатости / Л.И. Экслер // Метрологические и технологические исследования качества поверхности. – Рига: Зинатне, 1976. – С. 37-42.
15. **Дьяченко, П.Е.** О разработке проекта международного стандарта на шероховатость поверхности / П.Е. Дьяченко, В.Э. Вайнштейн, Т.М. Карпова // Качество поверхности. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – № 4. – С. 3-12.
16. **Харач, Г.М.** Об определении характеристик микрогеометрии поверхности со случайной шероховатостью при расчетах трения и износа / Г.М. Харач, Л.И. Экслер // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Наука, 1971. – С. 169-175.
17. **Мусалимов, В.М.** Динамика фрикционного взаимодействия / В.М. Мусалимов, В.А. Валетов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 191 с.

References:

1. **Dunin-Barkovskij, I.V.** Izmerenie i analiz sherohovatosti, volnistosti i nekruglosti poverhnosti / I.V. Dunin-Barkovskij, A.N. Kartashova. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 232 p.
2. **Rudzit, Ya.A.** Mikrogeometriya i kontaktnoe vzaimodejstvie poverhnostej / Ya.A. Rudzit.

- Riga: Zinatne, 1975. – 210 p.
3. **Grigor'ev, A.Ya.** Fizika i mikrogeometriya tekhnicheskikh poverhnostej / A.Ya. Grigor'ev. – Minsk: Belaruskaya navuka, 2016. – 247 p.
4. **Whitehouse, D.** Metrologiya poverhnostej. Principy, promyshlennye metody i pribory / D. Whitehouse. – Dolgoprudnyj: Izdatel'skij Dom «Intellect», 2009. – 472 p.
5. **Thomas, T.R.** Rough surfaces / T.R. Thomas. – London: Imperial College Press, 1999. – 278 p.
6. **Husu, A.P.** Sherohovatost' poverhnostej (teoretiko-veroyatnostnyj podhod) / A.P. Husu, Yu.R. Vitenberg, V.A. Pal'mov. – M.: Nauka, 1975. – 344 p.
7. **Tihomirov, V.P.** Fraktal'nye modeli inzhenernyh poverhnostej / V.P. Tihomirov, M.A. Izmerov, P.V. Tihomirov // Vestnik BGUTU. – 2014. – no. 3. – P. 72-80.
8. **Brylkin, Yu.V.** Sootnoshenie fraktal'noj razmernosti i razlichnoj sherohovatosti dlya obrazcov medi / Yu.V. Brylkin, A.L. Kusov // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2013. – I. 5. – P. 33-38.
9. **Antonov, A.S.** Issledovaniya morfologii rel'efa plenok medi na poverhnosti slyudy / A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov, D.V. Ivanov, K.B. Podbolotov // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2017. – I. 9. – P. 19-26.
10. Geometricheskie harakteristiki izdelij (GPS). Struktura poverhnosti. Profil'nyj metod. Terminy, opredeleniya i parametry struktury poverhnosti: GOST R ISO 4287-2014; vved. 01.01.2016.
11. Geometricheskie harakteristiki izdelij (GPS). Struktura poverhnosti. Areal. Chast' 2. Terminy, opredeleniya i parametry struktury poverhnosti: GOST R ISO 25178-2-2014; vved. 01.01.2016.
12. Sherohovatost' poverhnosti. Terminy i opredeleniya (s Izmeneniyem № 1): GOST 25142-82; vved. 01.01.1983.
13. Sherohovatost' poverhnosti. Parametry i harakteristiki (s Izmeneniyami № 1, 2): GOST 2789-73. – Vzamen GOST 2789-59; vved. 01.01.1975.
14. **Eksler, L.I.** Eksperimental'nye sootnosheniya dlya vysotnyh i shagovyh parametrov sherohovatosti / L.I. Eksler // Metrologicheskie i tekhnologicheskie issledovaniya kachestva poverhnosti. – Riga: Zinatne, 1976. – P. 37-42.
15. **D'yachenko, P.E.** O razrabotke proekta mezhdunarodnogo standarta na sherohovatost' poverhnosti / P.E. D'yachenko, V.E. Vajnshtejn, T.M. Karpova // Kachestvo poverhnosti. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1959. – no. 4. – P. 3-12.
16. **Harach, G.M.** Ob opredelenii harakteristik mikrogeometrii poverhnosti so sluchajnoj sherohovatost'yu pri raschetah treniya i iznosa / G.M. Harach, L.I. Eksler // Kontaktnoe vzaimodejstvie tverdyh tel i raschet sil treniya i iznosa. – M.: Nauka, 1971. – P. 169-175.
17. **Musalimov, V.M.** Dinamika frikcionnogo vzaimodejstviya / V.M. Musalimov, V.A. Valetov. – St.-Peterburg: SpbGU ITMO, 2006. – 191 p.

ON NANOTOPOGRAPHIC PARAMETERS OF ENGINEERING SURFACE AND ITS PROFILE

V.V. Izmailov, M.V. Novoselova
Tver State Technical University

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.313

Abstract: Amplitude and spacing parameters of engineering surfaces nanotopography and some their correlations have been considered in comparison with similar parameters and correlations on a microscale level (microroughness). It is shown that on a nanoscale level theoretical and empirical relations characterizing a surface topography on a microscale level hold true.

Keywords: surface, topography, nanoroughness, microroughness, amplitude parameters, spacing

parameters, correlations.

Измайлов Владимир Васильевич – д.т.н., профессор кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Новоселова Марина Вячеславовна – к.т.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Vladimir V. Izmailov – Dr. Sc., Professor, Department of Applied Physics, Tver State Technical University

Marina V. Novoselova – Ph. D., Docent, Department of Applied Physics, Tver State Technical University