

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1104-1111

УДК 543.428

## Влияние наноразмерных горизонтальных неоднородностей на послойный анализ поверхности методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии

Денис Сергеевич Лукьянцев<sup>1</sup>✉, Александр Владимирович Лубенченко<sup>2</sup>,  
Дмитрий Александрович Иванов<sup>3</sup>, Ольга Игоревна Лубенченко<sup>4</sup>,  
Александр Сергеевич Федотов<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация

<sup>1</sup> stavden1996@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4350-8034>

<sup>2</sup> LubenchenkoAV@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5998-5495>

<sup>3</sup> iv\_prof@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3760-0598>

<sup>4</sup> IvanovaOI@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6317-2841>

<sup>5</sup> courage\_man@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7641-3173>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Количественный послойный анализ поверхностных слоев тонких пленок проводят с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии по расчетной модели, которая предполагает, что поверхностные слои образца однородны и плоскопараллельны. Однако практически любая поверхность ультратонкой пленки неровная. Исследование такой поверхности по модели плоскопараллельных слоев может привести к некорректным результатам. В настоящей работе для анализа ультратонкой пленки предложено использовать модель неоднородного стохастического наноструктурированного поверхностного слоя. **Метод.** Поверхностные стохастические наноструктурированные неоднородности описаны функцией нормального распределения Гаусса и определяются тремя параметрами: дисперсия (разброс толщин по слою), средняя и максимальная толщины поверхностного слоя. Впервые определен вид рентгеновского фотоэлектронного спектра неоднородной стохастической наноструктурированной поверхности с помощью функций рождения и прохождения фотоэлектронов через поверхностный слой. Разработанная модель основана на следующих предположениях: фотоэлектроны рождаются в веществе и движутся прямо-вперед (приближение Straight Line Approximation) по нормали к поверхности, плотность их потока ослабевает в слое по закону Бугера–Ламберта; фотоэлектроны с различными энергиями теряют энергию по-разному, потери энергии фотоэлектронов в объеме и на поверхности слоя различны. **Основные результаты.** Выполнено моделирование рентгеновских фотоэлектронных спектров окисленной металлической пленки по следующим моделям: однородные плоскопараллельные слои, островковый и неоднородный стохастический наноструктурированные поверхностные слои. Определены границы применимости моделей однородных плоскопараллельных слоев и простого периодически островкового наноструктурированного поверхностного слоя для анализа неоднородной стохастической наноструктурированной поверхности. При некоторых параметрах неоднородного стохастического поверхностного слоя модель однородных плоскопараллельных слоев показывает удовлетворительные результаты послойного анализа. Показано, что модель простого периодически наноструктурированного островкового слоя дает неадекватные результаты при анализе неоднородной стохастической поверхности. **Практическая значимость.** Проведенные в работе исследования показали, что для более точного послойного анализа неоднородной ультратонкой пленки необходимо учитывать неоднородность реальной поверхности, в противном случае полученные результаты будут не соответствовать фактическим.

### Ключевые слова

послойный фазовый анализ, горизонтальные неоднородности, шероховатость поверхности, наноразмерные пленки, РФЭС

**Ссылка для цитирования:** Лукьянцев Д.С., Лубенченко А.В., Иванов Д.А., Лубенченко О.И., Федотов А.С. Влияние наноразмерных горизонтальных неоднородностей на послойный анализ поверхности методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1104–1111. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1104-1111

© Лукьянцев Д.С., Лубенченко А.В., Иванов Д.А., Лубенченко О.И., Федотов А.С., 2022

## Influence of nano-sized horizontal inhomogeneities on surface profiling by means of XPS

Denis S. Lukyantsev<sup>1</sup>✉, Alexander V. Lubenchenko<sup>2</sup>, Dmitriy A. Ivanov<sup>3</sup>,  
Olga I. Lubenchenko<sup>4</sup>, Alexandr S. Fedotov<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation

<sup>1</sup> stavden1996@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4350-8034>

<sup>2</sup> LubenchenkoAV@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5998-5495>

<sup>3</sup> iv\_prof@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3760-0598>

<sup>4</sup> IvanovaOI@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6317-2841>

<sup>5</sup> courage\_man@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7641-3173>

### Abstract

Quantitative analysis of thin films surface is performed by means of X-ray electron spectroscopy (XPS) according to a calculation model assuming surface layers of the target to be homogeneous and parallel. However, almost every surface of an ultra-thin film is rough. A study of such surface using the plane-parallel layer model will lead to incorrect results. This work proposes to use the model of inhomogeneous stochastic nano-structured surface layer for ultra-thin film profiling. Surface stochastic nano-structured inhomogeneities are described by the normal Gauss distribution function. To determine these inhomogeneities, three parameters are specified: dispersion (spread of thicknesses by the layer), mean and maximal thickness of the surface layer. For the first time, the type of X-ray photoelectron spectrum of an inhomogeneous stochastic nano-structured surface is found that is determined by functions of photoelectron production and transmission through that surface layer. The designed model is based on the following assumptions: photoelectrons are produced in substance and travel straight-forward (Straight Line Approximation) along the surface, photoelectron flux density decreases in the layer according to the Bouguer–Lambert law, photoelectrons of different energies lose energy differently, photoelectron energy losses in bulk and on surface differ. Modeling of X-ray photoelectron spectra of an oxidized metal film is performed using different models: homogeneous plane-parallel layers, an island nano-structured surface layer and an inhomogeneous stochastic nano-structured surface layer. Ranges of applicability of plane-parallel layer models and simple periodical nano-structured island surface layer for inhomogeneous stochastic nano-structured surface profiling are determined. The model of homogeneous plane-parallel layers shows satisfactory profiling results by some values of parameters of an inhomogeneous stochastic surface layer. It is shown that the model of a simple periodically nano-structured island layer leads to inadequate results by profiling of an inhomogeneous stochastic surface. The investigation shows that for more accurate profiling of an inhomogeneous ultra-thin film, it is necessary to consider inhomogeneity of a real surface, otherwise the calculated results would not match the true profile.

### Keywords

phase profiling, horizontal inhomogeneities, surface roughness, nano-sized films, XPS

**For citation:** Lukyantsev D.S., Lubenchenko A.V., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I., Fedotov A.S. Influence of nano-sized horizontal inhomogeneities on surface profiling by means of XPS. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1104–1111 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1104-1111

### Введение

Поверхность ультратонкой пленки можно исследовать неразрушающим методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). При послойном фазовом анализе таких пленок толщины слоев обычно определяют по однослойной [1] или многослойной [2] моделям, основанным на допущении, что все слои образца являются однородными и плоскопараллельными. Послойный анализ горизонтально ровных ультратонких пленок, проведенный по многослойной модели, дает хорошие результаты [3–5]. Если поверхность представлена в виде одинаковых островковых наноструктур, то для анализа можно применить расчетную модель [6]. В работах [7–10] получены модельные рентгеновские фотоэлектронные спектры для различных двумерных неровностей на поверхности, в том числе для плотно укомплектованных одинаковых сфер. Модель одинаковых сфер показала хорошие результаты при послойном фазовом анализе наноразмерных порошкообразных химических катализаторов [11].

В работе [12] проведен послойный фазовый анализ рифленых поверхностей окисленного кремния и алюминия с помощью модели, в которой шероховатость поверхности смоделирована набором малых много-

гранников. В модель помещена гистограмма угла наклона многогранников, извлеченная из карты высот поверхности, полученной с помощью атомно-силовой микроскопии, и вычислены интенсивности для каждого отдельного элемента поверхности. Данная модель при подавляющем большинстве граней с более высоким углом наклона показала более точные результаты по сравнению с моделью плоскопараллельных слоев. Похожий подход использован в работе [13], но по более упрощенному алгоритму, который привел к большей неточности результатов.

В [14] показано, что реальная поверхность ультратонкой пленки неровная и может иметь неоднородности различных размеров и формы. В [15] исследованы методом РФЭС поверхности различной степени неоднородности и полученные результаты показали, что вид поверхности образца влияет на интенсивность и форму рентгеновского фотоэлектронного сигнала. Таким образом, можно сделать вывод, что применение модели однородных плоскопараллельных слоев для анализа неоднородной поверхности ультратонкой пленки приводит к неадекватным результатам.

В настоящей работе для анализа ультратонкой пленки предложено использовать модель неоднородного стохастического наноструктурного поверхностного

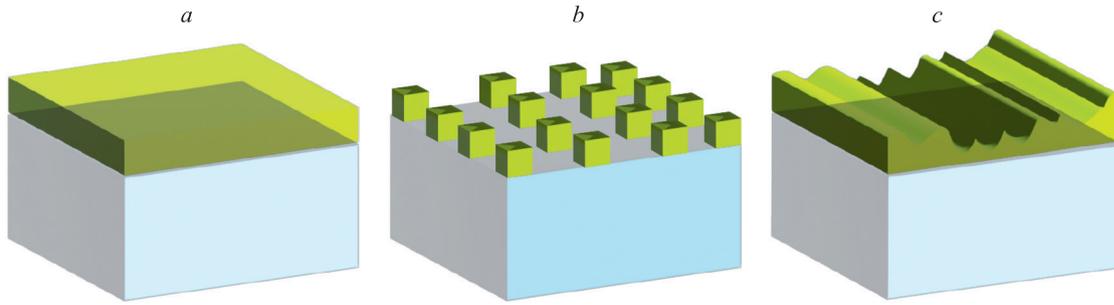


Рис. 1. Модели поверхностных слоев: однородного плоскопараллельного (модель 1) (a); островкового наноструктурированного (модель 2) (b); стохастического наноструктурированного (модель 3) (c)

Fig. 1. Surface layer models: homogeneous plane-parallel (model 1) (a); islet nano-structured (model 2) (b); stochastic nano-structured (c)

слоя, которая, предположительно, лучше подходит для описания случайной шероховатости поверхности. В работе рассмотрен нормальный вылет фотоэлектронов из поверхности образца. Для определения вида рентгеновского фотоэлектронного спектра от стохастического поверхностного слоя решена задача прохождения фотоэлектронов сквозь этот слой.

Рассмотрим три модели поверхностных слоев (рис. 1), и по результатам послойного фазового анализа ультратонкой пленки получим толщины слоев для одной и той же поверхности.

### Теоретическое описание фотоэлектронной эмиссии

#### Основные предположения и допущения решения.

Предположим, что при определении интенсивности потока фотоэлектронов, проходящих сквозь поверхностный слой вещества, фотоэлектроны могут рождаться в любой точке поверхностного слоя и подложки. После рождения фотоэлектроны в веществе движутся прямо-вперед (приближение Straight Line Approximation) по нормали к поверхности. При движении плотность потока фотоэлектронов ослабевает по экспоненциальному закону Бугера–Ламберта. Причем фотоэлектроны, рожденные с разной кинетической энергией, теряют энергию по-разному. Это учитывается модельным дифференциальным сечением неупругого рассеяния [2]. При движении к поверхности фотоэлектроны проходят границу раздела двух сред (например, подложка – поверхностный слой), на которой наблюдается ослабление потока фотоэлектронов. Для учета данной особенности введем разделение плазмонных потерь энергии на объемные и поверхностные [2].

**Функция фотоэлектронной эмиссии.** Интенсивность потока фотоэлектронов, рожденных в подложке-полубесконечном слое, определим функцией фотоэлектронной эмиссии [16]:

$$Q_{inf} = n_0 \sigma_{ion} \lambda_{in} (\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1},$$

где  $n_0$  — атомная концентрация частиц в веществе;  $\sigma_{ion}$  — дифференциальное сечение ионизации;  $\lambda_{in}$  — длина свободного пробега между неупругими актами соударения;  $\mathbf{E}$  — единичная матрица;  $\mathbf{A} = Toeplitz(\mathbf{X}_{in})$ ,  $\mathbf{X}_{in}$  — дифференциальное сечение неупругого рассеяния [16].

Для модели 1 (рис. 2, a) фотоэлектроны могут рождаться в подложке, проходить сквозь однородный плоскопараллельный слой ( $Q_{12}$ ) и рождаться в поверхностном слое ( $Q_2$ ). В таком случае получим суммарную интенсивность потока фотоэлектронов:

$$Q_{\Sigma} = Q_{12} + Q_2, \tag{1}$$

$$Q_{12} = Q_{inf} \times T_{in}(d) \text{ и } Q_2 = Q_{inf} \times (\mathbf{E} - T_{in}(d)),$$

где  $T_{in}(d)$  — функция пропускания фотоэлектронов сквозь однородный плоскопараллельный слой вещества толщиной  $d$  [17].

Если поверхность представлена в виде островковых наноструктур (модель 2) (рис. 2, b), то функция фотоэлектронной эмиссии будет определена фотоэлектронами, рожденными в подложке и вылетевшими сквозь островок поверхностного слоя ( $Q_{12}$ ) или минуя этот слой ( $Q_{inf}$ ), рожденными в островке поверхностного слоя ( $Q_2$ ). Интенсивность потока фотоэлектронов для островковой модели имеет вид:

$$Q_{\Sigma} = (1 - \alpha) \times Q_{inf} + \alpha \times (Q_{12} + Q_2), \tag{2}$$

где  $\alpha = \frac{S_0}{S_1}$  — степень заполнения поверхностного слоя;  $S_0$  — суммарная площадь островков;  $S_1$  — площадь всей поверхности.

Функцию пропускания для моделей 1 и 2 определим выражением [16]:

$$T_{in}(d) = \int_0^d e^{-(\mathbf{E} - \mathbf{X}_{in}) \frac{z}{\lambda_{in}}} dz = \lambda_{in} (\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} e^{-\frac{d}{\lambda_{in}}} e^{\mathbf{A} \frac{d}{\lambda_{in}}}.$$

В случае с моделью со стохастическим наноструктурным поверхностным слоем (модель 3) (рис. 2, c) интенсивность потока фотоэлектронов определяется выражением:

$$Q_{\Sigma} = Q_{12} + Q_2,$$

$$Q_{12} = Q_{inf} \times T_{in}(d_{max}, \sigma, d_{cp}) \text{ и } Q_2 = Q_{inf} \times (\mathbf{E} - T_{in}(d_{max}, \sigma, d_{cp})), \tag{3}$$

где  $T_{in}(d_{max}, \sigma, d_{cp})$  — функция пропускания фотоэлектронов сквозь стохастический слой вещества, которая

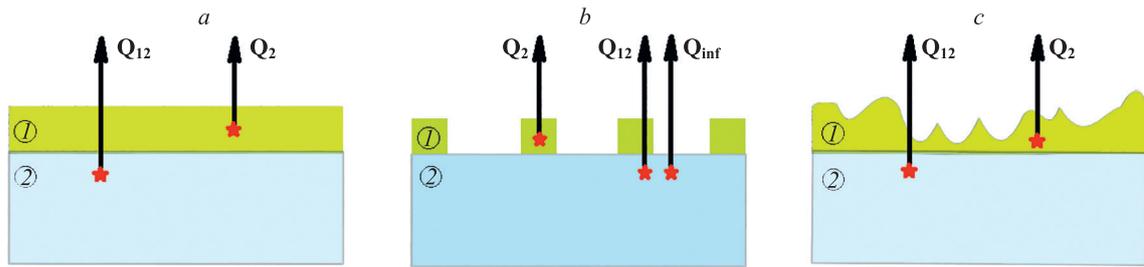


Рис. 2. Схематичное прохождение электронов через поверхностные слои для модели 1 (а), модели 2 (б) и модели 3 (с).  
1 — подложка; 2 — поверхностный слой

Fig. 2. Schematic passage of electrons through surface layers for model 1 (a), model 2 (b) and model 3 (c).  
1 — substrate; 2 — surface layer

определяется средней ( $d_{cp}$ ) и максимальной ( $d_{max}$ ) толщинами слоя, а также дисперсией толщины слоя ( $\sigma$ ).

### Функция пропускания фотоэлектронов сквозь стохастический слой

Для стохастической наноструктурированной модели 3 (рис. 2, с) случайный характер неоднородностей поверхностного слоя задается функцией плотности вероятности нормального распределения Гаусса:

$$P(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(d-d_{cp})^2}{(2\sigma)^2}},$$

которая определяется средней толщиной слоя ( $d_{cp}$ ), дисперсией — разбросом высот по поверхности ( $\sigma$ ) и случайной величиной ( $d$ ). Данную функцию необходимо ограничить в пределах толщины поверхностного слоя (рис. 3). Для этого введем условие нормировки:

$$\int_0^{d_{max}} P(z) dz = 1,$$

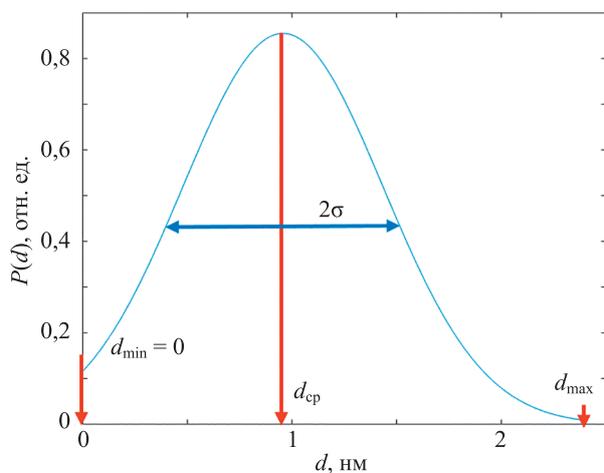


Рис. 3. Вид функции плотности вероятности нормального распределения Гаусса, нормированной в пределах от 0 до  $d_{max}$

Fig. 3. Normal distribution normalized within the limits from 0 to  $d_{max}$

где  $d_{max}$  ограничивается максимальной толщиной слоя;  $z$  — случайная величина.

Для модели 3 (рис. 2, с) функцию пропускания фотоэлектронов сквозь стохастический поверхностный слой определим выражением:

$$T_{in}(d_{max}, \sigma, d_{cp}) = \int_0^{d_{max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(z-d_{cp})^2}{(2\sigma)^2}} \times e^{-(E-X_{in})\frac{z}{\lambda_{in}}} dz. \quad (4)$$

Для получения аналитического решения выражения (4) удобно ввести безразмерную толщину слоя  $\tau = \frac{d}{\lambda_{in}}$ . Получим аналитическое выражение функции пропускания фотоэлектронов сквозь стохастический поверхностный слой:

$$T_{in}(\tau_{max}, \sigma, \tau_{cp}) = \frac{G_1}{\sqrt{G_2}} e^{mG_2} \times \left[ \sum_{k=1}^{50} L(\sqrt{G_2}(\mathbf{D} + \tau_{max}\mathbf{E}))^{2k-1} - \sum_{k=1}^{50} L(\sqrt{G_2}\mathbf{D})^{2k-1} \right], \quad (5)$$

$$G_1 = \frac{\lambda_{in}}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad G_2 = \left(\frac{\sigma}{\lambda_{in}}\right)^2, \quad \mathbf{D} = \frac{\mathbf{E} - \mathbf{A}}{2G_2} - \tau_{cp}\mathbf{E},$$

$$\mathbf{m} = \mathbf{D}^2 - (\tau_{cp}\mathbf{E})^2, \quad L = \frac{(-1)^{k+1}}{(2k-1)(k-1)!}$$

Выражение (5) содержит ряды, сумму которых достаточно ограничить 50 членами, в таком случае ряд сходится и погрешность расчета составляет менее 0,01 %

**Моделирование рентгеновских фотоэлектронных спектров.** Моделирование рентгеновских фотоэлектронных спектров выполнено для трех моделей мишеней (рис. 2) по выражениям (1)–(3). В качестве материала подложки выбран ниобий, поверхностный слой для всех моделей состоит из пентаоксида ниобия  $Nb_2O_5$ . Первоначально для определенных параметров функции нормального распределения Гаусса построен спектр модели 3 со стохастическим наноструктурированным слоем (рис. 2, с), который принят за действительный. В результате процедуры фитинга по алгоритму

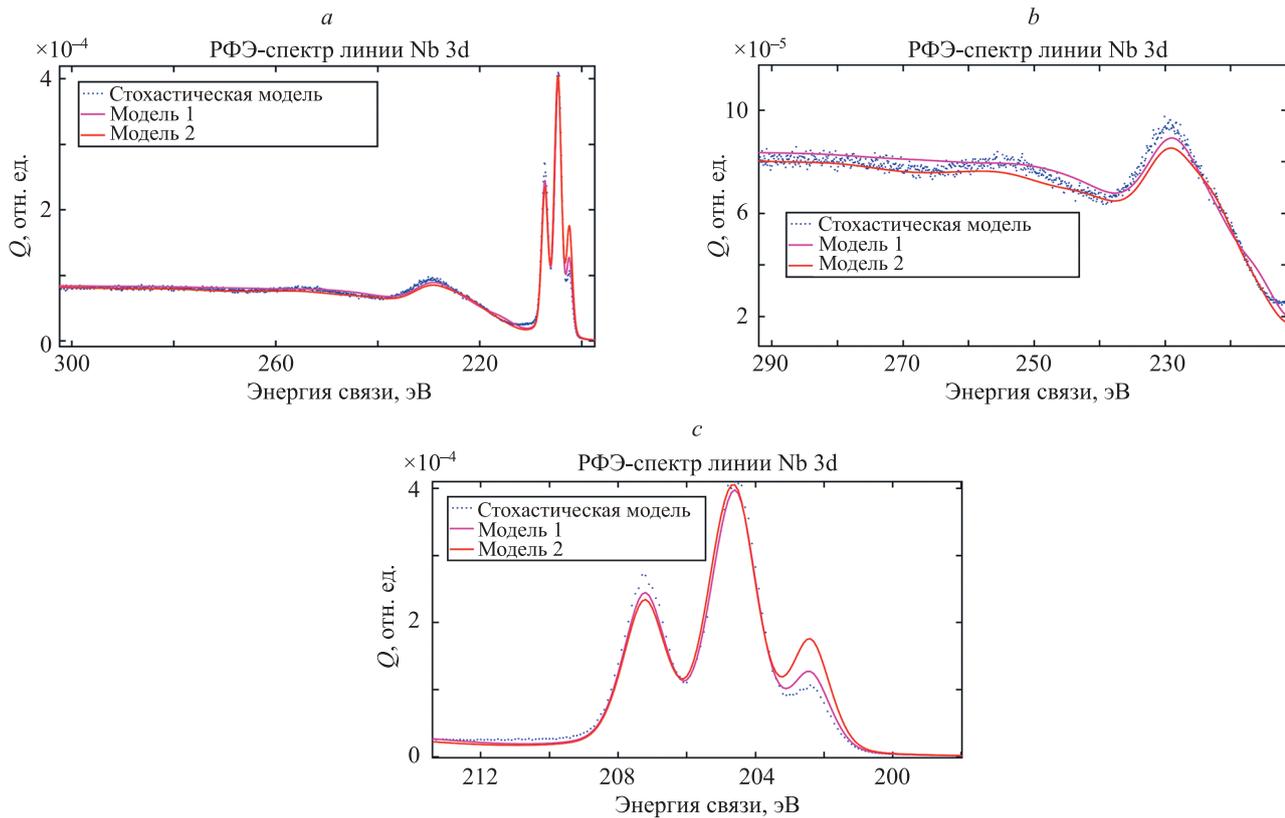


Рис. 4. Рентгеновский фотоэлектронный спектр линии Nb 3d: спектры моделей (а); приближенные части спектров для диапазонов от 214 до 290 эВ (b) и от 198 до 213 эВ (с)

Fig. 4. X-ray photoelectron spectrum of line Nb 3d: spectra of models (a); enlarged parts of the spectra for the ranges from 214 up to 290 eV (b); and from 198 up to 213 eV (c)

Левенгерда–Маккаварда действительный спектр описан по моделям 1 (рис. 2, а) и 2 (рис. 2, b). В качестве примера на рис. 4 представлены результаты моделирования рентгеновских фотоэлектронных (РФЭ) спектров линии Nb 3d для параметров стохастического слоя  $d_{\max} = 9$  нм,  $\sigma = 2$ ,  $d_{\text{ср}} = 4$  нм. Спектры, полученные по моделям 1 и 2, недостаточно описывают спектр неоднородной стохастической поверхности. Для подробного исследования применимости моделей 1 и 2 выполнена серия моделирований для различных параметров стохастического слоя ( $d_{\max}$ ,  $\sigma$ ,  $d_{\text{ср}}$ ).

### Результаты и обсуждение

Зададим неоднородную поверхность нормальным распределением Гаусса для разных дисперсий толщин (рис. 5, b), максимальной (рис. 5, d) и средней толщины (рис. 5, f) поверхностного слоя. Сравнение результатов послойного анализа для различных функций стохастической поверхности приведено на рис. 5, а, с, е. Для точности описания рентгеновского фотоэлектронного спектра введем среднее квадратичное отклонение. Значение равно 1 свидетельствует о полном описании действительного спектра выбранной моделью. Выполним сравнение толщины слоя, полученной по моделям 1 и 2 ( $d_{\text{моделей}}$ ), со средней толщиной слоя

стохастической модели ( $d_{\text{стохастической}}$ ). Если отношение толщин слоев равно 1, то можно говорить о правильном описании неоднородной поверхности выбранной моделью.

Результаты анализа для различной дисперсии толщины слоя (рис. 5, а) показывают, что при увеличении разброса высот модель 2 неудовлетворительно описывает спектр стохастической модели, отклонения толщин составляет до 30 % при среднем квадратичном отклонении около 32 %. В таком случае описание поверхности моделью 1 приводит к завышенному значению толщины на 30 % при точности 95 %.

Послойный анализ поверхности для различной максимальной толщины слоя (рис. 5, с) показал, что при утолщении слоя спектр модели 1 практически полностью повторяет действительный, при этом рассчитанная толщина оказывается примерно на 40 % выше фактической. Описание стохастической поверхности моделью 2 снова дает некорректные результаты, можно предположить, что это связано с сильно неоднородной поверхностью. Модель 1 хорошо описывает поверхность при максимальной толщине слоя 5 нм, а при больших толщинах дает сильно завышенные результаты.

На рис. 5, е приведены результаты послойного анализа для различной средней толщины слоя. При сред-

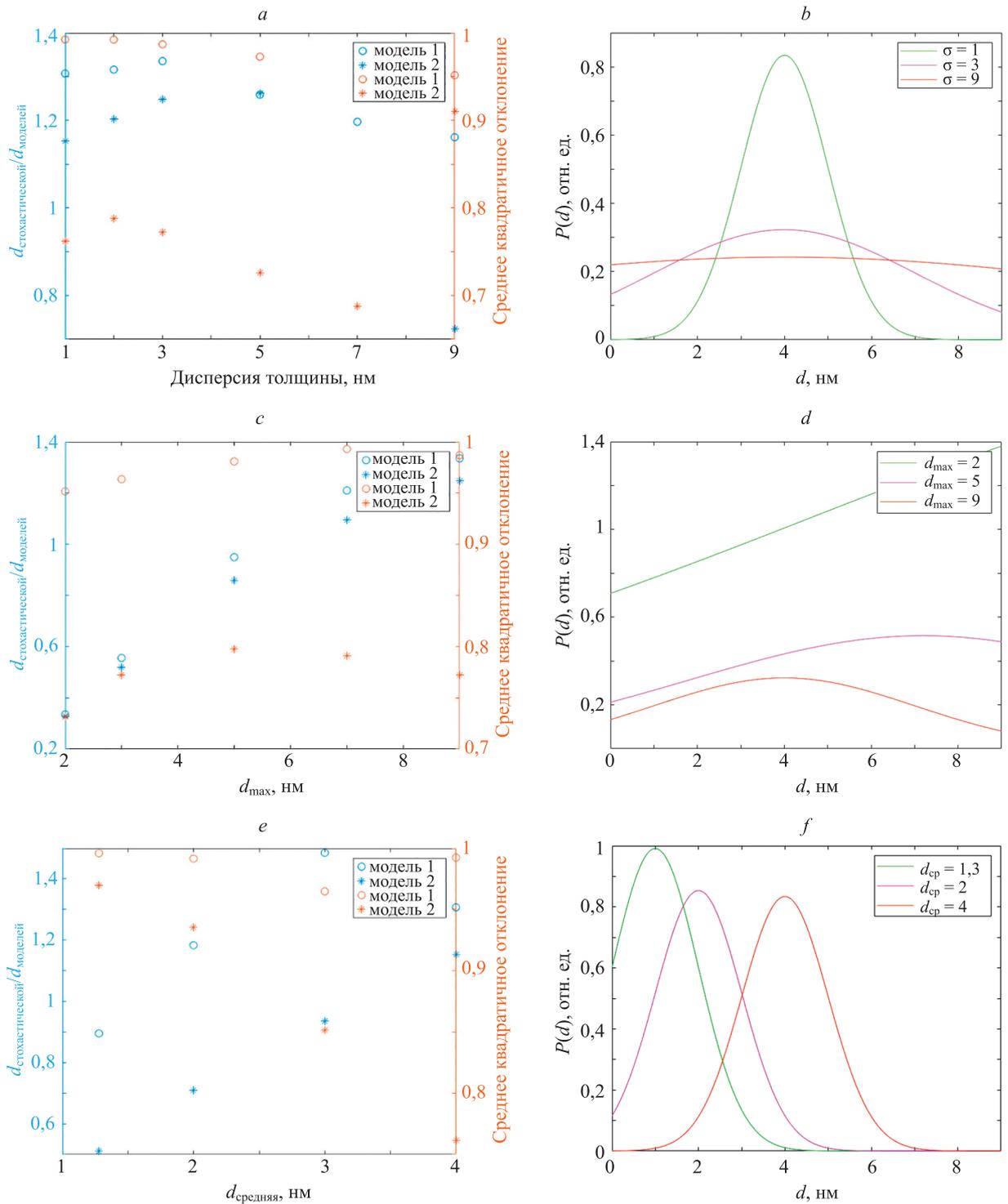


Рис. 5. Сравнение результатов послойного анализа (a, c, e) для различных функций стохастической поверхности (b, d, f)  
 Fig. 5. Comparison of layer profiling results (a, c, e) for various stochastic surfaces (b, d, f)

ней толщине 1,3 нм модель 1 точно описывает вид действительного спектра, но значение рассчитанной толщины занижено на 10 % по сравнению со средней толщиной модели стохастического слоя. При появлении дырок (при увеличении средней толщины) на сильно неоднородной поверхности модель 2 не пригодна для анализа мишени, а модель 1 дает завышенные результаты на 30 %.

### Заключение

В работе предложена модель стохастической наноразмерной поверхности ультратонкой пленки. Результаты послойного анализа поверхности разными моделями показали, что описание стохастической наноразмерной поверхности моделями плоскопараллельных слоев и островковых наноструктур является затрудни-

тельным. Но тем не менее, если поверхность стремится к однородной, т. е. когда разброс высот небольшой, то модель плоскопараллельных слоев показывает хорошие результаты послойного анализа. Модель островковых наноструктур неудачно описывает различные неоднородности на поверхности. Таким образом, для более

точного послойного анализа ультратонкой пленки необходимо учитывать неоднородность реальной поверхности, в противном случае полученные результаты будут не соответствовать фактическим.

### Литература

1. Tougaard S. Improved XPS analysis by visual inspection of the survey spectrum // *Surface and Interface Analysis*. 2018. V. 50. N 6. P. 657–666. <https://doi.org/10.1002/sia.6456>
2. Lubenchenko A.V., Batrakov A.A., Pavolotsky A.B., Lubenchenko O.I., Ivanov D.A. XPS study of multilayer multicomponent films // *Applied Surface Science*. 2018. V. 427. P. 711–721. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.256>
3. Lukiantsev D.S., Lubenchenko A.V., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I., Pavolotsky A.B., Iachuk V.A., Pavlov O.N. The Formation of nanosuboxide layers in the oxide of niobium in low-power ion beam of argon // *Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/REEPE51337.2021.9388002>
4. Lubenchenko A.V., Batrakov A.A., Shurkaeva I.V., Pavolotsky A.B., Krause S., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I. XPS study of niobium and niobium-nitride nanofilms // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018. V. 12. N 4. P. 692–700. <https://doi.org/10.1134/S1027451018040134>
5. Лубенченко А.В., Иванов Д.А., Лубенченко О.И., Паволоцкий А.Б., Лукьянцев Д.С., Ячук В.А., Павлов О.Н. Формирование неоднородных оксидных и субоксидных слоев на ультратонкой металлической пленке при многократном окислении и ионном распылении // *Журнал технической физики*. 2022. Т. 92. № 8. С. 1172–1178. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.08.52779.68-22>
6. Martín-Concepción A.I., Yubero F., Espiñós J.P., Tougaard S. Surface roughness and island formation effects in ARXPS quantification // *Surface and Interface Analysis*. 2004. V. 36. N 8. P. 788–792. <https://doi.org/10.1002/sia.1765>
7. Varsányi G., Réé K., Mink G., Mohai M. Consideration of two dimensional surface roughnesses in quantitative XPS analysis // *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 1987. V. 31. N 1-2. P. 3–17.
8. Fadley C.S., Baird R.J., Siekhaus W., Novakov T., Bergström S.Å.L. Surface analysis and angular distributions in X-ray photoelectron spectroscopy // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 1974. V. 4. N 2. P. 93–137. [https://doi.org/10.1016/0368-2048\(74\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0368-2048(74)90001-2)
9. Zemek J. Electron spectroscopy of corrugated solid surfaces // *Analytical Sciences*. 2010. V. 26. N 2. P. 177–186. <https://doi.org/10.2116/analsci.26.177>
10. Kataev E., Wechsler D., Williams F.J., Köbl J., Tsud N., Franchi S., Steinrück H.-P., Lytken O. Probing the roughness of porphyrin thin films with X-ray photoelectron spectroscopy // *ChemPhysChem*. 2020. V. 21. N 20. P. 2293–2300. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000568>
11. Mohai M. XPS MultiQuant: multimodel XPS quantification software // *Surface and Interface Analysis*. 2004. V. 36. N 8. P. 828–832. <https://doi.org/10.1002/sia.1775>
12. Mohai M. Calculation of layer thickness on rough surfaces by polyhedral model // *Surface and Interface Analysis*. 2008. V. 40. N 3–4. P. 710–713. <https://doi.org/10.1002/sia.2751>
13. Olejnik K., Zemek J., Werner W.S.M. Angular-resolved photoelectron spectroscopy of corrugated surfaces // *Surface Science*. 2005. V. 595. N 1–3. P. 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2005.08.014>
14. Leprince-Wang Y., Yu-Zhang K. Study of the growth morphology of TiO<sub>2</sub> thin films by AFM and TEM // *Surface and Coatings Technology*. 2001. V. 140. N 2. P. 155–160. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01029-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01029-5)
15. Wu O.K.T., Peterson G.G., LaRocca W.J., Butler E.M. ESCA signal intensity dependence on surface area (roughness) // *Applications of Surface Science*. 1982. V. 11-12. P. 118–130. [https://doi.org/10.1016/0378-5963\(82\)90058-7](https://doi.org/10.1016/0378-5963(82)90058-7)
16. Lubenchenko A.V., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I., Ivanova I.V. Formation of inelastic scattered background photoelectrons, X-ray

### References

1. Tougaard S. Improved XPS analysis by visual inspection of the survey spectrum. *Surface and Interface Analysis*, 2018, vol. 50, no. 6, pp. 657–666. <https://doi.org/10.1002/sia.6456>
2. Lubenchenko A.V., Batrakov A.A., Pavolotsky A.B., Lubenchenko O.I., Ivanov D.A. XPS study of multilayer multicomponent films. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, pp. 711–721. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.256>
3. Lukiantsev D.S., Lubenchenko A.V., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I., Pavolotsky A.B., Iachuk V.A., Pavlov O.N. The Formation of nanosuboxide layers in the oxide of niobium in low-power ion beam of argon. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, 2021, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/REEPE51337.2021.9388002>
4. Lubenchenko A.V., Batrakov A.A., Shurkaeva I.V., Pavolotsky A.B., Krause S., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I. XPS study of niobium and niobium-nitride nanofilms. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2018, vol. 12, no. 4, pp. 692–700. <https://doi.org/10.1134/S1027451018040134>
5. Lubenchenko A.V., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I., Pavolotsky A.B., Lukiantsev D.S., Iachuk V.A., Pavlov O.N. Formation of inhomogeneous oxide and suboxide layers on an ultra-thin metal film by multiple oxidation and ion sputtering. *Zhurnal tehnichekoj fiziki*, 2022, vol. 92, no. 8, pp. 1172–1178. (in Russian). <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.08.52779.68-22>
6. Martín-Concepción A.I., Yubero F., Espiñós J.P., Tougaard S. Surface roughness and island formation effects in ARXPS quantification. *Surface and Interface Analysis*, 2004, vol. 36, no. 8, pp. 788–792. <https://doi.org/10.1002/sia.1765>
7. Varsányi G., Réé K., Mink G., Mohai M. Consideration of two dimensional surface roughnesses in quantitative XPS analysis. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 1987, vol. 31, no. 1-2, pp. 3–17.
8. Fadley C.S., Baird R.J., Siekhaus W., Novakov T., Bergström S.Å.L. Surface analysis and angular distributions in X-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 1974, vol. 4, no. 2, pp. 93–137. [https://doi.org/10.1016/0368-2048\(74\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0368-2048(74)90001-2)
9. Zemek J. Electron spectroscopy of corrugated solid surfaces. *Analytical Sciences*, 2010, vol. 26, no. 2, pp. 177–186. <https://doi.org/10.2116/analsci.26.177>
10. Kataev E., Wechsler D., Williams F.J., Köbl J., Tsud N., Franchi S., Steinrück H.-P., Lytken O. probing the roughness of porphyrin thin films with X-ray photoelectron spectroscopy. *ChemPhysChem*, 2020, vol. 21, no. 20, pp. 2293–2300. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000568>
11. Mohai M. XPS MultiQuant: multimodel XPS quantification software. *Surface and Interface Analysis*, 2004, vol. 36, no. 8, pp. 828–832. <https://doi.org/10.1002/sia.1775>
12. Mohai M. Calculation of layer thickness on rough surfaces by polyhedral model. *Surface and Interface Analysis*, 2008, vol. 40, no. 3–4, pp. 710–713. <https://doi.org/10.1002/sia.2751>
13. Olejnik K., Zemek J., Werner W.S.M. Angular-resolved photoelectron spectroscopy of corrugated surfaces. *Surface Science*, 2005, vol. 595, no. 1-3, pp. 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2005.08.014>
14. Leprince-Wang Y., Yu-Zhang K. Study of the growth morphology of TiO<sub>2</sub> thin films by AFM and TEM. *Surface and Coatings Technology*, 2001, vol. 140, no. 2, pp. 155–160. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01029-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01029-5)
15. Wu O.K.T., Peterson G.G., LaRocca W.J., Butler E.M. ESCA signal intensity dependence on surface area (roughness). *Applications of Surface Science*, 1982, vol. 11-12, pp. 118–130. [https://doi.org/10.1016/0378-5963\(82\)90058-7](https://doi.org/10.1016/0378-5963(82)90058-7)
16. Lubenchenko A.V., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I., Ivanova I.V. Formation of inelastic scattered background photoelectrons, X-ray

photoelectron spectroscopy from multilayer inhomogeneous surface // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1370. N 1. P. 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1370/1/012049>

17. Lubenchenko A.V., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I., Yachuk V.A., Pavlov O.N., Lashkov I.A., Lukyantsev D.S. Non-destructive chemical and phase layer profiling of multicomponent multilayer thin ultrathin films // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1370. N 1. P. 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1370/1/012048>

photoelectron spectroscopy from multilayer inhomogeneous surface. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1370, no. 1, pp. 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1370/1/012049>

17. Lubenchenko A.V., Ivanov D.A., Lubenchenko O.I., Yachuk V.A., Pavlov O.N., Lashkov I.A., Lukyantsev D.S. Non-destructive chemical and phase layer profiling of multicomponent multilayer thin ultrathin films. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1370, no. 1, pp. 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1370/1/012048>

#### Авторы

**Лукьянцев Денис Сергеевич** — аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0003-4350-8034) 57213812548, <https://orcid.org/0000-0003-4350-8034>, [stavden1996@mail.ru](mailto:stavden1996@mail.ru)

**Лубенченко Александр Владимирович** — доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0002-5998-5495) 6506749223, <https://orcid.org/0000-0002-5998-5495>, [LubenchenkoAV@mpei.ru](mailto:LubenchenkoAV@mpei.ru)

**Иванов Дмитрий Александрович** — кандидат технических наук, доцент, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0003-3760-0598) 57205865811, <https://orcid.org/0000-0003-3760-0598>, [iv\\_prof@mail.ru](mailto:iv_prof@mail.ru)

**Лубенченко Ольга Игоревна** — старший преподаватель, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0002-6317-2841) 56021143100, <https://orcid.org/0000-0002-6317-2841>, [IvanovaOI@mpei.ru](mailto:IvanovaOI@mpei.ru)

**Федотов Александр Сергеевич** — студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0002-7641-3173) 56021143100, <https://orcid.org/0000-0002-7641-3173>, [courage\\_man@mail.ru](mailto:courage_man@mail.ru)

#### Authors

**Denis S. Lukyantsev** — PhD Student, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0003-4350-8034) 57213812548, <https://orcid.org/0000-0003-4350-8034>, [stavden1996@mail.ru](mailto:stavden1996@mail.ru)

**Alexander V. Lubenchenko** — D. Sc., Professor, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0002-5998-5495) 6506749223, <https://orcid.org/0000-0002-5998-5495>, [LubenchenkoAV@mpei.ru](mailto:LubenchenkoAV@mpei.ru)

**Dmitriy A. Ivanov** — PhD, Associate Professor, Professor, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0003-3760-0598) 57205865811, <https://orcid.org/0000-0003-3760-0598>, [iv\\_prof@mail.ru](mailto:iv_prof@mail.ru)

**Olga I. Lubenchenko** — Senior Lecturer, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0002-6317-2841) 56021143100, <https://orcid.org/0000-0002-6317-2841>, [IvanovaOI@mpei.ru](mailto:IvanovaOI@mpei.ru)

**Alexandr S. Fedotov** — Student, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0002-7641-3173) 56021143100, <https://orcid.org/0000-0002-7641-3173>, [courage\\_man@mail.ru](mailto:courage_man@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 18.08.2022*  
*Одобрена после рецензирования 10.10.2022*  
*Принята к печати 20.11.2022*

*Received 18.08.2022*  
*Approved after reviewing 10.10.2022*  
*Accepted 20.11.2022*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»