

information on field service scheduling. *Decision Support Systems*, 53(2), 282–293. **11.** Papadopoulos, H. T. (1999). A field service support system using a queueing network model and the priority MVA algorithm. *Omega*, 24, 195–203. **12.** Oracle Field Service Routing Cloud Service. Oracle.com. Retrieved April 30, 2015, from <https://www.oracle.com/applications/customer-experience/service/field-service-management/routing.html> [in English]. **13.** Chistyakova, A., Neguritsa, D., Shamsha, B. (2010). Information technology of definition of components irregular time series by means of singular decomposition. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 4(4(46)), 23-27. doi:http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2959. **14.** Chistyakova, A., Shamsha, B. (2011). Identification of the structure of non-stationary time series using the method of singular spectrum analysis. *Electronic and computer systems*, 4(52), 105-111. **15.** Chistyakova, A., Shamsha, B. (2013). Evaluation of the depth of immersion in the method of SSA in modeling nonlinear time series. *Bulletin of Science and Education Development*, 4, 59-68. **16.** Chistyakova, A., Shamsha, B. (2014). Information technology of forecasting non-stationary time-series data using singular spectrum analysis. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 2(4(68)), 24-30. doi:http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22158. **17.** Chistyakova, A., Shamsha, B. (2014). Information technology time series prediction using SSA method with risk consideration. *International Congress «Energy and Information Technologies». «ES@IT – 2013»*, 72.

Надійшла (received) 27.04.2015

УДК 621.365.2:51-74

А. А. ШРАМ, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорозьє

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА

Целью работы являлось построение и анализ математической модели ионно-плазменной обработки поверхности стекла при атмосферном давлении. Рассмотрено построение математической модели ионно-плазменной обработки поверхности стекла при атмосферном давлении на основании регрессионного анализа. Полученная модель позволяет определить в каком направлении, и в какой степени необходимо варьировать факторами для достижения оптимального качества получаемых покрытий.

Ключевые слова: математическая модель, регрессионный анализ, многофакторный эксперимент, низкотемпературная плазма, стекло.

Введение. Введение модифицирующих элементов в поверхностный слой стекла позволяет повысить его эксплуатационные свойства, механическую прочность, обеспечить регулирование оптических свойств, а также получить возможность окрашивания стекла в различные цвета.

Качество модифицированного поверхностного слоя стекла зависит от таких параметров, как: вид исходного материала внедрения, состав обрабатываемого стекла, расход и вид плазмообразующего газа, геометрических и энергетических параметров плазмотрона [1 – 4].

Возможность предварительного определения оптимальных диапазонов изменения технологических параметров процесса для обеспечения внедрения элементарных частиц модифицирующего материала (атомов и ионов) и равномерного их распределения в диффузионном слое приводит к снижению удельного расхода материала внедрения при формировании высококачественных проникающих покрытий на поверхности стекла с одновременным повышением производительности процесса обработки.

Малая изученность процесса ионно-плазменной модификации поверхности

© А. А. ШРАМ, 2015

стекла и стеклоизделий при атмосферном давлении, сложная зависимость процесса от многих взаимосвязанных параметров (величины тока электрической дуги, расхода плазмообразующего газа, геометрических параметров плазмотрона и т.д.) не позволяют получить аналитической зависимости, которая описывала бы процесс обработки. Поэтому для построения математической модели могут использоваться методы планирования многофакторного эксперимента [5 – 8].

Цель работы. Целью работы является построение и анализ математической модели ионно-плазменной обработки поверхности стекла при атмосферном давлении.

Методика экспериментов. Выбор и корректирование режимов электротехнологического процесса обработки является типичной оптимизационной задачей, целью которой является определение наилучших значений параметров обработки стеклоизделий при заданном критерии качества.

Технологическим параметром оптимизации была выбрана совокупность характеристик получаемого покрытия (коэффициент пропускания в диапазоне длин волн от 315 нм до 400 нм (ближний ультрафиолет UVA), коэффициент направленного пропускания света, шероховатость поверхности обработанного образца (среднее арифметическое отклонение профиля R_a , нм)).

При исследовании процесса ионно-плазменной модификации поверхности стекла в планирование эксперимента были включены пять факторов. В результате проведенных экспериментальных исследований и конструктивных особенностей разработанных плазмотронов за средние (нулевые) значения факторов приняты: расход раствора 160 мг/сек, величина тока 105 А, время обработки 10 с, расход плазмообразующего газа 1.5 г/сек, дистанция обработки 90 мм. Уровни факторов и их интервалы варьирования представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Кодированное значение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		1	0	+1	
Расход раствора G_U , мг/сек	X_1	40	60	180	20
Величина тока I , А	X_2	100	105	110	5
Время обработки t , с	X_3	5	10	15	5
Расход плазмообразующего газа G , г/сек	X_4	1.0	1.5	2.0	0.5
Дистанция обработки h , мм	X_5	70	90	110	20

Математическая модель процесса обработки стекла и стеклоизделий может быть представлена в виде полинома:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{15} \cdot x_1 \cdot x_5, \quad (1)$$

где y – параметр оптимизации; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – факторы процесса; b_i, b_{ij} – коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии определяются решением уравнения в матричной форме:

$$\mathbf{X}' \times \mathbf{X} \times \mathbf{b} = \mathbf{X}' \times \mathbf{Y}, \quad (2)$$

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}' \times \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}' \times \mathbf{Y}, \quad (3)$$

где \mathbf{b} – вектор коэффициентов регрессии b_i, b_{ij} ; \mathbf{X} – матрица предикторных переменных (факторов процесса); \mathbf{Y} – вектор переменных отклика.

Для построения модели ионно-плазменной модификации стекла выбрано D -оптимальное планирование типа Na_5 (план Хартли). Во избежание систематических ошибок опыты рандомизированы.

Математическая модель процесса ионно-плазменной обработки поверхности стекла и стеклоизделий в кодированном виде представлена следующими зависимостями:

$$y_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 26.3444 - 1.6778 \cdot x_1 - 0.0778 \cdot x_2 - 2.2611 \cdot x_3 + 0.2222 \cdot x_4 + 1.7944 \cdot x_5 + 0.2000 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.1250 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.1125 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0.1000 \cdot x_1 \cdot x_5, \quad (4)$$

$$y_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 72.3096 + 3.8111 \cdot x_1 - 0.5000 \cdot x_2 - 1.5911 \cdot x_3 - 0.0556 \cdot x_4 + 5.1761 \cdot x_5 + 0.2650 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1.5000 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0.0975 \cdot x_1 \cdot x_4 + 2.1850 \cdot x_1 \cdot x_5, \quad (5)$$

$$y_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 63.6815 - 15.3944 \cdot x_1 - 0.3556 \cdot x_2 + 2.4778 \cdot x_3 - 1.3889 \cdot x_4 - 5.8333 \cdot x_5 - 0.4563 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.6437 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0.6938 \cdot x_1 \cdot x_4 - 1.3437 \cdot x_1 \cdot x_5, \quad (6)$$

где $y_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ – коэффициент пропускания UVA, %; $y_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ – коэффициент направленного пропускания света, %; $y_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ – среднее арифметическое отклонение профиля R_a , нм.

Переход от кодированных значений к натуральным осуществляется с помощью преобразования:

$$x_j = \frac{x_j^* - x_{j0}^*}{J_j}, \quad (7)$$

где x_j – кодированное значение фактора; x_j^* – натуральное значение фактора; x_{j0}^* – натуральное значение основного уровня; J_j – интервал варьирования; j – номер фактора.

Математическая модель модификации поверхности стеклоизделий с помощью низкотемпературной плазмы имеет вид:

$$y_1(G_U, I, t, G, h) = 62.4806 - 0.2420 \cdot G_U - 0.3356 \cdot I - 0.2522 \cdot t + 2.2444 \cdot G + 0.1297 \cdot h + 0.0020 \cdot G_U \cdot I - 0.0012 \cdot G_U \cdot t - 0.0012 \cdot G_U \cdot G - 2.5 \cdot 10^{-4} \cdot G_U \cdot h, \quad (8)$$

$$y_2(G_U, I, t, G, h) = 133.8971 - 0.4439 \cdot G_U - 0.5240 \cdot I + 2.0818 \cdot t - 1.6711 \cdot G - 0.6152 \cdot h + 0.0027 \cdot G_U \cdot I - 0.0150 \cdot G_U \cdot t + 0.0098 \cdot G_U \cdot G + 0.0055 \cdot G_U \cdot h, \quad (9)$$

$$y_3(G_U, I, t, G, h) = 121.6898 - 0.1568 \cdot G_U + 0.6589 \cdot I - 0.5344 \cdot t - 13.8778 \cdot G + 0.2458 \cdot h - 0.0046 \cdot G_U \cdot I + 0.0064 \cdot G_U \cdot t + 0.0694 \cdot G_U \cdot G - 0.0034 \cdot G_U \cdot h, \quad (10)$$

где $y_1(G_U, I, t, G, h)$ – коэффициент пропускания UVA, %; $y_2(G_U, I, t, G, h)$ – коэффициент направленного пропускания света, %; $y_3(G_U, I, t, G, h)$ – среднее арифметическое отклонение профиля R_a , нм.

Среднеквадратичная ошибка эксперимента S_O и коэффициентов регрессии S_{bi} определялась по формуле:

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_O^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n \cdot n_1 \cdot (m-1)}}, \quad (11)$$

где \bar{y}_i – среднее арифметическое значение параметра оптимизации y_i в повторных опытах; m – количество повторных опытов; n_1 – количество опытов с повторениями; n – общее количество опытов.

Доверительный интервал для факторов определялся следующим образом:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{bi}, \quad (12)$$

где t – критерий Стьюдента.

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{1.17}{27 \cdot 27 \cdot (3-1)}} = 0.028,$$

$$\Delta b_i = \pm 2.228 \cdot 0.028 = \pm 0.062.$$

Факторы, имеющие коэффициенты регрессии меньше доверительного интервала, незначительно влияют на параметр оптимизации и могут быть зафиксированы на нулевом уровне. Тогда математическая модель модификации поверхности стеклоизделий с помощью низкотемпературной плазмы принимает следующий вид:

$$y_1(G_U, I, t, G, h) = 56.1866 - 0.2420 \cdot G_U - 0.3356 \cdot I - 0.2522 \cdot t + 2.2444 \cdot G + 0.1297 \cdot h + 0.0020 \cdot G_U \cdot I, \quad (13)$$

$$y_2(G_U, I, t, G, h) = 112.2491 - 0.4439 \cdot G_U - 0.5240 \cdot I + 2.0818 \cdot t - 1.6711 \cdot G - 0.6152 \cdot h + 0.0027 \cdot G_U \cdot I + 0.0055 \cdot G_U \cdot h, \quad (14)$$

$$y_3(G_U, I, t, G, h) = 148.5858 - 0.1568 \cdot G_U + 0.6589 \cdot I - 0.5344 \cdot t - 13.8778 \cdot G + 0.2458 \cdot h - 0.0046 \cdot G_U \cdot I - 0.0034 \cdot G_U \cdot h, \quad (15)$$

где $y_1(G_U, I, t, G, h)$ – коэффициент пропускания UVA, %; $y_2(G_U, I, t, G, h)$ – коэффициент направленного пропускания света, %; $y_3(G_U, I, t, G, h)$ – среднее арифметическое отклонение профиля R_a , нм.

Адекватность математической модели – расчетное значение параметра оптимизации, f – число степеней свободы для дисперсии адекватности.

$$F_{calc} = \frac{S_{AD}^2}{S_O^2},$$

$$S_{AD}^2 = \frac{1.4797}{27} = 0.055,$$

$$F_{calc} = \frac{0.055}{0.022} = 2.54.$$

Полученная величина сравнивается с табличной величиной F-критерия ($F_{table}^{0.05}(1;27) = 4.21$) [9, 10]. Поскольку рассчитанное значение F-критерия не превышает табличного, с соответствующей доверительной вероятностью (5 %), модель можно считать адекватной.

Обсуждение результатов. Полученная модель позволяет определить в каком направлении, и в какой степени необходимо варьировать факторами для достижения оптимального качества получаемых покрытий.

Зависимости технологических характеристик ионно-плазменного покрытия от расход раствора, величины тока и дистанции обработки показаны на рис.1 – 3.

Из анализа данной математической модели ионно-плазменной обработки поверхности стекла и стеклоизделий следует, что при варьировании выбранными факторами максимальное влияние на качество получаемых покрытий оказывают расход водного раствора материала внедрения и дистанция обработки.

Так, при увеличении расхода раствора исходного материала от 140 мг/сек до 180 мг/сек коэффициент пропускания ультрафиолетового излучения UVA уменьшается на 10.3 %, коэффициент направленного пропускания света увеличивается на 13.9 %, среднее арифметическое отклонения профиля Ra (шероховатость обработанного образца) уменьшается на 48.7 %.

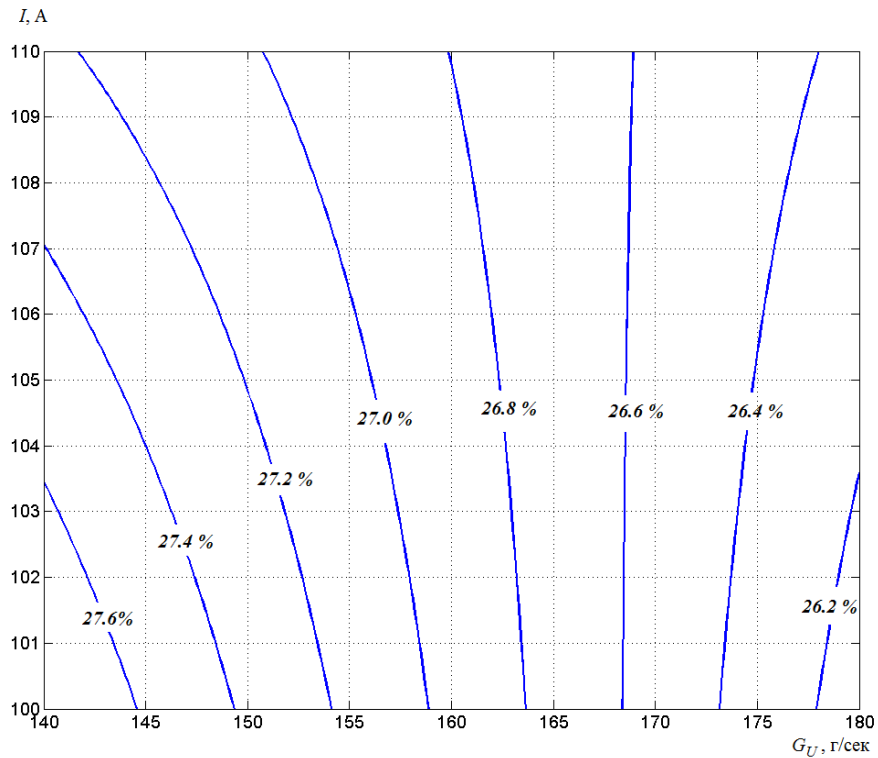


Рис. 1 – Зависимость коэффициента пропускания UVA от расхода раствора G_U и величины тока I при $G = 2$ г/с ; $t = 10$ с; $h = 70$ мм

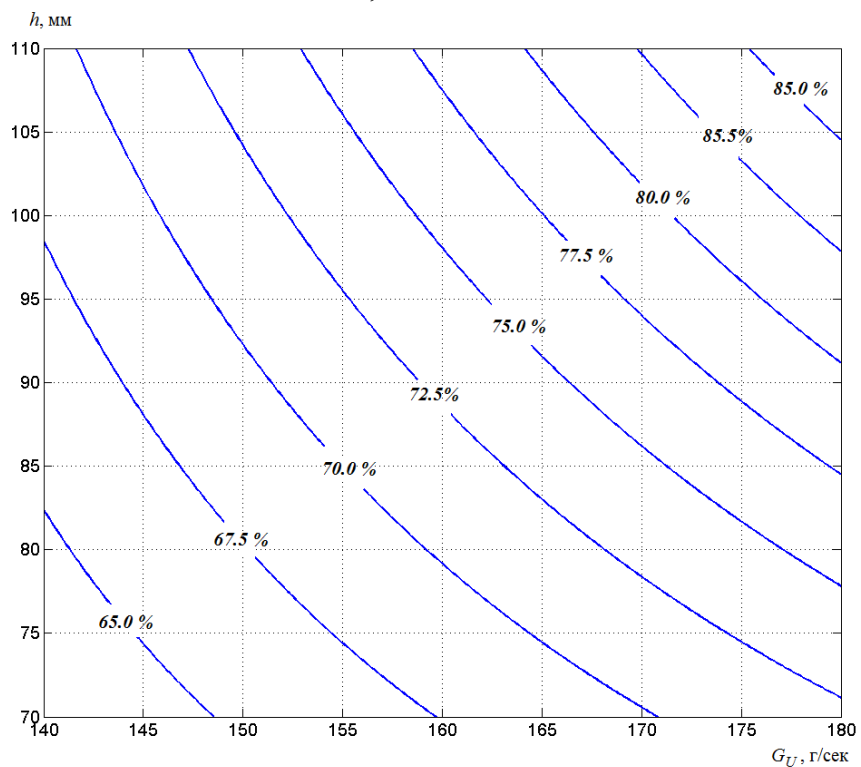


Рис. 2 – Зависимость коэффициента направленного пропускания света от расхода раствора G_U и дистанции обработки h при $G = 2$ г/с ; $t = 10$ с; $I = 105$ А

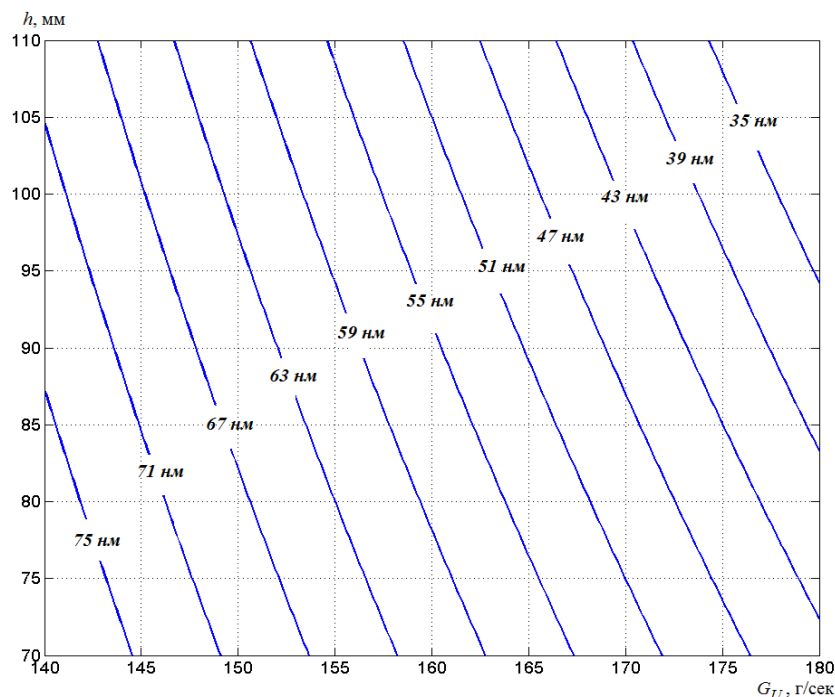


Рис. 3 – Зависимость шероховатости поверхности от расхода раствора G_U и дистанции обработки h при $G = 2$ г/с ; $t = 10$ с; $I = 105$ А

Уменьшение дистанции обработки со 110 мм до 70 мм приводит к уменьшению коэффициента пропускания ультрафиолетового излучения UVA на 15.6 %, коэффициента направленного пропускания света на 25.4 %, увеличению среднего арифметического отклонения профиля Ra на 38.8 %

Выводы. В ходе проведенных исследований разработана математическая модель ионно-плазменной обработки поверхности стекла при атмосферном давлении, которая позволяет определить оптимальный диапазон изменения технологических параметров процесса обработки (расход раствора материала внедрения, величина тока, мощность, дистанция обработки, расход плазмообразующего газа, время обработки) для формирования проникающих покрытий с заданными оптическими свойствами (коэффициент пропускания ультрафиолетового излучения UVA, коэффициент направленного пропускания света) при минимальной шероховатости поверхности обработанного образца.

Список литературы: 1. *Chen, F. F.* Principles of plasma processing [Text] / *Fransis F. Chen, Jane P. Chang.* – Los Angeles : Plenum / Kluwer Publishers, 2002. – 249 p. 2. *Fridman, A.* Plasma Chemistry [Text] / *Alexander Fridman.* – Cambridge : Cambridge University Press, 2008. – 1022 p. – ISBN-13-978-0-511-39857-5. 3. Физика и техника низкотемпературной плазмы [Текст] / [С. В. Дресвин, А. В. Донской, В. М. Гольдфарб, В. С. Клубникин]; под общ. ред. С. В. Дресвина. – М. : Атомиздат, 1972. – 352 с. 4. *Шрам, А. А.* Электротехнический комплекс поверхностной модификации стекла потоками низкотемпературной плазмы. [Текст] / *А. А. Шрам* // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2013. – № 4 – 2. – С. 210 – 215. 5. *Джонсон, Н.* Статистика и планирование эксперимента в науке и технике: методы планирования эксперимента [Текст] / *Н. Джонсон, Ф. Лион.* – М. : Мир, 1981. – 520 с. 6. *Гареев, А. Г.* Основы обработки и визуализации экспериментальных данных : [учеб. пособие] [Текст] / *А. Г. Гареев.* – Уфа : УГНТУ, 2004. – 82 с. 7. *Горский, В. Г.* Планирование промышленных экспериментов [Текст] / *В. Г. Горский, Ю. П. Адлер, А. М. Талай.* – М. : Металлургия, 1978. – 112 с. 8. *Ермаков, С. М.* Математическая теория оптимального эксперимента [Текст] / *С. М. Ермаков, А. А. Жигляевский.* – М. : Наука, 1987. – 318 с. 9. *Draпер, N.*

R. Applied regression analysis [Text] / *Norman R. Draper, Harry Smith*. – Wiley Series in Probability and Statistics, 1998. – 736 p. – ISBN 978-0-471-17082-2. **10.** *Taha, H. A.* Operations research: an introduction (9th Edition) [Text] / *Hamdy. A. Taha*. – New Jersey: University of Arkansas, 2010. – 832 p. – ISBN-10: 013255593X.

Bibliography (transliterated): **1.** *Chen, F. F.* (2002). Principles of plasma processing. Los Angeles : Plenum / Kluwer Publishers, 249. **2.** *Fridman, A.* (2008). Plasma Chemistry. Cambridge : Cambridge University Press, 1022. ISBN: 13 978-0-511-39857-5. **3.** *Dresvin, S. V., Donskoj, A. V., Gol'dfarb, V. M., Klubnikin, V. S.* (1972). Fizika i tehnika nizkotemperaturnoj plazmy [Physics and technique of low-temperature plasma]. Moscow : Atomizdat, 352. **4.** *Shram, A. A.* (2013). Jelektrotehnicheskij kompleks poverhnostnoj modifikacii stekla potokami nizkotemperaturnoj plazmy [Electrotechnical complex for the surface modification of glass by the flows of low temperature plasma]. Polzunovskij vestnik, 4 – 2, 210 – 215. **5.** *Dzhonson, N.* (1981). Statistika i planirovanie jeksperimenta v nauke i tehnike: metody planirovanija jeksperimenta [Statistics and experimental design in science and technology: the methods of experimental design]. Moscow : Mir, 520. **6.** *Gareev, A. G.* (2004). Osnovy obrabotki i vizualizacii jeksperimental'nyh dannyh [Fundamentals of processing and visualization of the experimental data]. Ufa : UGNTU, 82. **7.** *Gorskij, V. G., Adler, Ju. P., Talalaj, A. M.* (1978). Planirovanie promyshlennyh jeksperimentov [Planning of industrial experiments]. Moscow : Metallurgija, 112. **8.** *Ermakov, S. M., Zhigljavskij, A. A.* (1987). Matematicheskaja teorija optimal'nogo jeksperimenta [Mathematical theory of optimal experiment]. Moscow : Nauka, 318. **9.** *Draper, N. R., Smith, H.* (1998). Applied regression analysis. Wiley Series in Probability and Statistics, 736. ISBN: 978-0-471-17082-2. **10.** *Taha, H. A.* (2010). Operations research: an introduction (9th Edition). New Jersey: University of Arkansas, 832. ISBN: 10: 013255593X.

Надійшла (received) 27.04.2015