

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУХЛУЧЕВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ю.В. Никитюк¹, Е.Б. Шершнев¹, С.И. Соколов¹, И.Ю. Аушев²

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF TWO-BEAM LASER CLEANING OF QUARTZ RAW MATERIALS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND THE FINITE ELEMENT METHOD

Y.V. Nikitjuk¹, E.B. Shershnev¹, S.I. Sokolov¹, I.Y. Aushev²

¹Francisk Skorina Gomel State University

²University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk

Аннотация. С помощью искусственных нейронных сетей выполнено моделирование процесса двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья. Для формирования обучающих массивов данных и массивов данных для тестирования нейронных сетей была использована программа конечно-элементного анализа ANSYS. Расчеты были выполнены для 500 вариантов входных параметров, 40 из которых были использованы для тестирования нейронных сетей. Изучено влияние параметров нейросетевых моделей на точность определения максимальных температур в частицах кварца, формируемых в результате двухлучевого воздействия. Определены параметры нейронных сетей, обеспечивающие приемлемые результаты при прогнозировании температур в зоне лазерной обработки. Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических параметров процессов двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья.

Ключевые слова: нейронная сеть, лазерная очистка, кварцевое сырье, ANSYS.

Для цитирования: Определение параметров двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья с применением искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов / Ю.В. Никитюк, Е.Б. Шершнев, С.И. Соколов, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 37–41. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_37. – EDN: EFURGI

Abstract. With the help of artificial neural networks, the process of two-beam laser cleaning of quartz raw materials has been modeled. For the formation of training data sets and data sets for testing neural networks, the ANSYS finite element analysis program was used. The calculations were performed for 500 variants of input parameters, 40 of which were used to test neural networks. The influence of the parameters of neural network models on the accuracy of determining the maximum temperatures in quartz particles formed as a result of two-beam exposure were studied. The parameters of neural networks were determined that provided acceptable results when predicting temperatures in the laser treatment zone. The results obtained can be used in determining the technological parameters of the processes of two-beam laser cleaning of quartz raw materials.

Keywords: neural network, laser cleaning, quartz raw materials, ANSYS.

For citation: Determination of the parameters of two-beam laser cleaning of quartz raw materials using artificial neural networks and the finite element method / Y.V. Nikitjuk, E.B. Shershnev, S.I. Sokolov, I.Y. Aushev // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 3 (52). – P. 37–41. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_37 (in Russian). – EDN: EFURGI

Введение

Для кварцевых стекол характерна высокая механическая прочность и термостойкость, устойчивая к действию воды, щелочных и кислых растворов. Кварцевые стекла широко используются в электронной промышленности, в том числе при изготовлении фотошаблонов, являющихся важной составляющей производства микросхем [1]–[2].

Чистота кварцевого сырья, используемого при производстве фотошаблонов, существенно влияет на эксплуатационные параметры микросхем [3]. В настоящее время применяются

магнитные, электрические и химические методы очистки кварцевого сырья от примесей [4]. В ряде случаев недостатки вышеперечисленных методов удается преодолеть при использовании двухлучевого метода лазерной очистки кварцевого сырья [5]–[9]. При этом температурные поля, формируемые в частицах кварца при двухлучевом лазерном воздействии, являются характеристикой, определение которой обеспечивает возможность выбора эффективных технологических режимов очистки кварцевого сырья.

В настоящее время для расчета температурных полей, формируемых при лазерной обработке,

широко применяется программа конечно-элементного анализа ANSYS [10]–[11]. Также в исследованиях лазерной обработки материалов успешно применяются искусственные нейронные сети [9]–[13]. В ряде случаев при моделировании процессов лазерной обработки используется сочетание метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей [14]–[18].

Целью данной работы является прогнозирование температурных полей, формируемых при двухлучевой лазерной очистке кварцевого сырья с использованием искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов.

1 Конечно-элементный анализ

Массивы данных для обучения и тестирования нейронных сетей были созданы в результате расчетов температурных полей, формируемых при двухлучевом воздействии на частицы кварца в программе конечно-элементного анализа ANSYS. Моделирование проводилось для частиц кварца и включений примеси сферической формы (рисунок 1.1).

При моделировании использовалась конечно-элементная модель, состоящая из 183590 элементов и 250470 узлов (рисунок 1.2). При тепловом анализе применялись элементы Solid 87. Для расчетов использовались свойства кварца и слюды как основного вида примеси, содержащейся в кварцевом сырье [19]–[20].

Параметры, использовавшиеся для конечно-элементного моделирования двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья, представлены в таблице 1.1. Расчеты были выполнены для 500 вариантов входных параметров, 40 из которых были использованы для тестирования нейронных сетей (таблица 1.2).

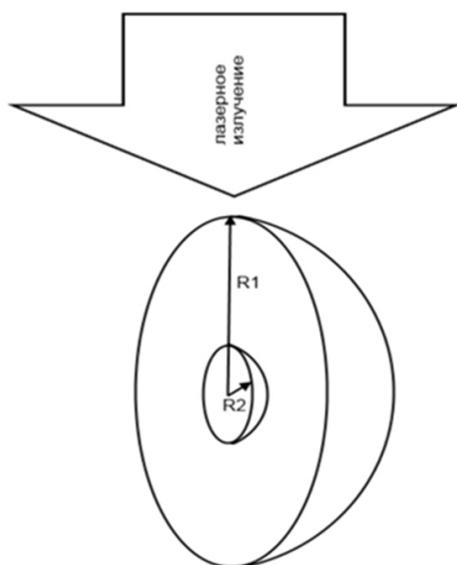


Рисунок 1.1 – Схема воздействия лазерного излучения на частицу кварца:
 $R1$ – радиус частицы кварца,
 $R2$ – радиус примеси

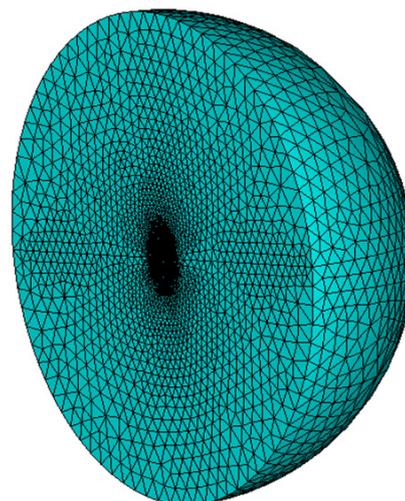


Рисунок 1.2 – Конечно-элементная модель

На рисунке 1.3 представлено распределение температурных полей при двухлучевом воздействии на частицы кварца с включениями примеси и без включений примеси.

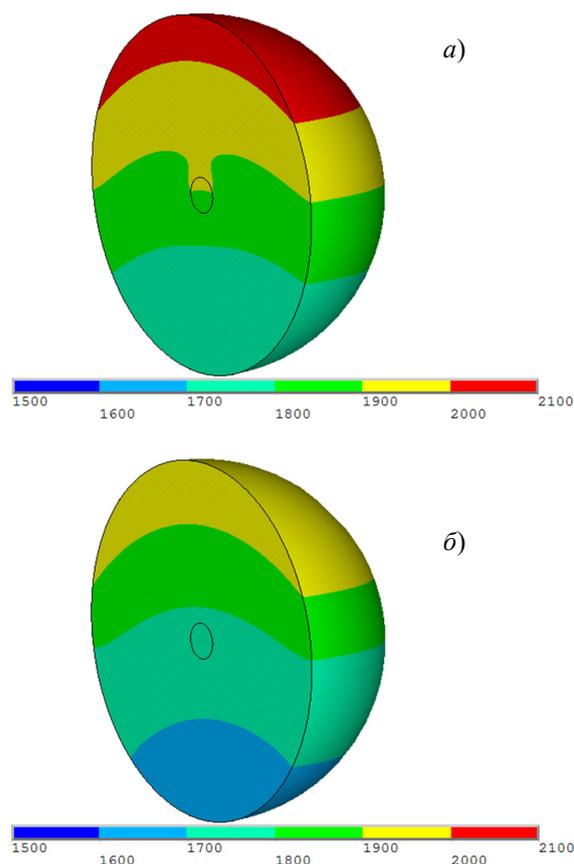


Рисунок 1.3 – Распределение температурного поля в частице кварца при двухлучевом воздействии, К:

а) с примесью; б) без примеси
 $P1 = 1,15 \cdot 10^6$ Вт/м², $P2 = 2 \cdot 10^6$ Вт/м²,
 $R1 = 3 \cdot 10^{-4}$ м, $R2 = 3 \cdot 10^{-5}$ м, $t = 0,5$ с

Таблица 1.1 – Параметры лазерного воздействия на кварцевое сырье

| Параметры | Диапазон значений |
|---|-------------------------------------|
| Плотность мощности пучка с длиной волны 10,6 мкм $P1$, Вт/м ² | $1 \cdot 10^5 - 1,5 \cdot 10^6$ |
| Плотность мощности пучка с длиной волны 1,06 мкм $P2$, Вт/м ² | $1 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^6$ |
| Радиус частицы кварца $R1$, м | $2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$ |
| Радиус примеси $R2$, м | $2 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$ |
| Время обработки t , с | 0,1 – 3 |

Таблица 1.2 – Тестовый набор данных

| № | $P1$, Вт/м ² | $P2$, Вт/м ² | $R1$, м | $R2$, м | t , с | $T1$, К | $T2$, К |
|----|--------------------------|--------------------------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 1 | 740000 | 2900000 | 0,00044 | 0,000036 | 1 | 1767 | 1691 |
| 2 | 130000 | 1200000 | 0,00046 | 0,000022 | 3 | 844 | 812 |
| 3 | 580000 | 2000000 | 0,00030 | 0,000024 | 0,6 | 1123 | 1084 |
| 4 | 1100000 | 1700000 | 0,00038 | 0,000041 | 0,5 | 1554 | 1507 |
| 5 | 830000 | 2300000 | 0,00043 | 0,000034 | 0,5 | 1087 | 1058 |
| 6 | 450000 | 1200000 | 0,00045 | 0,000044 | 1,5 | 1575 | 1507 |
| 7 | 350000 | 1600000 | 0,00027 | 0,000021 | 1,4 | 1836 | 1742 |
| 8 | 200000 | 1400000 | 0,00043 | 0,000024 | 1,7 | 833 | 801 |
| 9 | 750000 | 2600000 | 0,00031 | 0,000024 | 0,3 | 720 | 697 |
| 10 | 1100000 | 2800000 | 0,00043 | 0,000026 | 0,2 | 616 | 610 |
| 11 | 720000 | 2400000 | 0,00035 | 0,000032 | 1 | 2124 | 2018 |
| 12 | 400000 | 2400000 | 0,00028 | 0,000041 | 0,7 | 1234 | 978 |
| 13 | 150000 | 1000000 | 0,00046 | 0,000039 | 1 | 400 | 369 |
| 14 | 790000 | 1400000 | 0,00050 | 0,000033 | 1,2 | 1969 | 1943 |
| 15 | 150000 | 2000000 | 0,00048 | 0,000040 | 2,3 | 898 | 736 |
| 16 | 660000 | 1900000 | 0,00046 | 0,000046 | 0,4 | 735 | 704 |
| 17 | 280000 | 2600000 | 0,00020 | 0,000032 | 0,3 | 631 | 417 |
| 18 | 200000 | 2900000 | 0,00031 | 0,000046 | 1,2 | 1335 | 786 |
| 19 | 320000 | 2800000 | 0,00021 | 0,000034 | 1 | 2253 | 1521 |
| 20 | 300000 | 2900000 | 0,00021 | 0,000038 | 0,9 | 2123 | 1298 |
| 21 | 680000 | 1600000 | 0,00048 | 0,000047 | 0,5 | 891 | 861 |
| 22 | 240000 | 2800000 | 0,00025 | 0,000038 | 0,3 | 518 | 306 |
| 23 | 240000 | 2000000 | 0,00039 | 0,000027 | 1,4 | 953 | 884 |
| 24 | 190000 | 2700000 | 0,00039 | 0,000025 | 1 | 572 | 498 |
| 25 | 410000 | 2900000 | 0,00025 | 0,000041 | 0,6 | 1461 | 1030 |
| 26 | 790000 | 1200000 | 0,00042 | 0,000023 | 0,3 | 774 | 769 |
| 27 | 400000 | 2800000 | 0,00033 | 0,000049 | 0,5 | 888 | 653 |
| 28 | 700000 | 2600000 | 0,00031 | 0,000046 | 0,3 | 785 | 694 |
| 29 | 980000 | 2400000 | 0,00021 | 0,000024 | 0,4 | 1972 | 1856 |
| 30 | 550000 | 2900000 | 0,00029 | 0,000049 | 0,6 | 1603 | 1208 |
| 31 | 320000 | 1800000 | 0,00037 | 0,000046 | 1,1 | 1079 | 929 |
| 32 | 710000 | 2900000 | 0,00031 | 0,000042 | 0,2 | 609 | 548 |
| 33 | 130000 | 2400000 | 0,00034 | 0,000048 | 2,7 | 1743 | 967 |
| 34 | 510000 | 1000000 | 0,00035 | 0,000045 | 1,2 | 1837 | 1730 |
| 35 | 460000 | 1900000 | 0,00050 | 0,000038 | 1,6 | 1602 | 1535 |
| 36 | 250000 | 1900000 | 0,00047 | 0,000035 | 3 | 1648 | 1523 |
| 37 | 340000 | 1700000 | 0,00037 | 0,000023 | 1,5 | 1389 | 1342 |
| 38 | 250000 | 2800000 | 0,00049 | 0,000041 | 1,9 | 1173 | 994 |
| 39 | 130000 | 1600000 | 0,00035 | 0,000030 | 2,8 | 1151 | 958 |
| 40 | 580000 | 1400000 | 0,00044 | 0,000020 | 1,6 | 2107 | 2087 |

Распределение температурных полей, представленное на рисунке 1.3, характеризуется наличием областей высоких температур на поверхности кварцевых частиц, обусловленное воздействием лазерного излучения с длиной волны

10,6 мкм. При этом наличие примеси приводит к увеличению температуры в зоне ее локализации вследствие поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм, и также приводит к дополнительному увеличению температуры на

поверхности частицы кварца (рисунок 3, а). При рациональном выборе параметров двухлучевого лазерного воздействия обеспечивается формирование агломератов из оплавленных частиц кварца с примесью, что в дальнейшем позволяет эффективно очищать кварцевое сырье [5]–[9].

2 Применение нейронной сети

Главной особенностью искусственных нейронных сетей является то, что они обучаются, а не программируются, при этом искусственные нейронные сети особенно эффективны при моделировании сложных связей между входными и выходными параметрами [21]. Как отмечалось выше, наборы данных для обучения и тестирования были сформированы в результате решения соответствующих задач в программе ANSYS. После обучения искусственная нейронная сеть, обрабатывая уже новые наборы параметров двухлучевой лазерной обработки кварцевого сырья, способна корректно определять значения максимальных температур на поверхности кварцевых частиц.

Для определения значения максимальных температур на поверхности кварцевых частиц были применены нейронные сети прямого распространения, созданные в библиотеке машинного обучения TensorFlow [22]. При формировании сетей использовались оптимизатор Adam, функция активации ReLu и функция потерь mse. Количество эпох при обучении сетей было равно 100.

Для определения значений температур при лазерной обработке были использованы нейронные сети с архитектурой, представленной на рисунке 2.1.

Для оценки эффективности работы нейронных сетей использованы следующие критерии:

- коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2},$$

- средняя абсолютная ошибка MAE (Mean Absolute Error)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - y_i|,$$

- среднеквадратичная ошибка RMSE (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2},$$

- средняя абсолютная процентная ошибка MAPE (Mean Absolute Percentage Error)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - y_i}{d_i} \right| \cdot 100,$$

где d_i – желаемый выход сети, y_i – реальный выход сети.

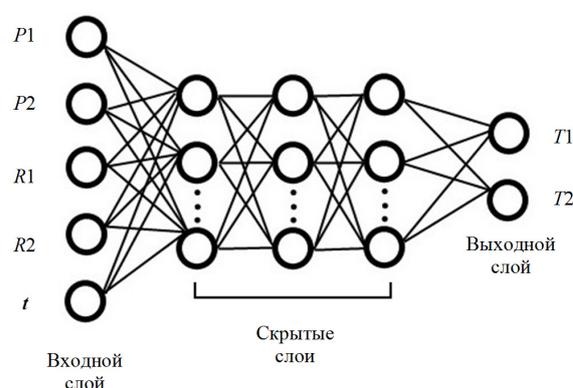


Рисунок 2.1 – Архитектура нейронной сети

Результаты оценки созданных нейронных сетей приведены в таблице 2.1.

При тестировании лучшие результаты были получены для вариантов 6 и 10 конфигурации нейронных сетей с двумя и тремя скрытыми слоями соответственно. Средние абсолютные процентные ошибки (MAPE) при тестировании этих сетей не превысили 6,5%, а средние абсолютные ошибки (MAE) и среднеквадратичные ошибки (RMSE) не превысили 90° К.

Таблица 2.1 – Результаты тестирования нейронных сетей

| № | Архитектура сети | T1 | | | | T2 | | | |
|----|------------------|------|-----|------|----------------|------|-----|------|----------------|
| | | RMSE | MAE | MAPE | R ² | RMSE | MAE | MAPE | R ² |
| 1 | [5-10-10-2] | 174 | 124 | 11,1 | 0,8898 | 159 | 112 | 11,7 | 0,8895 |
| 2 | [5-20-10-2] | 142 | 109 | 10,2 | 0,9263 | 109 | 80 | 8,2 | 0,9484 |
| 3 | [5-20-20-2] | 110 | 94 | 8,9 | 0,9556 | 131 | 101 | 12,3 | 0,9252 |
| 4 | [5-30-10-2] | 101 | 81 | 7,7 | 0,9627 | 98 | 74 | 7,6 | 0,9581 |
| 5 | [5-30-20-2] | 104 | 77 | 6,8 | 0,9605 | 88 | 65 | 7,3 | 0,9665 |
| 6 | [5-30-30-2] | 86 | 62 | 5,6 | 0,9730 | 84 | 60 | 6,2 | 0,9694 |
| 7 | [5-30-10-10-2] | 110 | 86 | 8,6 | 0,9554 | 101 | 80 | 9,9 | 0,9556 |
| 8 | [5-30-20-10-2] | 150 | 111 | 9,1 | 0,9176 | 153 | 114 | 11,5 | 0,8982 |
| 9 | [5-30-20-20-2] | 106 | 76 | 6,7 | 0,9589 | 106 | 80 | 8,7 | 0,9506 |
| 10 | [5-30-30-10-2] | 86 | 65 | 6,1 | 0,9728 | 81 | 59 | 5,9 | 0,9717 |
| 11 | [5-30-30-20-2] | 116 | 79 | 6,9 | 0,9512 | 115 | 78 | 8,2 | 0,9429 |
| 12 | [5-30-30-30-2] | 93 | 67 | 6,5 | 0,9688 | 87 | 63 | 6,7 | 0,9669 |

Заключение

В работе показана возможность прогнозирования режимов двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья с использованием сочетания искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов. В результате численных экспериментов определены архитектуры нейронных сетей, обеспечивающие лучший результат при определении значений максимальных температур на поверхности частиц кварца. Полученные результаты могут быть применены при определении технологических параметров процессов двухлучевой лазерной очистки кварцевого сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арбузов, В.И. Основы радиационного оптического материаловедения / В.И. Арбузов. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
2. Бокарев, В. Контактная литография в нанотехнологии / В. Бокарев, Е. Горнев // Наноиндустрия. – 2010. – № 5. – С. 22–25.
3. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм / С. Аваков [и др.]. – Фотоника. – 2007. – № 6. – С. 35–39.
4. Иванов, Г.А. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учебное пособие / Г.А. Иванов, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехнического университета, 2011.
5. Способ обогащения кварцевой крупки: пат. 21228 Респ. Беларусь, МПК(2006) С 03В 1/00, В 07В 13/04, Н 05В 6/00 / Е.Б. Шершнева, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов; заявитель Гомель. гос. ун-т. им. Ф. Скорины – № а20140188; заявл. 21.03.14; опубл. 30.08.17.
6. Установка для обогащения жильного кварца: пат. 9675 Респ. Беларусь, МПК(2006) С 03В 1/00 / Е.Б. Шершнева, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов; заявитель Гомель. гос. ун-т. им. Ф. Скорины – № u20130334; заявл. 15.04.13; опубл. 30.10.13.
7. Моделирование двухлучевой лазерной сепарации кварцевого сырья / Шершнева Е.Б. [и др.] // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2013. – № 6 (81). – С. 216–220.
8. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А.П. Достанко [и др.]; под ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. – Минск: Беларуская навука, 2020. – 260 с.
9. Емельянов, В.А. Двухлучевая лазерная очистка кварцевого сырья / В.А. Емельянов, Е.Б. Шершнева, С.И. Соколов // Доклады БГУИР. – 2021. – № 19 (3). – С. 40–48.
10. Бессмельцев, В.П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В.П. Бессмельцев, Е.Д. Булушев // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–21.
11. Parandoush, P. A review of modeling and simulation of laser beam machining / P. Parandoush,

A. Hossain // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – № 85. – P. 135–145.

12. A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining / A.N. Bakhtiyari [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2021. – Vol. 135. – P. 1–18.

13. Neural network modeling and analysis of the material removal process during laser machining / B.F. Yousef [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – Vol. 22, № 1–2, P. 41–53.

14. Kant, R. An integrated FEM-ANN model for laser bending process with inverse estimation of absorptivity / R. Kant, S.N. Joshi, U.S. Dixit // Mech. Adv. Mater Mod. Process. – 2015. – № 1. – 6 p.

15. Comparison of ANN and finite element model for the prediction of thermal stresses in diode laser cutting of float glass / M.B. Kadri [et al.] // Optik – Int. J. Light Electron Optics. – 2015. – Vol. 126. – № 19. – P. 1959–1964.

16. Применение искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов для определения параметров обработки кварцевых зольгелей стекол эллиптическими лазерными пучками / Ю.В. Никитюк, А.Н. Сердюков, В.А. Прохоренко, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 3 (48). – С. 30–36.

17. Nikitjuk, Y.V. Determination of the parameters of two-beam laser splitting of silicate glasses using regression and neural network models / Y.V. Nikitjuk, A.N. Serdyukov, I.Y. Aushev // Journal of the Belarusian State University. Physics. – 2022. – № 1. – P. 35–43.

18. Применение метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей для определения параметров лазерной обработки стали 12Х18Н9Т / Ю.В. Никитюк [и др.] // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2022. – № 1. – С. 48–55.

19. Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 728 с.

20. Книпович, Ю.Н. Анализ минерального сырья / Ю.Н. Книпович, Ю.В. Морачевский. – Ленинград: ГХИ, 1959. – 1055 с.

21. Головкин, В.А. Нейросетевые технологии обработки данных: учеб. пособие / В.А. Головкин, В.В. Краснопрошин. – Минск: БГУ, 2017. – 263 с.

22. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.

Поступила в редакцию 01.08.2022.

Информация об авторах

Никитюк Юрий Валерьевич – к.ф.-м.н., доцент
Шершнева Евгений Борисович – к.т.н., доцент
Соколов Сергей Иванович – ст. преподаватель
Аушев Игорь Юрьевич – к.т.н., доцент