

## Оптимизация лазерного раскалывания силикатных стекол эллиптическими пучками при дополнительном воздействии потока горячего воздуха

Ю.В. НИКИТЮК<sup>1</sup>, А.Н. СЕРДЮКОВ<sup>1</sup>, И.Ю. АУШЕВ<sup>2</sup>

В работе были проведены исследования лазерного раскалывания силикатных стекол с использованием дополнительного воздействия потока горячего воздуха. Для выполнения расчетов температур и термоупругих напряжений был использован язык программирования APDL. Численный эксперимент был проведен с использованием центрального композиционного плана. В результате были созданы регрессионные и нейросетевые модели процесса лазерного раскалывания стекла с применением дополнительного потока горячего воздуха. Был проведен сравнительный анализ полученных моделей. Для оптимизации параметров процесса был применен генетический алгоритм. Оптимизация выполнялась по двум критериям: максимуму скорости резки и максимуму значений термоупругих напряжений в зоне обработки. Полученные результаты демонстрируют возможности использования технологии метамоделирования для определения оптимальных параметров процесса лазерной обработки силикатного стекла при дополнительном воздействии потока горячего воздуха.

**Ключевые слова:** лазерное раскалывание, поток горячего воздуха, искусственная нейронная сеть, генетический алгоритм.

In this work, studies were carried out on laser cleaving of silicate glasses using additional exposure to a hot air flow. The APDL programming language was used to perform temperature and thermoelastic stress calculations. The numerical experiment was carried out using the central composition plan. As a result, regression and neural network models of the laser glass cleaving process were created using an additional hot air flow. A comparative analysis of the obtained models was carried out. To optimize the process parameters, a genetic algorithm was applied. Optimization was carried out according to two criteria: the maximum cutting speed and the maximum values of thermoelastic stresses in the processing zone. The results obtained demonstrate the possibility of using the metamodeling technology to determine the optimal parameters of the process of laser processing of silicate glass under the additional action of a hot air flow.

**Keywords:** laser cleaving, hot air flow, artificial neural network, genetic algorithm.

**Введение.** В настоящее время методы лазерной резки хрупких неметаллических материалов получили широкое распространение. Среди этих методов особенно эффективным является управляемое лазерное раскалывание, которое отличается высокой скоростью и точностью разделения [1]–[9]. Этот метод обработки имеет некоторые недостатки, связанные с нестабильностью процесса образования трещин, вызванной использованием воздушно-водяной смеси в качестве хладагента. При использовании такого варианта охлаждения, из-за недостаточно высокой скорости движения жидкости по поверхности материала, на ней образуется зона с нестабильным слабым охлаждением, что отрицательно сказывается на надежности процесса формирования лазерно-индуцированных трещин. Для преодоления этой проблемы предлагается использование совместного воздействия лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха на обрабатываемую поверхность [10]–[11].

Совместное использование потока горячего воздуха с лазерным излучением и хладагентом предоставляет возможность более эффективного контроля процесса образования трещин, что в свою очередь повышает стабильность и надежность процесса лазерного раскалывания. Такое комбинированное воздействие обеспечивает новые возможности для улучшения качества и производительности данного метода лазерной резки неметаллических материалов.

В ряде случаев оптимизация параметров лазерной обработки материалов может быть эффективно осуществлена с использованием суррогатных моделей, которые характеризуются высокой вычислительной эффективностью [12]–[13]. Такие модели позволяют определять выходные параметры, связанные с процессом лазерной обработки, без необходимости выполнения полных расчетов, включая использование регрессионных или нейросетевых моделей [14]–[15]. Следующим этапом применения суррогатных моделей является выбор оптимальных технологических режимов лазерной обработки, в том числе с применением генетических алгоритмов [16]–[18].

В данной работе было выполнено определение оптимальных параметров лазерного раскалывания силикатных стекол при применении эллиптических лазерных пучков и дополнительного воздействия потока горячего воздуха. Применение генетического алгоритма для нахождения эффективных комбинаций технологических параметров процесса обработки силикатного стекла обеспечило повышение производительности и качества обработки силикатных стекол.

**Метамоделирование и определение оптимальных параметров резки стекла.** Моделирование температурных полей и полей термоупругих напряжений, формируемых в силикатных стеклах при обработке эллиптическим лазерным пучком, потоком горячего воздуха и хладагентом, выполнялось в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке с использованием языка программирования APDL в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.

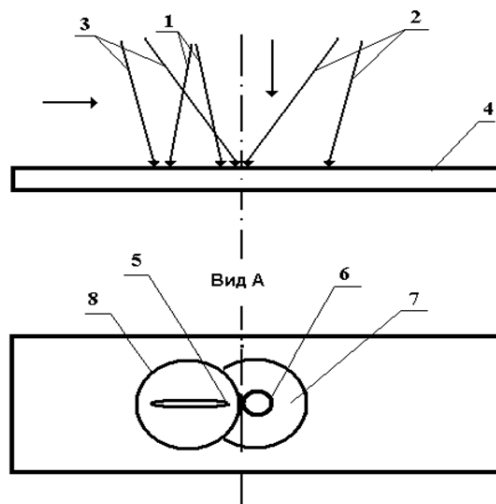


Рисунок 1 – Схема пространственного расположения зон воздействия лазерного излучения, потока горячего воздуха и хладагента: 1 – лазерный пучок с длиной волны 10,6 мкм, 2 – хладагент, 3 – поток горячего воздуха, 4 – обрабатываемое изделие из стекла, 5 – сечение лазерного пучка 1 в плоскости обработки, 6 – зона интенсивного охлаждения, 7 – пленка из жидкости растекающегося хладагента, 8 – зона воздействия потока горячего воздуха

Для расчетов были использованы свойства силикатного стекла, приведенные в работе [11]. Расчеты были выполнены для прямоугольного образца размерами  $3 \times 2 \times 0,3$  мм, разбитого на 61920 элементов.

Скорость обработки была равна  $V = 30$  мм/с. Использовались следующие параметры обработки: мощность лазерного излучения  $P = 10$  Вт, большая полуось лазерного пучка  $A = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м, малая полуось  $B = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м, температура горячего воздуха в центре пятна нагрева  $T_v = 523$  °К, диаметр сопла устройства подачи горячего воздуха  $D = 0,003$  м, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности  $Z = 0,01$  м.

При расчете коэффициентов теплоотдачи в зоне воздействия направленного потока горячего воздуха на поверхность силикатного стекла использовалась зависимость, используемая в работах [19]–[20]. Для определения направления развития лазерно-индуцированной трещины был применен критерий максимальных растягивающих напряжений.

На рисунках 2–3 представлены расчетные распределения температурных полей и полей термоупругих напряжений.

При совместном воздействии на поверхность силикатного стекла лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха кроме локальной зоны высоких температур, обусловленной воздействием лазерного излучения, на поверхности материала формируется дополнительная зона повышенных температур. Наличие данной зоны обусловлено дополнительным воздействием потока горячего воздуха. При этом использование этого дополнительного воздействия не приводит к принципиальным отличиям в пространственном распределении зон напряжений растяжения и сжатия по сравнению со случаем управляемого лазерного раскалывания [11].

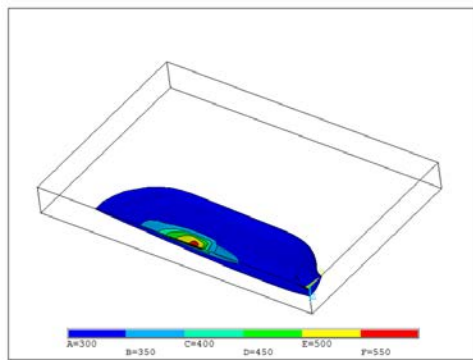


Рисунок 2 – Распределение температуры (К) при воздействии на поверхность материала лазерного излучения, потока горячего воздуха и хладагента

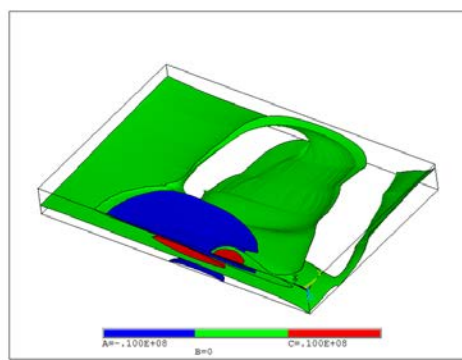


Рисунок 3 – Распределение напряжений  $\sigma_y$  (МПа) при воздействии на поверхность материала лазерного излучения, потока горячего воздуха и хладагента

Для выполнения численного эксперимента был использован гранецентрированный вариант центрального композиционного плана эксперимента для пяти факторов (P1–P5): P1 – скорость обработки V, P2 – мощность лазера P, P3 – большая полуось лазерного пучка A, P4 – малая полуось пучка B, P5 – температура горячего воздуха  $T_v$  в центре пятна нагрева. В эксперименте для 27 комбинаций входных параметров были определены следующие выходные параметры: максимальная температура T и максимальные напряжения растяжения  $\sigma_y$  в зоне обработки (см. таблицу 1).

Таблица 1 – План численного эксперимента и результаты расчетов

N	P1 V, м/с	P2 P, Вт	P3 A, м	P4 B, м	P5 $T_v$ , К	P6 T, К	P7 $\sigma_y$ , МПа
1	0,025	10	0,0025	0,0015	523	593	33
2	0,02	10	0,0025	0,0015	523	629	42
3	0,03	10	0,0025	0,0015	523	565	27
4	0,025	5	0,0025	0,0015	523	462	20
5	0,025	15	0,0025	0,0015	523	723	47
6	0,025	10	0,002	0,0015	523	616	32
7	0,025	10	0,003	0,0015	523	568	33
8	0,025	10	0,0025	0,001	523	713	45
9	0,025	10	0,0025	0,002	523	528	25
10	0,025	10	0,0025	0,0015	473	584	32
11	0,025	10	0,0025	0,0015	573	601	35
12	0,02	5	0,002	0,001	573	583	34
13	0,03	5	0,002	0,001	473	510	19
14	0,02	15	0,002	0,001	473	1026	76
15	0,03	15	0,002	0,001	573	897	51
16	0,02	5	0,003	0,001	473	518	30
17	0,03	5	0,003	0,001	573	491	21
18	0,02	15	0,003	0,001	573	929	82
19	0,03	15	0,003	0,001	473	800	53
20	0,02	5	0,002	0,002	473	449	18
21	0,03	5	0,002	0,002	573	438	14
22	0,02	15	0,002	0,002	573	710	44
23	0,03	15	0,002	0,002	473	608	25
24	0,02	5	0,003	0,002	573	436	20
25	0,03	5	0,003	0,002	473	398	11
26	0,02	15	0,003	0,002	473	630	43
27	0,03	15	0,003	0,002	573	577	29

Функции отклика были использованы для установления связи между выходными параметрами (T,  $\sigma_y$ ) и факторами (V, P, A, B,  $T_v$ ).

Соответствующие уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Y_T &= 6,54 - 8,99 \cdot V + 1,18 \cdot 10^{-1} \cdot P \\
 &- 5,62 \cdot 10^2 \cdot B - 9,89 \cdot 10^{-4} \cdot P^2 \\
 &+ 1,41 \cdot 10^5 \cdot B^2 - 5,56 \cdot 10^{-1} \cdot V \cdot P + 2,78 \cdot 10^3 \cdot V \cdot B \\
 &- 5,03 \cdot P \cdot A - 1,69 \cdot 10 \cdot P \cdot B - 1,82 \cdot 10^4 \cdot A \cdot B \\
 T &= e^{(Y_T)} - 1 \\
 Y_\sigma &= 4,22 \cdot 10 - 4,33 \cdot 10^2 \cdot V + 7,83 \cdot 10^{-1} \cdot P + 1,74 \cdot 10^3 \cdot A \\
 &- 2,09 \cdot 10^3 \cdot B + 4,26 \cdot 10^3 \cdot V^2 - 1,42 \cdot 10^{-2} \cdot P^2 \\
 &- 3,50 \cdot 10^5 \cdot A \cdot B - 8,24 \cdot 10^{-1} \cdot A \cdot T_V + 2,67 \cdot B \cdot T_V \\
 \sigma_y &= (Y_\sigma \cdot 0,085 + 1)^{\left(\frac{1}{0,085}\right)} - 1.
 \end{aligned}$$

Было обнаружено, что мощность лазера оказывает наибольшее влияние на максимальные значения температур и максимальные значения напряжений растяжения  $\sigma_y$  в зоне обработки. Также, скорость обработки и размеры малой полуоси эллиптического пучка значительно влияют на функции отклика. При этом размеры большой полуоси пучка оказывают заметное влияние на значения максимальных температур, а температура горячего воздуха влияет на максимальные напряжения растяжения  $\sigma_y$  в зоне обработки.

На рисунках 4–7 представлены зависимости максимальных температур и максимальных напряжений растяжения  $\sigma_y$  в зоне обработки от наиболее значимых факторов.

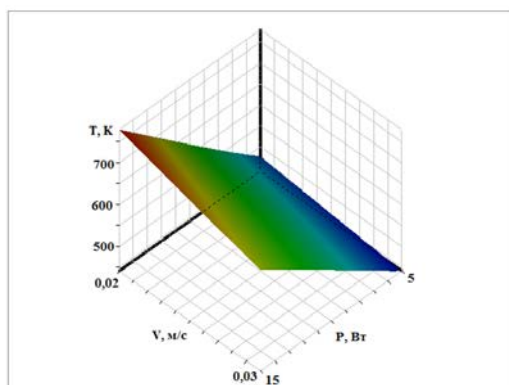


Рисунок 4 – Зависимость максимальной температуры  $T$  от параметров обработки  $P1 = V$  и  $P2 = P$

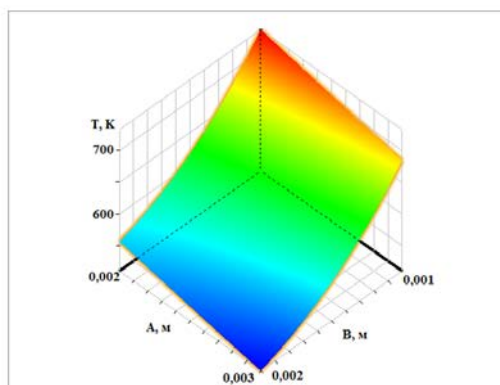


Рисунок 5 – Зависимость максимальной температуры  $T$  от параметров обработки  $P3 = A$  и  $P4 = B$

Было проведено моделирование процесса лазерного раскалывания силикатных стёкол с использованием искусственных нейронных сетей в соответствии с алгоритмом, описанным в работе [15]. Для обучения и тестирования нейронных сетей были сформированы выборки, полученные с помощью метода конечных элементов. При этом было использовано 27 комбинаций плана численного эксперимента, которые были дополнены ещё 200 комбинациями.

Для построения искусственных нейронных сетей с двумя скрытыми слоями была применена программа TensorFlow. В процессе формирования нейронных сетей использовались оптимизатор Adam, функция активации ReLu и функция потерь MSE. Обучение нейронной сети проходило в течение 500 эпох. Всего было построено 16 искусственных нейронных сетей, в которых число нейронов в скрытых слоях варьировалось от 5 до 20 с шагом 5.

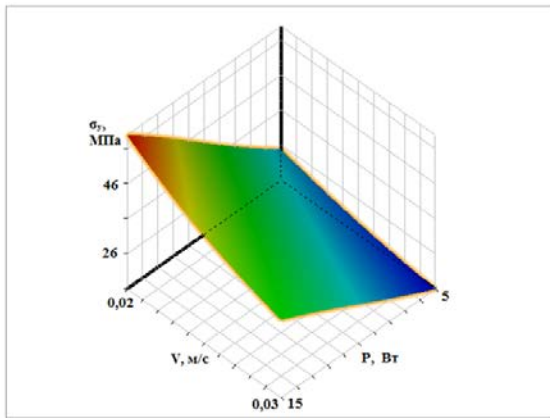


Рисунок 6 – Зависимость максимальных напряжения растяжения  $\sigma_y$  от параметров обработки P1 = V и P2 = P

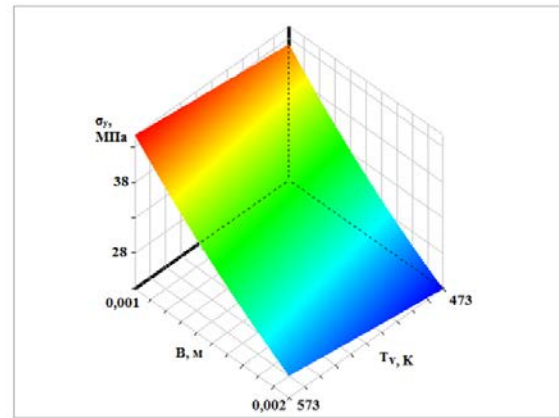


Рисунок 7 – Зависимость максимальных напряжения растяжения  $\sigma_y$  от параметров обработки P4 = B и P5 =  $T_v$

Для тестирования регрессионных и нейросетевых моделей был использован набор данных, представленный в таблице 2.

Таблица 2 – Тестовый набор параметров

№	P1 V, м/с	P2 P, Вт	P3 A, м	P4 B, м	P5 $T_v$ , К	P6 T, К	P7 $\sigma_y$ , МПа
1	0,021	6	0,002	0,001	555	617	36
2	0,026	14	0,002	0,002	566	632	31
3	0,021	13	0,003	0,001	488	824	67
4	0,025	5	0,002	0,002	474	433	14
5	0,021	12	0,003	0,001	484	785	62
6	0,023	14	0,003	0,002	532	595	36
7	0,024	11	0,002	0,002	552	580	28
8	0,029	5	0,003	0,001	562	493	22
9	0,029	14	0,002	0,001	562	869	50
10	0,023	14	0,002	0,001	546	945	64

Качество созданных моделей оценивалось при помощи средней абсолютной ошибки (англ. MAE), средней квадратичной ошибки (англ. RMSE), средней абсолютной процентной ошибки (англ. MAPE) и коэффициента детерминации  $R^2$  [15]. На рисунках 8–9 представлены тепловые карты распределения средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) при определении значений максимальной температуры и значений максимальных напряжений растяжения. На осях y (вертикальная) и x (горизонтальная) отмечено количество нейронов в первом и во втором скрытом слоях искусственной нейронной сети соответственно. Величина ошибки представлена интенсивностью цветового обозначения: увеличение ошибки от светлого к темному. В ходе численного эксперимента было установлено, что лучшие результаты показывает искусственная нейронная сеть с архитектурой [5-10-15-2].

Значения соответствующих критериев для регрессионных и нейросетевых моделей представлены в таблице 3. Результаты оценки полученных моделей указывают на необходимость метамодели результатов конечного-элементного анализа. При этом определенная в результате численного эксперимента архитектура нейросетевой модели оказалась лучше при прогнозировании параметров лазерного раскалывания силикатных стекол с использованием дополнительного потока горячего воздуха по сравнению с регрессионными моделями.

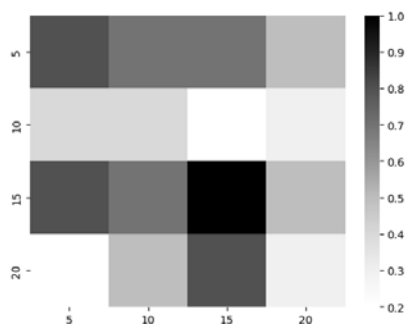


Рисунок 8 – Тепловая карта распределения средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) при определении  $T$

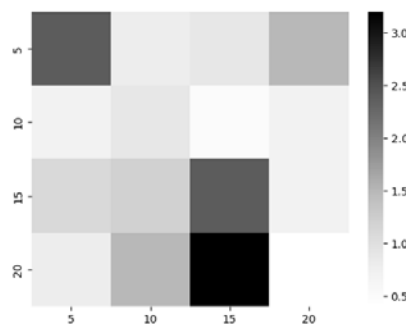


Рисунок 9 – Тепловая карта распределения средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) при определении  $\sigma_y$

Таблица 3 – Результаты оценки регрессионных нейросетевых моделей

Критерий	Регрессионная модель		Нейросетевая модель	
	$T$	$\sigma_y$	$T$	$\sigma_y$
RMSE	11,0 К	0,52 МПа	1,2 К	0,29 МПа
MAE	9,6 К	0,38 МПа	0,9 К	0,22 МПа
MAPE	1,4 %	0,9 %	0,2 %	0,5 %
$R^2$	0,9952	0,9991	0,9999	0,9997

Оптимизации параметров лазерного раскалывания стекла при использовании дополнительного воздействия потока горячего воздуха была выполнена с использованием модуля DesignXplorer программы Ansys в соответствии с алгоритмом, представленным в работе [17].

При оптимизации с использованием генетического алгоритма MOGA с числом индивидов начальной популяции, равным 500, и с числом индивидов за итерацию, равным также 500, были применены следующие критерии для оптимизации раскалывания стекла:  $V \rightarrow \max$ ,  $\sigma_y \rightarrow \max$  и при  $T \leq 789$  К.

В таблице 4 представлены результаты проведённой оптимизации (значения параметров, полученные при помощи конечно-элементного расчёта, приведены в скобках).

Таблица 4 – Результаты оптимизации с использованием генетического алгоритма

P1 $V$ , м/с	P2 $P$ , Вт	P3 $A$ , м	P4 $B$ , м	P5 $T_v$ , К	P6 $T$ , К	P7 $\sigma_y$ , МПа
0,03	14	0,003	0,001	533	748 (775)	48 (50)

Применение генетического алгоритма обеспечило максимальную относительную погрешность результатов, не превышающую 4 % при определении температур и при определении термоупругих напряжений.

**Заключение.** Выполненная в работе оптимизация технологических параметров лазерной обработки изделий из силикатного стекла с дополнительным воздействием потока горячего воздуха показывает возможность использования технологии метамоделирования для определения оптимальных технологических режимов лазерного раскалывания, обеспечивая повышение эффективности процесса создания лазерноиндуцированных трещин.

## Литература

1. Nisar, S. Laser glass cutting techniques – A review / S. Nisar // Journal of laser applications. – 2013. – Vol. 25, № 4. – P. 042010–1-11.
2. Laser cutting of ceramic materials with a metallized surface / S. V. Shalupaev, A. V. Maksimenko, V. N. Myshkovets, Y. V. Nikityuk // Journal of Optical Technology. – 2001. – Vol. 68, № 10. – P. 758–760. – DOI : 10.1364/JOT.68.000758.
3. Two-beam laser thermal cleavage of brittle nonmetallic materials / S. V. Shalupaev, E. B. Shershnev, Y. V. Nikityuk, A. A. Sereda // Journal of Optical Technology. – 2006. – Vol. 73, № 5. – P. 356–359. – DOI : 10.1364/JOT.73.000356.

4. Serdyukov, A. N. Features of controlled laser thermal cleavage of crystalline silicon / A. N. Serdyukov, S. V. Shalupaev, Y. V. Nikityuk // *Crystallography Reports*. – 2010. – Vol. 55, № 6. – P. 933-937. – DOI : 10.1134/S1063774510060064.
5. Features of controlled laser thermal cleavage of crystal quartz / A. N. Serdyukov, E. B. Shershnev, Y. V. Nikityuk [et al.] // *Crystallography Reports*. – 2012. – Vol. 57, № 6. – P. 792–797. – DOI : 10.1134/S1063774512060120.
6. Modeling of mechanical influence of double-beam laser on single-crystalline silicon / S. V. Shalupaev, A. N. Serdyukov, Y. V. Nikitjuk [et al.] // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2013. – Vol. 58, № 4. – P. 1381–1385. – DOI : 10.2478/amm-2013-0179.
7. Nikitjuk, Y. V. Laser splitting of bilayer structures made of silicon wafers and glass substrates / Y. V. Nikitjuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. – 2021. – № 6 (129). – P. 178–183.
8. Dual laser beam revising the separation path technology of laser induced thermal-crack propagation for asymmetric linear cutting glass / C. Zhao, H. Zhang, L. Yang [et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 106. – P. 43–55. – DOI : 10.1016/j.ijmachtools.2016.04.005.
9. Research Progress of Thermal Controlled Cracking of Hard-Brittle Plate / H. L. Wang, Y. Wang, H. Z. Zhang, X. W. Wang // *Wuji Cailiao Xuebao*. – 2018. – Vol. 33, № 9. – P. 923–930. – DOI : 10.15541/jim20170546.
10. Способ разделения хрупких неметаллических материалов под действием термоупругих напряжений : пат 10022 Респ. Беларусь, МПК С 03В 33/00 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, А. А. Середва ; заявитель Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – № а 20050697 ; заявл. 11.07.05.
11. Особенности лазерного термораскалывания при совместном воздействии на поверхность материала лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха / С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середва [и др.] // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2009. – № 4-1 (55). – С. 199–203.
12. Jiang P. Surrogate model-based engineering design and optimization / P. Jiang, Q. Zhou, X. Shao. – Singapore : Springer, 2020. – 240 p.
13. 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.
14. Применение искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов для определения параметров обработки кварцевых золь-гель 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.
15. Nikitjuk, Yu. V. Determination of the parameters of two-beam laser splitting of silicate glasses using regression and neural network models / Yu. V. Nikitjuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // *Journal of the Belarusian State University. Physics*. – 2022. – № 1. – P. 35–43. – DOI : 10.33581/2520-2243-2022-1-35-43.
16. Никитюк, Ю. В. Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, И. Ю. Аушев // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2021. – № 4 (49). – С. 21–28. – DOI : 10.54341/20778708\_2021\_4\_49\_21.
17. Nikityuk, Yu. V. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Yu. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // *Journal of Optical Technology*. – 2022. – Vol. 89, № 2. – P. 121–125. – DOI : 10.1364/JOT.89.000121.
18. Nikityuk Yu. V. Parameters optimization of silicate glass two-beam asymmetric laser splitting / Y. V. Nikityuk, A. A. Sereda, A. N. Serdyukov [et al.] // *Opticheskii Zhurnal*. – 2023. – V. 90, № 6. – P. 15–24.
19. Shahani, A. R. Simulation of glass cutting with an impinging hot air jet / A. R. Shahani, M. Seyyedian // *International Journal of Solids and Structures*. – 2004. – Vol. 41. – P. 1313–1329.
20. Никитюк, Ю. В. Исследование процесса управляемого термораскалывания хрупких неметаллических материалов под действием потока горячего воздуха / Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2011. – № 1 (6). – С. 36–39.

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь

Поступила в редакцию 13.07.2023