

УДК 621.791.725

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 12X18H9T КРУГЛЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ

**Ю. В. НИКИТЮК, Г. А. БАЕВИЧ, В. Н. МЫШКОВЕЦ,  
А. В. МАКСИМЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»,  
Республика Беларусь*

**И. Ю. АУШЕВ**

*Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,  
г. Минск*

*Выполнена оптимизация лазерной обработки стали 12X18H9T с использованием генетического алгоритма MOGA, встроенного в модуль DesignXplorer программы ANSYS Workbench. Расчет температурных полей выполнялся методом конечных элементов с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры в программе ANSYS Workbench. С использованием гранично-центрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента была получена регрессионная модель лазерной обработки стали 12X18H9T. В качестве варьируемых факторов использовались плотность мощности лазерного излучения, диаметр лазерного пучка и длительность импульсов лазерного излучения. В качестве откликов использовались максимальные температуры в зоне обработки и глубины проплавления материала. Выполнена оценка влияния параметров обработки на максимальные значения температуры и глубины проплавления материала в зоне лазерного воздействия. Установлено, что на максимальные температуры и глубины проплавления материала наибольшее воздействие оказывает плотность мощности лазерного излучения. Оптимизация лазерной обработки стали 12X18H9T выполнялась при задании предельных значений максимальной температуры в зоне обработки для трех вариантов минимальной глубины проплавления. Проведено сравнение параметров, полученных в результате оптимизации, и параметров, полученных в результате конечно-элементного моделирования. Максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, не превысила 8 % при определении максимальных температур и 10 % при определении максимальных глубин проплавления.*

**Ключевые слова:** лазерная обработка, оптимизация, MOGA, ANSYS.

## OPTIMIZATION OF STEEL PROCESSING PARAMETERS 12KH18N9T ROUND LASER BEAMS

**Y. V. NIKITYUK, G. A. BAEVICH, V. N. MYSHKOVETS,  
A. V. MAKSIMENKO**

*Educational Institution “Francysk Skaryna Gomel State  
University”, the Republic of Belarus*

**I. Y. AUSHEV**

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

*Laser processing of 12X18H9T steel was optimized using the MOGA genetic algorithm built into the DesignXplorer module of the ANSYS Workbench program. The temperature fields were calculated*

*by finite element method taking into account the dependence of thermophysical properties of the material on the temperature in the ANSYS Workbench program. Using a face-centered version of the central compositional design of the experiment, a regression model of laser processing of 12X18H9T steel was obtained. Power density of laser radiation, diameter of laser beam and duration of laser radiation pulses were used as variable factors. As responses, the maximum temperatures in the treatment zone and the depth of penetration of the material were used. The effect of the treatment parameters on the maximum values of the temperature and penetration depth of the material in the laser impact zone was evaluated. It was found that the maximum temperatures and depths of penetration of the material are most affected by the power density of laser radiation. Optimization of laser processing of steel was 12X18H9T performed when setting maximum temperature limits in the treatment area for three variants of minimum penetration depth. Parameters obtained as a result of optimization and parameters obtained as a result of finite element modeling were compared. The maximum relative error of the results obtained using the MOGA algorithm did not exceed 8% in determining the maximum temperatures and 10% in determining the maximum penetration depths.*

**Keywords:** laser processing, optimization, MOGA, ANSYS.

### **Введение**

В настоящее время широко применяется лазерная обработка материалов, при этом использование лазерного излучения более эффективно по сравнению с применением других высокоэнергетических источников энергии. Лазерная обработка обеспечивает локальность физических процессов, протекающих в зоне термического влияния при сохранении физико-механических свойств исходного материала и отсутствии значительных деформаций и напряжений в зоне воздействия [1].

Значительное повышение эффективности применения лазерных технологий может быть обеспечено за счет оптимизации соответствующих технологических параметров. Примеры реализации оптимизации параметров лазерной обработки с использованием, в том числе генетических алгоритмов, приведены в работах [2]–[4]. Генетические алгоритмы обеспечивают поиск лучших решений при помощи наследования и усиления полезных свойств множества объектов в процессе имитации естественного отбора [5], [6]. Одним из эффективных генетических алгоритмов является алгоритм MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) [7].

Температурное поле, формируемое в материале при воздействии лазерного излучения, является основной характеристикой, определение которой обеспечивает возможность оптимизации параметров лазерной обработки. В настоящее время при моделировании процессов лазерной обработки для расчета температурных полей широко применяется комплекс конечно-элементного анализа ANSYS [3], [4], [8]–[11].

В данной работе выполнена оптимизация параметров обработки стали 12X18H9T круглыми лазерными пучками с использованием генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS Workbench.

### **Определение оптимальных параметров лазерной обработки стали 12X18H9T**

Для определения поля температур было выполнено моделирование с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS Workbench [12]. Расчеты проводились для пластин с геометрическими размерами  $2 \times 2 \times 0,5$  мм. При моделировании была сформирована конечно-элементная модель, состоящая из 2120 элементов Solid 90 и 10182 узлов. При создании модели были учтены температурные зависимости теплофизических свойств стали 12X18H9T [13]. Зависимость теплового потока от времени задавалась в виде импульсов прямоугольной формы.

Верификация конечно-элементной модели была выполнена с использованием экспериментальных данных, полученных с применением импульсного YAG:Nd<sup>+3</sup>-лазера, работающего в режиме свободной генерации, и тепловизора ИТ-3СМ. При этом относительная ошибка при определении максимальных температур на поверхности образца не превысила 5 % [11].

Оптимизация параметров лазерной обработки стали 12X18H9T была реализована в модуле DesignXplorer, встроенном в расчетную среду Ansys Workbench в соответствии с последовательностью действий, представленных на рис. 1 [14].

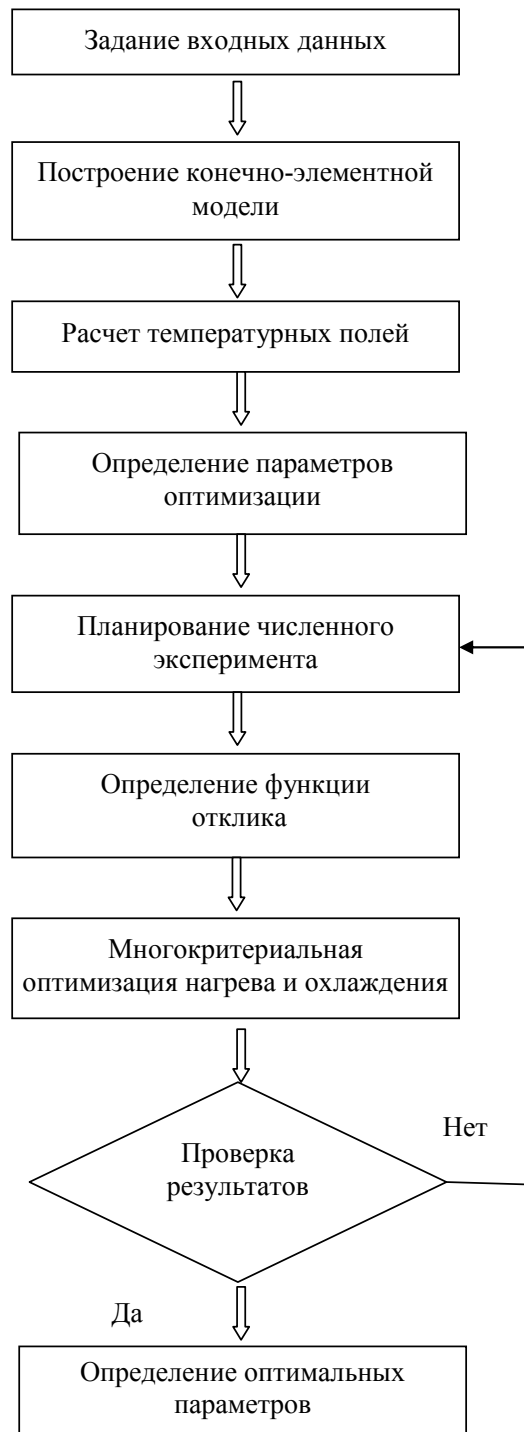


Рис. 1. Алгоритм оптимизации лазерной обработки стали

При моделировании был использован трехфакторный факторно-центрированный вариант центрального композиционного плана эксперимента [15], [16]. В качестве факторов эксперимента использовались плотность мощности лазерного излучения  $P_0$ , диа-

метр лазерного пучка  $D$  и длительность импульсов лазерного излучения  $t$ . В качестве откликов использовались максимальные температуры в зоне обработки  $T$  и глубины проплавления материала  $L$  (табл. 1).

Таблица 1

План эксперимента и результаты расчетов

P1 $P_0, 10^8 \text{ Вт/м}^2$	P2 $D, \text{ мкм}$	P3 $t, \text{ мс}$	P4 $L, \text{ мкм}$	P5 $T, \text{ }^\circ\text{C}$
5,5	300	5,5	68	2414
1	300	5,5	0	592
10	300	5,5	135	4232
5,5	250	5,5	44	2126
5,5	350	5,5	90	2672
5,5	300	1	18	1717
5,5	300	10	84	2571
1	250	1	0	392
10	250	1	50	2779
1	350	1	0	424
10	350	1	162	3118
1	250	10	0	562
10	250	10	125	3914
1	350	10	0	688
10	350	10	198	5084

Моделью объекта исследования являлись функции отклика, связывающие выходные параметры ( $L, T$ ) с факторами ( $V, P, D$ ), которые менялись в заданных пределах при проведении численных экспериментов (табл. 1).

Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$Y_L = -1,287 \cdot 10^1 - 1,193 \cdot 10^{-7} \cdot P_0 + 6,935 \cdot 10^{-10} \cdot P_0 \cdot D + 5,472 \cdot 10^{-9} \cdot P_0 \cdot t;$$

$$L = (Y_L \cdot 0,94 + 1)^{\frac{1}{0,14}} - 1;$$

$$Y_T = 8,015 + 1,039 \cdot 10^{-8} \cdot P_0 + 1,730 \cdot 10^{-1} \cdot t - 5,117 \cdot 10^{-18} \cdot P_0^2 -$$

$$- 2,018 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 + 3,644 \cdot 10^{-12} \cdot P_0 \cdot D + 3,750 \cdot 10^{-11} \cdot P_0 \cdot t + 5,256 \cdot 10^{-4} \cdot D \cdot t;$$

$$T = (Y_T \cdot 0,14 + 1)^{\frac{1}{0,14}} - 1.$$

Значения коэффициентов детерминации для выходных параметров  $L$  и  $T$  принимают значения, равные 0,9759 и 0,9992 соответственно, что можно интерпретировать как наличие необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного моделирования.

Была проведена оценка влияния входных параметров на выходные параметры. На максимальные температуры в зоне обработки  $T$  и глубины проплавления материала  $L$  влияют все факторы эксперимента, при этом наибольшее воздействие оказывает плотность мощности лазерного излучения  $P_0$  (рис. 2).

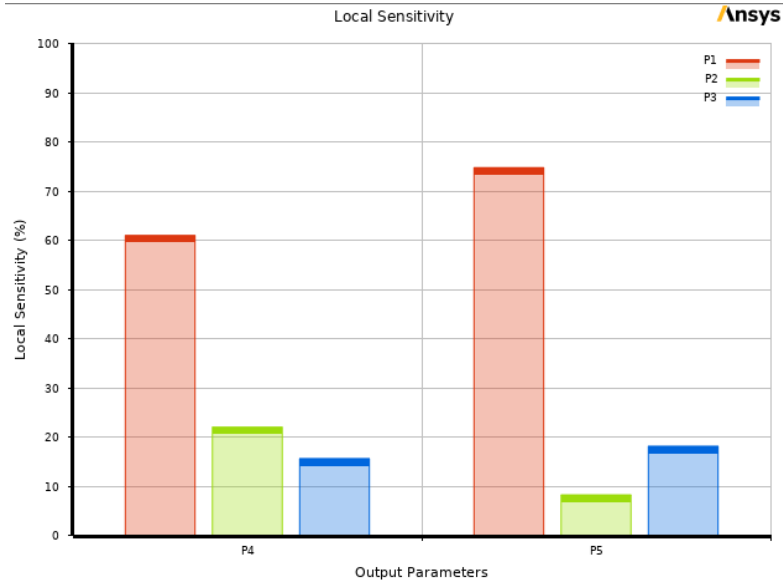


Рис. 2. Диаграмма чувствительности оптимизируемых параметров  
P1 –  $P_0$ , P2 –  $D$ , P3 –  $t$ , P4 –  $L$ , P5 –  $T$

На рис. 3 и 4 представлены зависимости максимальной температуры в зоне обработки  $T$  и глубины проплавления материала  $L$  от плотности мощности лазерного излучения  $P_0$ , диаметра лазерного пучка  $D$  и длительности импульсов лазерного излучения  $t$ .

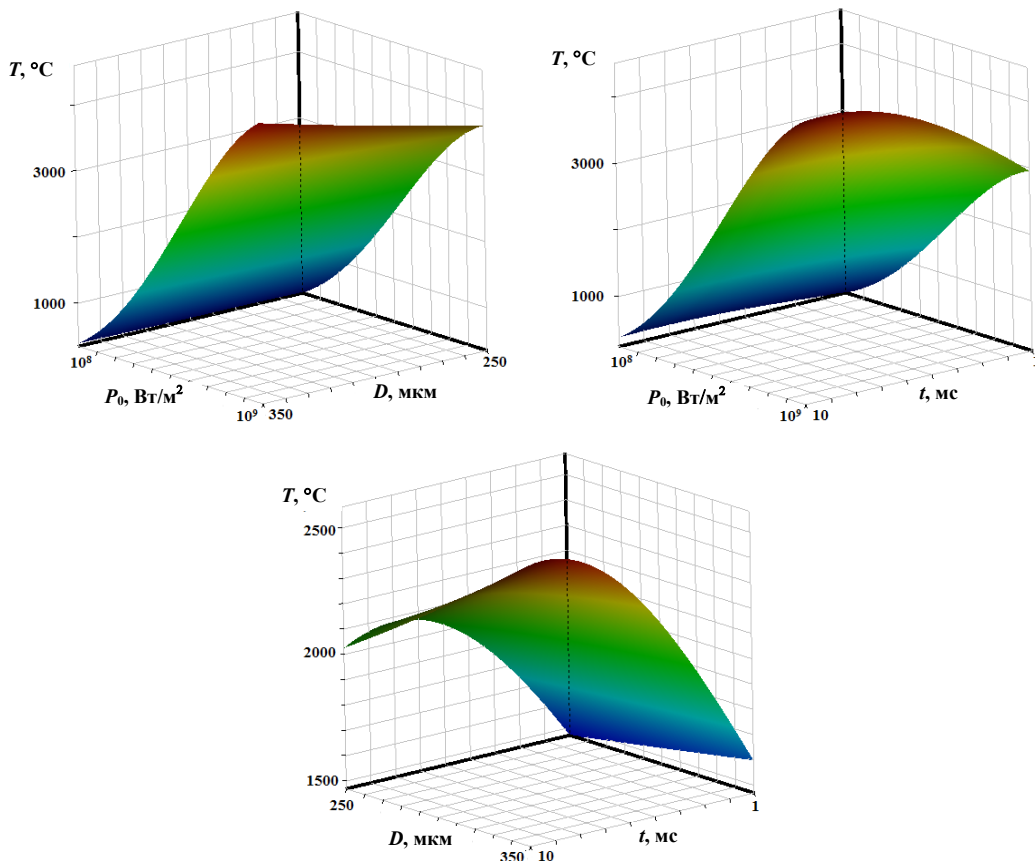


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры  $T$  от параметров обработки

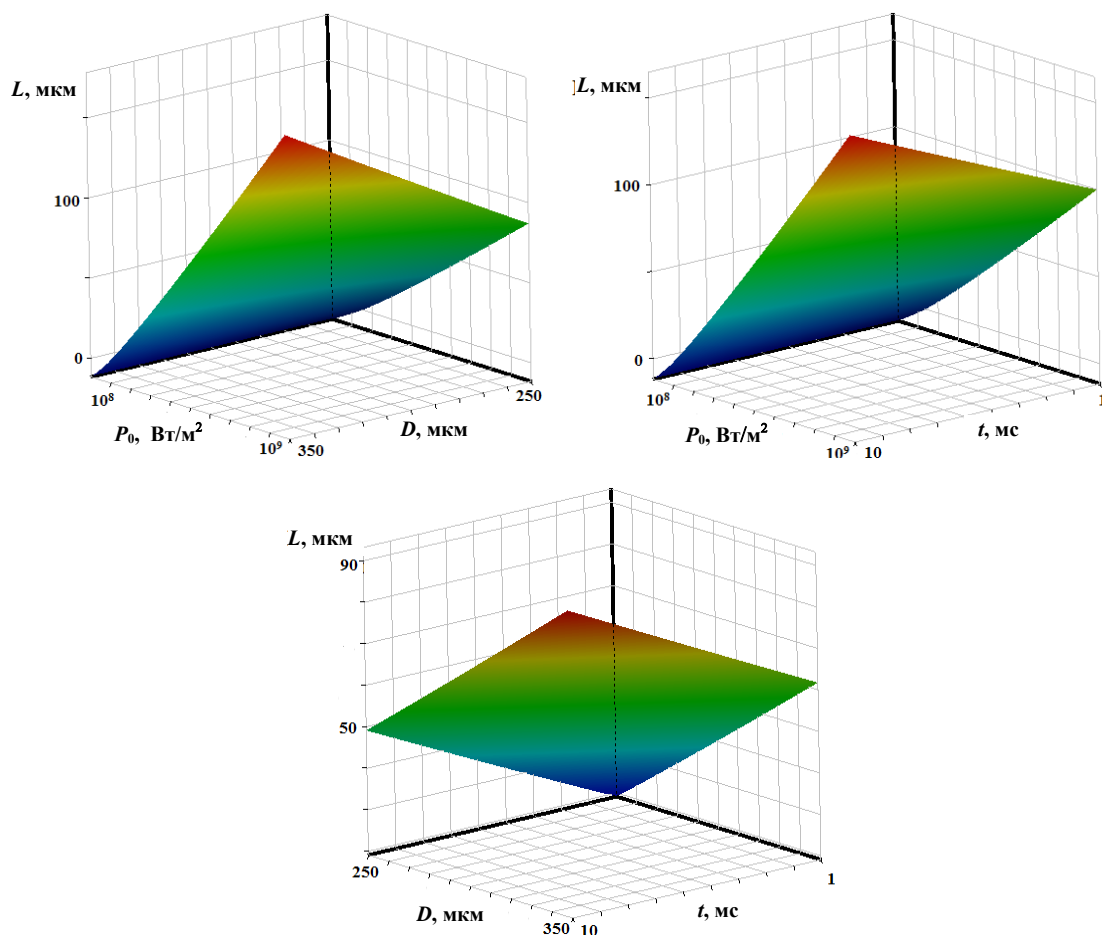


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления материала  $L$  от параметров обработки

При проведении оптимизации использовался многокритериальный генетический алгоритм MOGA, встроенный в модуль DesignXplorer программы ANSYS Workbench с числом индивидов начальной популяции, равным 100, и числом индивидов за итерацию, равным 100. Оптимизация лазерной обработки стали 12X18H9T выполнялась при задании предельных значений максимальной температуры в зоне обработки для трех вариантов минимальной глубины проплавления  $L$ : 50, 70 и 90 мкм (табл. 2). В скобках приведены значения параметров, полученные в результате конечно-элементного расчета, при этом максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, не превысила 8 % при определении максимальных температур и 10 % при определении максимальных глубин проплавления.

Таблица 2

#### Результаты оптимизации

P1 $P_0, 10^8 \text{ Вт/м}^2$	P2 $D, \text{ мкм}$	P3 $t, \text{ мс}$	P4 $L, \text{ мкм}$	P5 $T, \text{ }^\circ\text{C}$
4,5	315	4,5	50 (46)	1847 (2010)
5,8	297	6,5	70 (72)	2627 (2495)
6,0	343	4,8	90 (91)	2732 (2818)

### Заключение

Показана возможность оптимизация параметров лазерной обработки стали 12X18H9T с использованием генетического алгоритма MOGA, встроенного в модуль DesignXplorer программы ANSYS Workbench. В результате многокритериальной оптимизации определены наборы параметров, использование которых на практике обеспечит эффективную реализацию процесса обработки стали 12X18H9T круглыми лазерными пучками.

### Литература

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Бессмельцев, В. П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–21.
3. Parandoush, P. A review of modeling and simulation of laser beam machining / P. Parandoush, A. Hossain // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – Vol. 85. – P. 135–145.
4. Nikityuk, Y. V. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Y. V. Ni-kityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // J. Opt. Technol. – 2022. – Vol. 89. – P. 121–125.
5. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.
6. Красновская, С. В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С. В. Красновская, В. В. Напрасников // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхн. навук. – 2016. – № 2. – С. 92–98.
7. Fonseca, C. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization / C. Fonseca, P. Flemingz // In Proceedings of The 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1993. – P. 416–423.
8. Термоупругие поля в твердых телах при их обработке лазерными пучками специальной геометрии / Б. В. Бокуть [и др.]. – Минск, 1987. – 59 с. – (Препринт/Ин-т физики АН БССР).
9. Баевич, Г. А. Динамика формирования термических циклов при импульсной лазерной сварке и наплавке высокопрочных конструкционных сталей / Г. А. Баевич, А. В. Максименко, В. Н. Мышковец // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2016. – № 1. – С. 38–44.
10. 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. – Vol. 1. – P. 35–43.
11. Применение метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей для определения параметров лазерной обработки стали 12X18H9T / Ю. В. Никитюк [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2022. – № 1. – С. 48–55.
12. Ansys.com – Официальный сайт компании ANSYS.
13. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах : справочник / В. Е. Зиновьев. – М. : Metallurgia, 1989. – 384 с.

14. Multi-Objective Optimization of Microstructure of Gravure Cell Based on Response Surface Method / S. Wu [at al.] // Processes. – 2021. – Vol. 9, № 2. – P. 1–15.
15. Моргунов, А. П. Планирование и анализ результатов эксперимента: учеб. пособие / А. П. Моргунов, И. В. Ревина ; М-во образования России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – 343 с.
16. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.

*Получено 07.06.2022 г.*