



Исследование параметров лазерной резки мягких и твердых пород древесины с использованием авторской экспериментальной установки на основе углекислотного лазера

Алексей А. Талых ✉, ata_77@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-3750-2608>

Олег В. Спиринов, olspirin@petsu.ru,  <https://orcid.org/0009-0005-8306-5436>

Владимир П. Чугин, chuginvp@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0006-5959-3754>

Владимир С. Сюнев, siounev@petsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

Разработанная и изготовленная авторами конструкция экспериментальной установки на основе углекислотного лазера предназначена для изучения процессов и параметров лазерной обработки древесины, связанных с выявлением наиболее эффективных режимов резания для различных пород древесины, определения влияния плотности, твердости, текстуры и других отличительных признаков и свойств мягких и твердых пород древесины на качество и энергозатраты при обработке лазером. Одним из ключевых параметров лазерной обработки является скорость сквозного реза, которая определялась для образцов шириной и длиной по 40 мм и толщиной 4-8 мм с шагом толщин 1мм следующих пород: ель, сосна, берёза, дуб, клён, осина. Значения скоростей находились путём вычисления отношения толщины образца к среднему времени выполнения реза. С целью изучения влияния лазерного излучения на химический состав древесины исследовалась динамика элементного состава образцов различных пород древесины в зависимости от полученной дозы излучения от углекислотного лазера посредством растрового электронного микроскопа. Примерные энергозатраты при лазерной резке оценивались по формуле, включающую полученные в ходе экспериментальной работы параметры: длина реза, диаметр отверстия, мощность лазера, коэффициент полезного действия лазера и время сквозного реза. Результаты проведенного исследования показали, что наиболее высокие скорости резания наблюдались у мягких пород древесины с невысокой плотностью (ель, сосна, осина) в отличие от твердых (берёза, дуб, клён). По мере увеличения дозы облучения для всех представленных пород изменяется процентное содержание углерода и кислорода в сторону увеличения первого и уменьшения второго. Наибольшие энергозатраты были зафиксированы при обработке клёна (0,0009 кВт*ч). У мягких пород древесины определены значительно меньшие (примерно в 2 раза) значения энергозатрат (0,0004-0,0005 кВт*ч). Проведённые исследования показали, что соответствующая корректировка режимов резания углекислотным лазером может стать средством целенаправленного изменения химического состава древесины, энергозатрат и качества её обработки в соответствии с современными технологическими требованиями.

Ключевые слова: *лазер, углекислотный лазер, древесина, лазерная обработка древесины, карбонизация, режимы резания*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исследование параметров лазерной резки мягких и твердых пород древесины с использованием авторской экспериментальной установки на основе углекислотного лазера / А. А. Талых, О. В. Спиринов, В. П. Чугин, В. С. Сютнев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 4 (56). – С. 208–221. – Библиогр.: с. 218–220 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/14>.

Поступила 07.10.2024. *Пересмотрена* 11.11. 2024. *Принята* 18.12.2024. *Опубликована онлайн* 27.12.2024.

Article

Study of parameters of laser cutting of soft and hard wood species using the author's experimental setup based on a carbon dioxide laser

Aleksey A. Talykh ✉, ata_77@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-3750-2608>

Oleg V. Spirin, olspirin@petsu.ru,  <https://orcid.org/0009-0005-8306-5436>

Vladimir P. Chugin, chuginvp@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0006-5959-3754>

Vladimir S. Syunev, siunev@petsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

Petrozavodsk State University, 33, prosp. Lenina, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

Abstract

The experimental setup based on a carbon dioxide laser, developed and manufactured by the authors, is intended to study the processes and parameters of laser processing of wood related to identifying the most effective cutting modes for various wood species, determining the effect of density, hardness, texture and other distinctive features and properties of soft and hard wood species on the quality and energy consumption during laser processing. One of the key parameters of laser processing is the through-cut speed, which was determined for samples 40 mm wide and long and 4-8 mm thick with a thickness step of 1 mm for the following species: spruce, pine, birch, oak, maple, aspen. The speed values were found by calculating the ratio of the sample thickness to the average cutting time. In order to study the effect of laser radiation on the chemical composition of wood, the dynamics of the elemental composition of samples of various wood species was investigated depending on the received radiation dose from a carbon dioxide laser using a scanning electron microscope. Approximate energy consumption during laser cutting was estimated using a formula that included the parameters obtained during the experimental work: cutting length, hole diameter, laser power, laser efficiency, and through-cut time. The results of the study showed that the highest cutting speeds were observed for soft wood species with low density (spruce, pine, aspen), as opposed to hard wood species (birch, oak, maple). As the radiation dose increases for all the presented species, the percentage content of carbon and oxygen changes towards an increase in the former and a decrease in the latter. The highest energy consumption was recorded during maple processing (0.0009 kW*h). For soft wood species, significantly lower (approximately 2 times) energy consumption values were determined (0.0004-0.0005 kW*h). The conducted studies have shown that the corresponding adjustment of the cutting modes with a carbon dioxide laser can become a means of targeted change of the chemical composition of wood, energy consumption and the quality of its processing in accordance with modern technological requirements.

Keywords: *laser, carbon dioxide laser, wood, laser processing of wood, cutting modes*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: author thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

For citation: Talykh A. A., Spirin O. V., Chugin V. P., Syunev V. S. (2024). Study of parameters of laser cutting of soft and hard wood species using the author's experimental setup based on a carbon dioxide laser. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 4(56), pp. 208-221 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/14>.

Received 07.10.2024. *Revised* 11.11.2024. *Accepted* 18.12.2024. *Published online* 27.12.2024.

Введение

Древесина – универсальный натуральный материал, обладающий рядом положительных свойств: высокой прочностью при небольшом весе, хорошими теплоизоляционными свойствами, сопротивляемостью воздействию кислот и газов, экологичностью, возможностью быстрого соединения деталей из древесины и др. Однако, древесина, как материал, имеет и недостатки: гигроскопичность; анизотропность; пожароопасность; склонность к растрескиванию, короблению, гниению, поражению грибками и микроорганизмами. Кроме этого, древесное сырьё может иметь ряд природных дефектов, а также повреждения, полученные в ходе её заготовки [1,2]. Все эти особенности необходимо учитывать при обработке древесины.

Современные технологии позволяют эффективно обрабатывать все виды древесины и древесных материалов с целью получения качественных продуктов с высокой добавленной стоимостью. Среди подобного рода технологий можно выделить бесстружечную обработку высоко концентрированной энергией лазерного луча (лазерная обработка).

Технология обработки материалов лазерным излучением широко используется при резке и поверхностной обработке металлических и неметаллических материалов, в том числе древесины и древесных материалов [3-7].

Безусловными преимуществами лазерной обработки являются точность, универсальность, высокая производительность. Среди недостатков лазерного деления древесины выделяют большую энергоёмкость, ограниченность возможности выполнения реза больших глубин и невысокие скорости подачи [6].

Также лазерные технологии позволяют имитировать на поверхности древесины резьбу, в том

числе, объёмную, рельефную [6,8]. До сих пор режимы лазерного гравирования не достаточно изучены.

В настоящее время значительное внимание уделяется изучению характеристик поверхностей, обработанных углекислотными лазерами, с целью целенаправленного изменения структуры и свойств древесины [3-5].

По результатам исследований С. Yang и др. (2019) [9], J. Kúdela и др. (2019) [10], A. Lungu и др. (2022) [11] спектроскопии и газовой хроматографии определено, что облучение древесины углекислотным лазером вызывает уменьшение количества полисахаридов в зависимости от количества подводимой энергии. Деграция коснулась, в первую очередь, гемицеллюлозы и некоторой части аморфной целлюлозы. Заметны изменения и в структуре лигнина.

Микроскопические наблюдения J. Kúdela и др. (2022) [12] показывают, что обработка древесины лазерным лучом может уменьшить шероховатость обработанной поверхности древесины за счёт расплавления клеток на глубину нескольких микрометров, но без карбонизации. И, наоборот, путём увеличения мощности и плотности лазерного излучения наблюдается существенное увеличение параметров шероховатости поверхности. Для гравированных поверхностей из древесины было подтверждено важное влияние всех параметров лазера (мощности, скорости движения лазерной головки, плотности раstra и др.) на шероховатость, как отдельных пород древесины, так и анатомического направления волокон.

Обработка древесины лазерным лучом оказывает влияние и на смачиваемости древесины различными жидкостями. Значение угла смачиваемости является важным показателем для прогнозирования адгезии клеев и лакокрасочных покрытий к поверх-

ности древесины. Химические изменения в структуре древесины приводят также к изменению её цвета. Эти изменения связаны разрывом связей в хромофорных структурах, отвечающих за цвет древесины [9-12].

Проведённый анализ опубликованных результатов работ, указывает на то, что энергия, поглощённая поверхностью при обработке углекислотным лазером, вызывает химические изменения и влияет на свойства древесины (цвет, смачиваемость и др.). Эту энергию можно устанавливать и контролировать с помощью изменения мощности лазера, скорости движения лазерной головки, фокусного расстояния. Помимо количества подводимой энергии и её концентрации, толщина зоны термического влияния также зависит и от породы древесины [9-15].

Таким образом, результаты ранее проведённых исследований показывают, что соответствующая корректировка режимов резания углекислотным лазером может стать средством целенаправленной модификации поверхности древесины в соответствии с современными технологическими требованиями.

Экспериментальные исследования, проведённые I. Kubovský и др. (2020) [3], S. Nath и др. (2020) [4], Е.С. Шараповым (2019) [7] показали, что к основным факторам, влияющим на эффективность лазерной обработки древесины, относят: 1) Параметры лазера (мощность, режим работы, частота повторений импульсов и их длительность и др.); 2) Режимы резания (скорость подачи, глубина реза, фокусное расстояние линзы, фокусировка и др.); 3) Свойства древесины (твёрдость, плотность, влажность и пр.).

Также определено, что при использовании одинаковых режимов резания для разных пород древесины и различных древесных материалов происходит перерасход энергии, времени. При этом может снижаться качество продукции [3,6]. В результате использования режимов обработки без учёта породы и свойств древесины обработка лазером происходит либо не полностью, или, наоборот, возникает сильный пережог материала, обугливание и даже воспламенение кромок реза [3,4,7].

В этой связи нами проведено исследование по выбору и обоснованию оптимальных режимов резания для отдельных пород древесины: сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H.Karst.), берёзы (*Betula* L.), клёна (*Acer* L.), дуба (*Quercus* L.), осины (*Populus tremula* L.). Представленные породы широко используются при изготовлении изделий специального назначения. Например, ель (*P. abies*), сосна (*P. sylvestris*), клён (*Acer*) подходят для изготовления корпусов и дек струнных музыкальных инструментов [16,17]. Древесина берёзы (*Betula*), осины (*P. tremula*), дуба (*Quercus*) может применяться в изделиях сувенирной продукции и пр. [18].

Целью исследования является определение основных параметров (скорости сквозного реза и энергозатрат) лазерной резки, а также изменений химического состава при лазерном облучении древесины некоторых мягких и твёрдых пород с помощью авторской экспериментальной установки на основе углекислотного лазера.

В ходе проведения исследования и интерпретации полученных результатов решались следующие основные задачи:

1. Выполнить проектирование и изготовление авторской экспериментальной установки на основе углекислотного лазера.
2. С помощью экспериментальной установки определить скорости сквозного реза при лазерной обработке образцов отдельных твёрдых и мягких пород древесины.
3. В образцах из древесины различных пород определить зависимости изменения процентного содержания кислорода и углерода от дозы лазерного излучения.
4. Выполнить измерения диаметров отверстий, полученных в результате лазерной резки, и проанализировать их возможные отклонения от заданных параметров.
5. Определить примерное время и энергозатраты при лазерной резке древесных образцов.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Объектом исследования выступает авторская экспериментальная установка на основе углекислотного лазера.

Предметом исследования является изучение процессов лазерной обработки древесины сосны (*P. sylvestris*), ели (*P. abies*), берёзы (*Betula*), клёна (*Acer*), дуба (*Quercus*), осины (*P. tremula*), связанных с определением параметров резки на экспериментальной установке.

Дизайн эксперимента

Для изучения режимов резания вышеперечисленных пород древесины нами была разработана экспериментальная установка на основе CO₂ лазера. На рис. 1 представлена принципиальная схема установки, а на рис. 2 её общий вид.

Данная установка (рис. 1) состоит из отпаянной разрядной трубки 1 марки ГЛ-501 с германиевым окном 2 под углом Брюстера и выходного водоохлаждаемого германиевого зеркала 4, которое закреплено на юстировочном механизме. Линза 5 из селенида цинка с фокусным расстоянием 100 мм фокусирует лазерный луч на исследуемый образец 6.

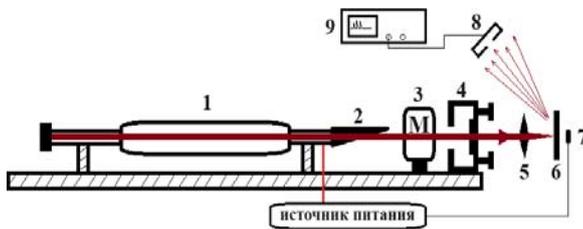


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки на основе CO₂ лазера

Figure 1 - Scheme of experimental setup based on CO₂ laser

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

1 - разрядная трубка, 2 - германиевое окно, 3 - модулятор добротности, 4 - германиевое зеркало, 5 - линза, 6 - исследуемый образец, 7 - термопара, 8 - пироэлектрический приёмник, 9 – осциллограф

1 - discharge tube, 2 - germanium window, 3 - Q-modulator, 4 - germanium mirror, 5 - lens, 6 - test sample, 7 - thermocouple, 8 - pyroelectric receiver, 9 - oscilloscope

Лазерная трубка охлаждается холодной водой от центральной системы водоснабжения. Конструкция позволяет регулировать расстояние от линзы до выходного зеркала, меняя тем самым параметры перетяжки.

Внутри резонатора размещён модулятор добротности 3, что позволяет провести исследования влияния серий лазерных импульсов повышенной мощности на процесс обработки образца.

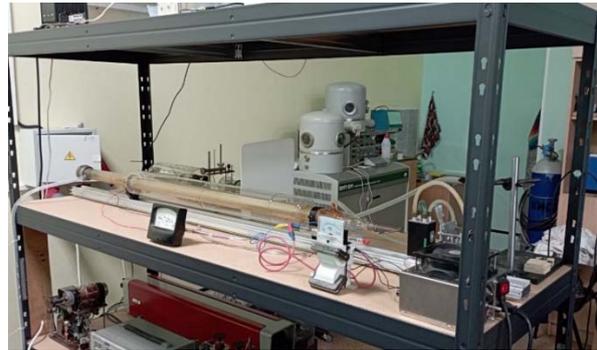


Рисунок 2 - Общий вид экспериментальной установки на основе CO₂ лазера

Figure 2 - General view of the experimental setup based on CO₂ laser

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Пироэлектрический приёмник 8 марки МГ-30А (рис. 3 (справа)) необходим для оценки относительной амплитуды импульсов рассеянного излучения при частоте модуляции до 30кГц. Цифровой осциллограф 9 принимает сигнал с МГ-30А и визуализирует его.

Образцы древесины, изготовленные для проведения исследования, представляют собой бруски шириной и длиной по 40 мм и толщиной 4-8 мм с шагом толщин 1 мм следующих пород: сосны (*P. sylvestris*), ели (*P. abies*), берёзы (*Betula*), клёна (*Acer*), дуба (*Quercus*), осины (*P. tremula*). Древесина образцов без видимых пороков.

С целью измерения скорости сквозного реза образцов из древесины используется реле времени, которое начинает отсчёт с момента запуска лазера и заканчивает в момент окончания реза, когда поступит сигнал с термопары 7. Реле фиксирует интервал времени с одновременным отключением источника питания лазера.

Кроме этого, в блоке управления реле времени предусмотрен режим «экспозиция», позволяющий регулировать интервал времени включения лазера от 0 до 2000 миллисекунд, и тем самым, изменять дозу облучения образцов в широких пределах, независимо от сигнала с термодатчика.

Скорость сквозного реза определялась путём вычисления отношения толщины образца к среднему времени выполнения реза. Динамика элементного состава образцов различных пород древесины в зависимости от полученной дозы D излучения от CO_2 лазера исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа с использованием специального программного обеспечения.

Мощность излучения лазера 10 Вт (измерялась по калориметру ИМО-2Н), средняя площадь пучка $0,25\text{см}^2$ (в режим TEM01 моды). Время экспонирования, определяющее дозу облучения, выставлялось на самодельной приставке-контроллере и уточнялось по длительности сигнала пирозлектрического датчика МГ-30А на осциллографе UTD 2025С (рис. 3).

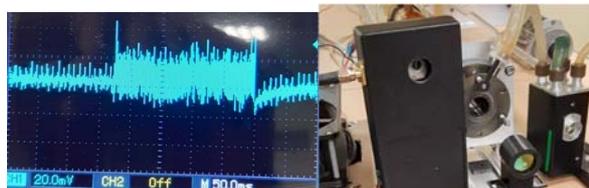


Рисунок 3 - Пример сигнала (слева) с датчика МГ-30А (справа) для контроля времени облучения
 Figure 3 - Example of a signal (left) from the MG-30 sensor (right) for monitoring the irradiation time
 Источник: Собственная композиция авторов
 Source: authors' composition

Поскольку слабо проводящие поверхности под действием электронного пучка накапливают отрицательный заряд, отталкивающий пучок электронов, была проведена специальная подготовка образцов. На каждый образец древесины в качестве антистатического и химически нейтрального покрытия напылялся тонкий слой золота, который посредством проводящей клеевой плёнки соединялся с заземлённым корпусом микроскопа. Для этой цели ис-

пользовалась магнетронная распылительная установка 108Auto (рис. 4), образцы в которой помещались на расстоянии полутора сантиметра от мишени.

Посредством растрового электронного микроскопа (РЭМ) SU1510 (Hitachi) нами исследована динамика элементного состава образцов различных пород древесины в зависимости от полученной дозы D излучения от CO_2 лазера. Дозы облучения составляли соответственно 5, 10, 15 и 20 Дж/см².



Рисунок 4 - Магнетронная распылительная установка

Figure 4 - Magnetron sputtering system
 Источник: Собственная композиция авторов
 Source: authors' composition

Их расчёт выполнялся по формуле (1):

$$D = \frac{P_{изл} t}{S} \quad (1)$$

где $P_{изл}$ - мощность излучения лазера, Вт
 t - время экспонирования, с
 S - площадь пучка, м²

Анализ интенсивности возбуждаемых характеристических рентгеновских линий образцов производился посредством модуля дисперсионной рентгеновской спектроскопии фирмы «Thermo scientific», встроенного в электронный микроскоп. Во всех измерениях рентгеновский спектр возбуждался пучком электронов энергией 30 КэВ (при этом, изображение, принимаемое детекторами вторичных или отраженных электронов, может быть увеличено в 300 000 раз).

Управление электронным микроскопом осуществлялось программой PC_SEM. Все данные о массовых долях анализируемых элементов и изображения могут быть выведены на монитор персонального компьютера, сохранены или выведены на USB-накопитель при задании в программном обеспече-

нии системы. Пересчёт интенсивностей характеристических рентгеновских линий $K\alpha$ углерода и кислорода в соответствующие концентрации произведены методом коррекции Proza (Phi-Ro-Z). В этом случае рассчитывается распределение по глубине рентгеновских лучей, эмитируемых образцом.

Однако, в программе PC_SEM доступны ещё два метода коррекции: ZAF (корректирует интенсивность пиков по среднему атомному номеру Z, абсорбции A, флуоресценции F); Клифф-Лоример без абсорбции (обеспечивает матричную коррекцию для биологически тонких срезов, основанную на относительном элементном факторе K (фактор Клифф-Лоримера)). Данная коррекция предполагает, что абсорбция вторичного излучения отсутствует.

Информация об изображениях поверхностей обработанных образцов принималась с детектора вторичных электронов, так как вторичные электроны (выбитые из образца первичным пучком электронов) имеют малую энергию и поэтому, встретив мельчайшее препятствие, поглощаются последними. Таким образом, сигнал вторичных электронов очень чувствителен к морфологии поверхности, чем достигается хороший контраст изображения.

Анализ данных

Расшифровка элементного состава образцов проводилась с помощью программного приложения PC_SEM к электронному микроскопу. Анализ экспериментальных данных производился с помощью пакета прикладных программ Microsoft Excel 2010.

Результаты

По результатам экспериментальных измерений построены графики скоростей сквозного реза в зависимости от толщины образцов, которые представлены на рис. 5.

Достоверность аппроксимации полиномами 3 степени зависимостей скоростей реза представленных пород от их толщины составила: ель (*P. abies*) - ($R^2=0,369$), сосна (*P. sylvestris*) - ($R^2=0,81$), осина (*P. Tremula*) - ($R^2=0,99$), берёза (*Betula*) - ($R^2=0,99$), клён (*Acer*) - ($R^2=0,91$), дуб (*Quercus*) - ($R^2=0,72$).

Результаты проведённого исследования показали, что наиболее высокие скорости резания

наблюдались у мягких пород древесины с невысокой плотностью (ель (*P. abies*), сосна (*P. sylvestris*), осина (*P. tremula*)) в отличие от твёрдых (берёза (*Betula*), дуб (*Quercus*), клён (*Acer*)). Поэтому такие показатели, как плотность и твёрдость древесины необходимо учитывать, в первую очередь, при назначении режимов лазерной резки.

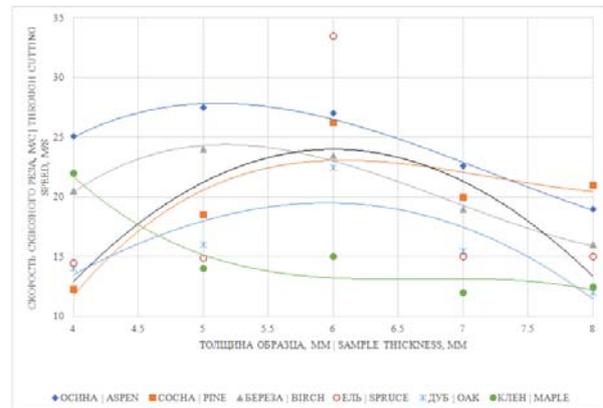


Рисунок 5 - Скорость сквозного реза образцов из берёзы, дуба, клёна, осины, ели и сосны в зависимости от толщины древесины
Figure 5 - Speed of through cutting of samples from birch, oak, maple, aspen, spruce and pine depending on the thickness of the wood

Источник: Собственная композиция авторов
Source: authors' composition

У твёрдых пород древесины при визуальном осмотре качество сквозного реза оказалось значительно выше, чем у мягких. Также определено, что чем толще образцы и твёрже древесина, тем темнее кромки реза.

Скорость лазерного резания различных пород древесины и соответствующие энергозатраты зависят не только от исходных физических свойств различных пород древесины, но и от изменений, происходящих внутри самого материала во время лазерной обработки. Поверхность древесины, обработанная лазером, демонстрирует изменения в своём химическом составе и структуре, что впоследствии отражается на изменениях морфологии, цвета и смачиваемости жидкостями [12, 19-21].

Кроме этого, лазерная резка таких пород древесины как определённые сорта красного дерева (*Pterocarpus santalinus* L.f.) затруднена или попросту невозможна из-за сильной карбонизации. В этом

случае интенсивное образование аморфного углерода на поверхности приводит к значительному отражению мощности излучения лазера и увеличению теплопроводности в окрестности точки падения луча, приводящей к дальнейшему распространению тепла по поверхности с сопутствующей карбонизацией. Потока энергии, идущего внутрь образца, не достаёт для сублимации вещества древесины, а за счёт сильного поверхностного нагрева усиливается процесс карбонизации, и в определенный момент происходит воспламенение.

На рис. 6 для сравнения приведены диаграммы интенсивностей возбуждаемых характеристических рентгеновских линий образцов красного дерева (*P. santalinus* L.f.) и осины (*P. tremula*).

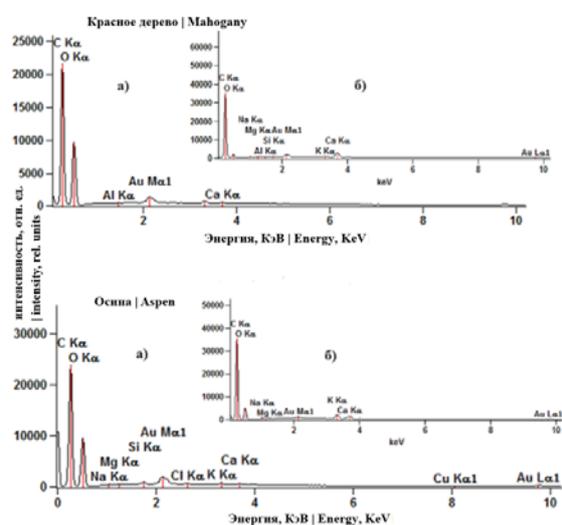


Рисунок 6 - Интенсивности возбуждаемых характеристических рентгеновских линий образцов красного дерева (верхняя рентгенограмма) и осины (нижняя рентгенограмма): а) с части поверхности, не подвергшейся воздействию лазера; б) с поверхности, облученной дозой 20 Дж/см²

Источник: Собственная композиция авторов
Source: authors' composition

На рентгенограммах, кроме линий, соответствующих наиболее интенсивным переходам для содержащихся в древесине веществ, можно увидеть дополнительные линии от других элементов, содержание которых в исследуемом веществе вызывает

сомнение (кроме золота). Вероятной причиной такого явления является попадание части электронов с пучка на стенки камеры электронного микроскопа.

В табл. 1, приведённой ниже, представлены показатели процентного состава углерода и кислорода для древесины некоторых пород в зависимости от дозы лазерного излучения, рассчитанные по рентгеновским спектрам.

Таблица 1

Изменение процентного состава углерода и кислорода для древесины некоторых пород (сосна, клён, берёза, дуб, ель, осина, красное дерево) в зависимости от дозы лазерного излучения, рассчитанные по рентгеновским спектрам

Table 1

Change in the percentage composition of carbon and oxygen for wood of some species (pine, maple, birch, oak, spruce, aspen, mahogany) depending on the dose of laser radiation, calculated from X-ray spectra

Доза облучения radiation dose D, Дж/см ²	Сосна Pine		Клен Maple	
	C, %	O, %	C, %	O, %
0	53.92	44.81	51.05	48.31
5	58.82	39.68	52.58	46.82
10	59.94	38.72	53.98	45.09
15	60.21	38.19	55.88	43.29
20	62.33	36.35	63.15	35.80
	Береза Birch		Дуб Oak	
0	50.48	48.68	51.13	48.39
5	50.79	48.39	51.95	47.40
10	57.02	41.56	55.13	44.30
15	63.69	34.47	56.31	43.02
20	72.63	24.29	63.76	35.24
	Ель Spruce		Осина Aspen	
0	51.14	47.94	51.77	47.48
5	54.88	44.3	52.78	46.05
10	59.54	39.5	56.73	42.22
15	61.79	37.29	62.07	36.62
20	64.34	34.73	66.1	32.38
	Красное дерево Mahogany			
0	49.91	49.78		
5	53.66	45.36		
10	62.29	35.96		
15	72.5	24.95		
20	79.72	17.55		

Источник: эмпирические данные, полученные авторами | Source: empirical data obtained by the authors

В результате проведённого исследования можно сделать вывод, что по мере увеличения дозы облучения меняется взаимное процентное содержание углерода и кислорода, причём для красного дерева сильнее всего.

С увеличением дозы облучения для всех пород, представленных в табл. 1, увеличивается процент содержания углерода. Увеличение углерода для мягких пород древесины составило: для сосны (*P. sylvestris*) - (8,41 %), ели (*P. abies*) - (13,2 %), осины (*P. tremula*) - (14,33 %). Соответственно для твёрдых пород: клёна (*Acer*) - (12,1 %), дуба (*Quercus*) - (12,63 %), берёзы (*Betula*) - (22,15 %). Наибольший прирост (29,81 %) наблюдается именно у красного дерева (*P. santalinus* L.f.), что подтверждает отмеченное выше наличие явления карбонизации.

Что касается кислорода, то здесь наблюдается обратная тенденция: при увеличении дозы облучения процент содержания кислорода снижается. Наибольшее уменьшение состава кислорода коснулось образца, изготовленного из древесины красного дерева (*P. santalinus* L.f.).

По увеличенному изображению участка поверхности были измерены диаметры выполненных лазером отверстий (рис. 7).

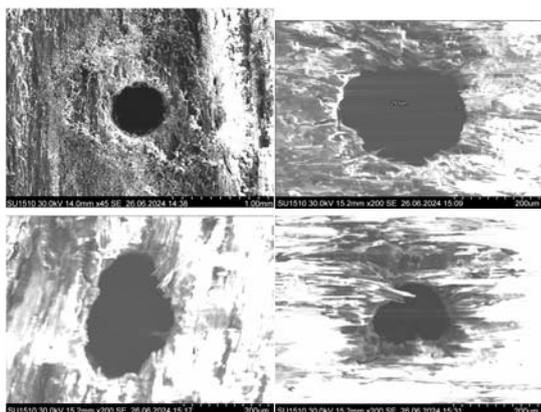


Рисунок 7 - Вид отверстий, проделанных в фокальной перетяжке пучка CO₂ лазера (увеличение x45 на первом и x200 на остальных)
Figure 7 - View of holes made in the focal constriction of the CO₂ laser beam (magnification x45 on the first and x200 on the others)

Источник: Собственная композиция авторов
Source: authors' composition

Отличие от расчётного значения из формулы для перетяжки пучка (0,1 мкм) в том, что за счёт процессов выноса плазмы и теплопроводности реальные размеры несколько выше, в среднем на 0,2-0,3 мкм для всех пород древесины.

Зная время сквозного реза τ и диаметр отверстия d , можно оценить время реза длиной L для образца фиксированной толщины по формуле (2):

$$t = \frac{\tau L}{d} \quad (2)$$

где τ - время сквозного реза, с

L - длина реза, м

d - диаметр отверстия, м

Отсюда скорость поперечного реза определяется по формуле (3):

$$v = \frac{L}{t} = \quad (3)$$

Энергозатраты приблизительно можно оценить, зная длину реза L , диаметр отверстия d , мощность лазера P , КПД η и время сквозного реза τ по формуле (4):

$$W = \frac{P\tau L \cdot 2.78 \cdot 10^{-7}}{d\eta} \quad (4)$$

где W - энергозатраты, кВт*час

P - мощность лазерного излучения, Вт

η - коэффициент полезного действия.

Таблица 2

Энергозатраты и скорости поперечного реза для образцов из дуба, клёна, сосны, осины, берёзы, ели толщиной 6 мм

Table 2

Energy consumption and cross-cutting speeds for samples of oak, maple, pine, aspen, birch, spruce with a thickness of 6 mm

Порода species	τ , мс	t , с (метра)	v , м/с	W , кВт*час
Дуб Oak	260	43	0.023	0.0006
Клен Maple	400	67	0.015	0.0009
Сосна Pine	230	38	0.026	0.0005
Осина Aspen	220	37	0.027	0.0005
Береза Birch	250	42	0.024	0.0006
Ель Spruce	180	7	0.033	0.0004

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Authors' calculations

В табл. 2 представлены данные по энергозатратам и скорости поперечного реза для образцов толщиной 6 мм.

Анализируя полученные в табл. 2 данные, можно констатировать, что наибольшие энергозатраты были зафиксированы при обработке клёна (*Acer*). У мягких пород древесины (осина (*P.*

tremula), сосна (*P. sylvestris*), ель (*P. abies*)) определены значительно меньшие (примерно в 2 раза) значения энергозатрат.

Обсуждение

Сопоставительный анализ проведённых нами исследований и выполненных ранее работ [6,7,12] показывает, что скорость резания лазером зависит от большого числа параметров: породы древесины, её твёрдости и плотности; текстуры, расположения годичных слоёв, зон поздней и ранней древесины; пороков и дефектов древесины и пр. Поэтому для качественной обработки древесины необходимо грамотно подбирать скорость резания, учитывая, в первую очередь, вышеперечисленные факторы.

Кроме этого, авторы работ [3,12] отмечают, что скорость и качество лазерного резания древесины и соответствующие энергозатраты зависят от изменений в химическом составе и структуре, происходящих внутри самого материала во время лазерной обработки. Проведённая нами экспериментальная работа подтвердила наличие изменений химического состава древесины в результате лазерного облучения, а также влияние процесса науглераживания на эффективность резки. Например, для красного дерева (*P. santalinus* L.f.) выраженный процесс карбонизации способствовал отражению части падающего лазерного излучения, а также излишнему распределению тепла в окрестности зоны облучения, что приводило к воспламенению.

Выполненное исследование также показало необходимость учёта разницы заданных и действительных размеров (диаметров) отверстий, образованных лазерным лучом, что не анализировалась ранее авторами работ по лазерной обработке древесины. Данное обстоятельство необходимо учитывать при изготовлении деталей малых форм и размеров для конструкций, требующих высокой точности обработки.

Заключение

Таким образом, проведённые экспериментальные исследования позволяют сделать следующие обобщающие выводы:

- скорость сквозного реза при лазерной обработке зависит, главным образом, от плотности и твёрдости древесины. Чем больше твёрдость и плотность древесины, тем ниже скорость резания;

- на скорость реза также влияют скрытые сучки, трещины и другие дефекты древесины, которые затрудняют лазерную обработку. Также необходимо отметить разницу при обработке зон ранней и поздней древесины. Ввиду более высокой плотности поздняя древесина обрабатывается труднее;

- лазерную обработку ухудшает и процесс карбонизации, происходящий при облучении древесины;

- достаточно хорошо обрабатываются лазером ель (*P. abies*), сосна (*P. sylvestris*), осина (*P. tremula*).

- для эффективной и качественной резки твёрдых пород древесины требуется более высокая мощность лазера. Тем не менее, срез получается чистый и гладкий из-за плотной структуры древесины. Чем толще и твёрже древесина, тем темнее кромки реза;

- для большинства пород древесины по мере увеличения дозы облучения меняется взаимное процентное содержание углерода и кислорода: увеличивается процент содержания углерода, и снижается процентное содержание кислорода. Причём наибольший прирост углерода и значительное уменьшение кислорода наблюдается у красного дерева (*P. santalinus* L.f.) Для проведения спектрального анализа необходима специальная подготовка образцов древесины (например, напыление поверхности тонким слоем золота);

- при выполнении отверстий лазерным лучом необходимо учитывать увеличение их действительных размеров в среднем на 0,2 – 0,3 мкм для всех пород;

- теоретически можно определить скорости поперечного реза и энергозатраты, тем самым обеспечить выбор оптимального и эффективного режима лазерной обработки.

Список литературы

1. Селиверстов А.А., Симонова И. В., Талых А.А. Оценка качества еловых и сосновых сортиментов для производства продукции с повышенной добавленной стоимостью. *Resources and Technology*. 2024; 1: 73-85. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65312292>.
2. Ивановский В.П. Результаты экспериментальных исследований процесса разрезания древесины мягких пород дисковыми ножами. *Лесотехнический журнал*. 2021; 2(42): 99-107. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46248448>.
3. Kubovský I., Krišt'ák L., Suja J., Gajtanska M., Igaz R., Ružiak I., Réh R. Optimization of Parameters for the Cutting of Wood-Based Materials by a CO2 Laser. *Appl. Sci*. 2020; 10: 8113.
4. Nath S., Waugh D.G., Ormondroyd G.A., Spear M.J., Pitman A.J., Sahoo S., Mason P. CO2 Laser Interactions with Wood Tissues During Single Pulse Laser-incision. *Opt. Laser Technol*. 2020; 126: 106069.
5. Moradi M., Moghadam M.K., Beiranvand Z.M. CO2 Laser Engraving of Injection Moulded Polycarbonate. *Experimental Investigation. Lasers Eng*. 2021; 48: 293-303.
6. Лазерные технологии для высококачественной резки по дереву. *Молодой учёный*. 2019; 50 (288). URL: <https://moluch.ru/archive/288/91560/>
7. Шарапов Е.С. Исследование физико-механических свойств и строения древесины методом лазерной резки. *Деревообрабатывающая промышленность*. 2019; 3: 18-26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41347964>.
8. Агафонов А.А., Хабибуллин А.Р., Матосов Г.Д. Разработка технологии лазерного гравирования древесины с учётом корреляционной зависимости. *Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки: сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции*. 2023; 1: 85-89. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53875400>.
9. Yang C., Jiang T., Yu Y., Bai Y., Song M., Miao Q., Ma Y., Liu J. Water-jet Assisted Nanosecond Laser Microcutting of Northeast China Ash Wood. *Experimental Study. BioResources*. 2019; 14: 128-138.
10. Kúdela J., Reinprecht L., Vidholdová Z., Andrejko M. Surface Properties of Beech Wood Modified by CO2 Laser. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2019; 61: 5-18.
11. Lungu A., Timar M.C., Beldean E.C., Georgescu S.V., Coşereanu C. Adding Value to Maple (*Acer pseudoplatanus*) Wood Furniture Surfaces by Different Methods of Transposing Motifs from Textile Heritage. *Coatings*. 2022; 12: 1393.
12. Kúdela J., Kubovský I., Andrejko M. Influence of Irradiation Parameters on Structure and Properties of Oak Wood Surface Engraved with a CO2 Laser. *Materials*. 2022; 15: 8384. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238384>.
13. Kúdela J., Kubovský I., Andrejko M. Surface Properties of Beech Wood after CO2 Laser Engraving. *Coatings*. 2020; 10: 77.
14. Kúdela J., Andrejko M., Mišíková O. Wood Surface Morphology Alteration Induced by Engraving with CO2 Laser Under Different Raster Density Values. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2021; 63: 35-47.
15. Kúdela J., Lagařna R., Andor T., Csiha C. Variations in beech wood surface performance associated with prolonged heat treatment. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2020; 62: 5-17.
16. Талых А.А. Некоторые особенности отбора древесины для изготовления народных струнных щипковых музыкальных инструментов. *Аллея науки*. 2024; 2(89): 8-81. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65850463>.
17. Талых А.А., Гаврилова А.Д., Шишигин Д.А. О выборе защитно-декоративных покрытий для отделки корпусов и дек струнных музыкальных инструментов из древесины. *Технология органических веществ: материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием)*. 2024; 403-406. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67330322>.

18. Талых А.А. Особенности конструирования изделий из древесины сувенирного назначения. *Advances in Science and Technology: сборник статей LVIII международной научно-практической конференции*. 2024; 67-69. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=63855968>.
19. Li R., He C., Xu W., Wang X.A. Prediction of Surface Roughness of CO2 Laser Modified Poplar Wood Via Response Surface Methodology. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 2022; 24: 1-12.
20. Li R., He C., Chen Y., Wang X. Effects of Laser Parameters on the Width of Color Change Area of Poplar Wood Surface During a Single Irradiation. *Eur. J. Wood Prod.* 2021; 79: 1109-1116.
21. Reinprecht L., Vidholdová Z. The Impact of a CO2 Laser on the Adhesion and Mold Resistance of a Synthetic Polymer Layer on a Wood Surface. *Forests*. 2021; 12: 242.

References

1. Seliverstov A.A., Simonova I.V., Talykh A.A. Otsenka kachestva elovykh i sosnovykh sortimentov dlya proizvodstva produktsii s povyshennoy dobavlennoy stoimost'yu. [Evaluation of the quality of spruce and pine assortments for the production of products with increased added value]. *Resources and Technology*. 2024; 1:73-85. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65312292>.
2. Ivanovskij V.P. Rezul'taty eksperimental'nyh issledovaniy processa razrezaniya drevesiny myagkih porod diskovymi nozhami. [Results of experimental studies of the process of cutting softwood with circular knives]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2021;2(42):99-107. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46248448>.
3. Kubovský I., Krišt'ák L., Suja J., Gajtanska M., Igaz R., Ružiak I., Réh R. Optimization of Parameters for the Cutting of Wood-Based Materials by a CO2 Laser. *Appl. Sci.* 2020; 10: 8113.
4. Nath S., Waugh D.G., Ormondroyd G.A., Spear M.J., Pitman A.J., Sahoo S., Mason P. CO2 Laser Interactions with Wood Tissues During Single Pulse Laser-incision. *Opt. Laser Technol.* 2020; 126: 106069.
5. Moradi M., Moghadam M.K., Beiranvand Z.M. CO2 Laser Engraving of Injection Moulded Polycarbonate. *Experimental Investigation. Lasers Eng.* 2021; 48: 293-303.
6. Lazernye tekhnologii dlya vysokokachestvennoy rezki po derevu. [Laser technologies for high-quality wood cutting]. *Molodoy ucheny*. 2019;50(288). (In Russ.). URL: <https://moluch.ru/archive/288/91560/>.
7. Sharapov E.S. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv i stroeniya drevesiny metodom lazernoj rezki. [Study of physical and mechanical properties and structure of wood by laser cutting]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*; 2019;3:18-26. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41347964>.
8. Agafonov A.A., Habibullin A.R., Matosov G.D. Razrabotka tekhnologii lazernogo gravirovaniya drevesiny s uchytom korrelyacionnoj zavisimosti. [Development of technology for laser engraving of wood taking into account the correlation dependence]. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty razvitiya sovremennoj nauki: sbornik nauchnykh statej po materialam XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. 2023; 1:85-89. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53875400>.
9. Yang C., Jiang T., Yu Y., Bai Y., Song M., Miao Q., Ma Y., Liu J. Water-jet Assisted Nanosecond Laser Microcutting of Northeast China Ash Wood. *Experimental Study. BioResources*. 2019; 14: 128-138.
10. Kúdela J., Reinprecht L., Vidholdová Z., Andrejko M. Surface Properties of Beech Wood Modified by CO2 Laser. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*. 2019; 61: 5-18.
11. Lungu A., Timar M.C., Beldean E.C., Georgescu S.V., Coșereanu C. Adding Value to Maple (*Acer pseudoplatanus*) Wood Furniture Surfaces by Different Methods of Transposing Motifs from Textile Heritage. *Coatings*. 2022; 12: 1393.
12. Kúdela J., Kubovský I., Andrejko M. Influence of Irradiation Parameters on Structure and Properties of Oak Wood Surface Engraved with a CO2 Laser. *Materials*. 2022; 15: 8384. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238384>.
13. Kúdela J., Kubovský I., Andrejko M. Surface Properties of Beech Wood after CO2 Laser Engraving. *Coatings*. 2020; 10: 77.

14. Kúdela J., Andrejko M., Mišíková O. Wood Surface Morphology Alteration Induced by Engraving with CO₂ Laser Under Different Raster Density Values. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2021; 63: 35-47.
15. Kúdela J., Lagařna R., Andor T., Csiha C. Variations in beech wood surface performance associated with prolonged heat treatment. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. 2020; 62: 5-17.
16. Talykh A.A. Nekotorye osobennosti otbora drevesiny dlya izgotovleniya narodnykh strunnykh shchipkovykh muzykal'nykh instrumentov. [Some features of wood selection for the production of folk stringed plucked musical instruments]. *Alleya nauki*. 2024;2(89):78-81. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65850463>.
17. Talykh A.A., Gavrilova A.D., Shishigin D.A. O vybore zashchitno-dekorativnykh pokrytij dlya otdelki korpusov i dek strunnykh mu-zykal'nykh instrumentov iz drevesiny. [On the choice of protective and decorative coatings for finishing the bodies and soundboards of stringed musical instruments made of wood]. *Tekhnologiya organicheskikh veshchestv: materialy 88-j nauch.-tekhn. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem)*. 2024; 403-406. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67330322>.
18. Talykh A.A. Osobennosti konstruirovaniya izdeliy iz drevesiny suvenirnogo naznacheniya. [Features of designing wood products for souvenir purposes]. *Advances in Science and Technology: sbornik statey LVIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2024;67-69. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=63855968>.
19. Li R., He C., Xu W., Wang X.A. Prediction of Surface Roughness of CO₂ Laser Modified Poplar Wood Via Response Surface Methodology. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 2022; 24: 1-12.
20. Li R., He C., Chen Y., Wang X. Effects of Laser Parameters on the Width of Color Change Area of Poplar Wood Surface During a Single Irradiation. *Eur. J. Wood Prod*. 2021; 79: 1109-1116.
21. Reinprecht L., Vidholdová Z. The Impact of a CO₂ Laser on the Adhesion and Mold Resistance of a Synthetic Polymer Layer on a Wood Surface. *Forests*. 2021; 12: 242.

Сведения об авторах

✉ *Талых Алексей Александрович* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии, изобразительного искусства и дизайна, Институт педагогики и психологии, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, e-mail: ata_77@mail.ru, 8-909-570-41-47, orcid.org/0000-0002-3750-2608.

Спирин Олег Викторович – электроник 1 категории кафедры физики твёрдого тела, Физико-технический институт, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, e-mail: olspirin@petsru.ru, 8-900-463-85-75, orcid.org/0009-0005-8306-5436.

Чугин Владимир Павлович – ведущий инженер кафедры информационно-измерительных систем, электроники и автоматики, Физико-технический институт, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, e-mail: chuginvp@gmail.com, 8-911-429-55-25, orcid.org/0009-0006-5959-3754.

Сюнев Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор, проректор по научно-исследовательской работе ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация, e-mail: siounev@petsru.ru, 8-921-702-19-58, orcid.org/0000-0002-2558-2671.

Information about the authors

✉ *Aleksey A. Talykh* – Candidate of pedagogical sciences, Associate professor of the Department of Technology, Fine Arts and Design, Institute of Pedagogy and Psychology, Petrozavodsk State University, 33, prosp. Lenina, Petrozavodsk, Russian Federation, e-mail: ata_77@mail.ru, +7-909-570-41-47, orcid.org/0000-0002-3750-2608.

Oleg V. Spirin – 1st category electronics engineer of the Department of Solid State Physics, Institute of Physics and Technology, Petrozavodsk State University, 33, prosp. Lenina, Petrozavodsk, Russian Federation, e-mail: olspirin@petsu.ru, +7-900-463-85-75, orcid.org/0009-0005-8306-5436.

Vladimir P. Chugin – leading engineer of the Department of Information and Measuring Systems, Electronics and Automation, Institute of Physics and Technology, Petrozavodsk State University, 33, prosp. Lenina, Petrozavodsk, Russian Federation, e-mail: chuginvp@gmail.com, 8-911-429-55-25, orcid.org/0009-0006-5959-3754.

Vladimir S. Syunev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Petrozavodsk State University, 33, prosp. Lenina, Petrozavodsk, Russian Federation, e-mail: siounev@petsu.ru, 8-921-702-19-58, orcid.org/0000-0002-2558-2671.

✉ – Для контактов/Corresponding author