

УДК 621.373.826:535.21

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРАГМЕНТАЦИИ  
МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ ТАТУИРОВОЧНОЙ КРАСКИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ ПРИ  
МНОГОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Шамова А.А.** (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»),

**Лобастов В.А.** (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»)

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Яковлев Е.Б.**

(Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»)

В работе представлены экспериментальные результаты по облучению частиц татуировочной краски в жидких средах наносекундными лазерными импульсами с различной частотой следования. Предложен ряд модельных объектов для исследования влияния жидкости, присутствующей в биологической ткани, на процесс лазерной фрагментации частиц краски. Анализ полученных результатов позволил сделать ряд выводов, полезных для понимания физического механизма лазерного удаления татуировки.

**Введение.** В современном обществе с каждым годом увеличивается спрос на удаление татуировок. На сегодняшний день разработано огромное количество методов удаления нежелательных рисунков, нанесённых на тело. Однако наиболее эффективным среди них является лазерный метод. В этом случае для удаления татуировок в основном используются наносекундные лазеры, излучающие в красной и инфракрасной областях спектра. В основе удаления татуировки лежит процесс фрагментации частиц краски, введённой в дерму, с помощью лазера. Несмотря на длительное использование такого способа, точные механизмы лазерной фрагментации не до конца изучены. В большинстве исследований рассматривается фрагментация частиц краски только за счёт теплового механизма, в то время как в других предполагается, что акустический механизм является доминирующим при воздействии коротких лазерных импульсов. Также существует мнение, что фрагментация частиц татуировочной краски может быть вызвана сочетанием тепловых и акустических эффектов. Основными проблемами, возникающими при использовании лазерной технологии, являются значительная длительность курса лечения и частое возникновение сложных клинических случаев, в которых не удалось достичь полного удаления татуировки. Поэтому для определения оптимальных режимов лазерного облучения, требуемых для проведения эффективных и безопасных процедур, необходимы дальнейшие сравнительные исследования.

**Результаты исследования.** Основным компонентом биологических тканей, в том числе и кожи, является вода. Поэтому представляет интерес изучить влияние жидкости, присутствующей в биоткани, на процесс лазерной фрагментации частиц татуировочной краски. Для снижения повреждения окружающих область обработки тканей может использоваться режим многоимпульсного облучения, так как в этом случае для разрушения тонкого слоя краски требуется меньшая плотность энергии излучения. Однако при этом могут проявляться эффекты накопления, вклад которых может значительно возрасти при увеличении частоты следования лазерных импульсов, что способно привести к различным осложнениям. Поэтому их необходимо учитывать при подборе режима облучения для проведения безопасных медицинских процедур. В связи с этим следует проанализировать особенности воздействия серии коротких лазерных импульсов с различной частотой следования на частицы краски в жидкости.

Для экспериментов были выбраны дистиллированная вода и аптечный глицерин (ООО «Тульская фармацевтическая фабрика», Россия). В качестве модельных объектов использовались:

1. Фрагменты высохшей чёрной татуировочной краски «True Black» (World Famous Tattoo Ink, США) с размерами  $\sim 0.6 - 1.4$  мм, которые были помещены с помощью пинцета в капли воды, нанесённые на предметное стекло.

2. 2 капли краски, разведённые в 3 мл аптечного глицерина. Капли полученной жидкости наносились на предметное стекло с помощью шприца.

В экспериментах использовалась установка «МиниМаркер-2» (ООО «Лазерный Центр», Россия) на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера с длиной волны излучения 1.07 мкм. Диаметр лазерного пятна в фокальной плоскости объектива составлял 50 мкм. Длительность импульсов была равна 20 нс, а частота их следования изменялась в диапазоне от 5 до 99 кГц. В экспериментах проводилось облучение образцов сканирующим лазерным пучком (скорость сканирования –  $300 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ , шаг сканирования – 100 мкм, размер области сканирования –  $3 \times 3$  мм).

В ходе исследования были получены следующие результаты:

- Во всех случаях наблюдаются долгоживущие микропузырьки. Такое может быть только тогда, когда пузырёк образуется не только за счёт испарения жидкости, но и из-за присутствия в ней малорастворимого газа (различных составляющих воздуха). Аналогичный процесс происходит и при лазерном облучении кожи с татуировкой. В этом случае наблюдается побеление обработанных тканей в результате образования в дерме микрокавитационных пузырьков, которое обусловлено присутствием в клетках кожи и в межклеточном пространстве различных газов.

- Лазерная фрагментация крупных фрагментов краски со средним размером 1 мм в воде в основном осуществляется путём отделения мелких частиц неправильной формы с размерами 1 – 35 мкм.

- При лазерном облучении краски, разведённой в аптечном глицерине, средний диаметр микропузырьков, уменьшается в 1.5 раза при увеличении частоты следования импульсов от 5 до 30 кГц, что, вероятно, связано с накоплением эффекта их дробления при прохождении ударных волн от импульса к импульсу.

**Выводы.** Таким образом, исследование воздействия серии наносекундных лазерных импульсов на модельные объекты позволило проследить ряд особенностей процесса лазерной фрагментации микро- и наночастиц татуировочной краски в зависимости от частоты следования импульсов. Полученные результаты согласуются с данными различных исследований, проведённых на пациентах, что подтверждает правомочность используемой методики. Дополнительной возможностью развития технологии лазерного удаления татуировок является сокращение длительности лазерных импульсов.