

УДК 621.373.826

DOI 10.22213/2413-1172-2017-3-19-23

**В. А. Алексеев**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова**А. В. Усольцева**, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова**В. П. Усольцев**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## УПРАВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ОБРАБОТКИ БИОМАТЕРИАЛОВ

**Ш**ирокое распространение в нашей жизни получили лазеры и лазерные технологии. Успехи по созданию и применению лазеров поистине превзошли все ожидания. Наиболее массовой областью использования лазерной техники является лазерная обработка материалов, в которой в большинстве случаев используется тепловое воздействие лазерного излучения. Хотя список применения лазера очень длинный, он продолжает увеличиваться. К отраслям, в наибольшей степени нуждающимся в лазерных технологиях, относятся медицина, военно-промышленный комплекс, телекоммуникации, авиакосмическая сфера, металлургия. Исключительно широкое использование лазеров объясняется их уникальными свойствами [1].

Уникальные физические свойства лазерного излучения – монохроматичность, когерентность и узконаправленность – обусловили его широкое применение в медицине и биологии. Продажи биомедицинской оптической продукции на мировом рынке за период 1995–2005 гг. утроились, достигнув уровня 6 млрд долл., а к 2010 г. продажи возросли еще в 5 раз. Суммарный рост продаж медицинских лазеров увеличивается ежегодно на 10 %. В частности подъем продаж прогнозируется из-за роста спроса на лазеры в результате появления новых быстро развивающихся рынков для них в Китае и Индии [2]. Применение лазеров в медицине принципиально отличается от других многочисленных областей технологического применения лазеров. Лазерные медицинские технологии отличаются гуманистической направленностью, многоплановостью, комплексностью, разнообразием. Воздействие лазерного излучения на различные биоматериалы с индивидуальными свойствами, как оптическими (спектральные характеристики, коэффициент отражения, глубина проникновения излучения), так и теплофизическими (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость), различается по характеру воздействия лазерного излучения. Соответственно, в каждом случае выбираются индивидуальные параметры режима облучения: длина волны, длительность воздействия, мощность, частота следования импульсов и т. д. Существенное различие свойств биотканей (каждая ткань в силу своей биологической природы неоднородна, имеет сложную микроструктуру) определяет специфичность лазерного воздействия. Следствием этого является тот факт, что воздействие излучения на ткани для разных тканей и длин волн излучения

различается не только количественно, но и качественно. Этим объясняется существование нескольких совершенно различных механизмов воздействия лазерного излучения на биологические ткани.

Применение лазеров в биологии и медицине основано на использовании широкого круга явлений, связанных с разнообразными проявлениями взаимодействия света с биологическими объектами. При воздействии лазерного излучения на ткань наблюдается три процесса: отражение, поглощение и (или) пропускание. При этом проникающие в ткань лучи частично поглощаются, частично рассеиваются и частично пропускаются. Длина волны лазерного излучения и спектральные характеристики объекта определяют соотношение между этими процессами.

Классификация основных принципов применения лазеров в биологии и медицине представлена на рис. 1 [3].

Состояние поверхности при лазерной абляции определяют основные характеристики лазерного воздействия, от которых зависит эффективность восстановления и внешний вид полостей, разрезов, отверстий и т. д. Наличие различных включений или пустот на поверхности биоматериала приводит к кардинальному улучшению биосовместимости, ускорению адаптации организма к инородному телу, позволяет значительно снизить вероятность его отторжения, предотвратить воспалительные процессы [4].

Рассматривая поверхность биоматериала как границу между материалом и окружающей средой, состояние поверхности можно представить моделью поверхности, содержащей множество параметров (шероховатость, волнистость, пористость, фактура, рельеф, твердость и т. д.) для исходной поверхности, связанной с природой биоматериала и условиями образования или поверхности, полученной после обработки (абляции).

Постоянно возрастающие объемы лазерных технологий, увеличивающееся количество видов биоматериалов существенно осложняют решение вопросов минимизации рисков, осложнений, появления рецидивов. Вопросы совершенствования структуры системы управления технологическими процессами лазерной обработки биоматериалов требуют дальнейшего изучения и обобщения. Первостепенное значение имеет разработка теоретических и методических основ технологического использования лазеров для обработки биоматериалов с получением за-

данного состояния поверхности при лазерной абляции [5]. Лазерные импульсы являются эффективным инструментом модификации поверхности. Их взаимодействие с поверхностью, как правило, приводит к сглаживанию и гомогенизации поверхности. Кроме того, в результате лазерного облучения в приповерх-

ностном слое могут происходить фазовые превращения. Все это во многих случаях улучшает эксплуатационные характеристики биоматериалов [6]. Однако формирующиеся при импульсном лазерном воздействии кратеры на поверхности могут свести на нет весь полученный положительный эффект [7].

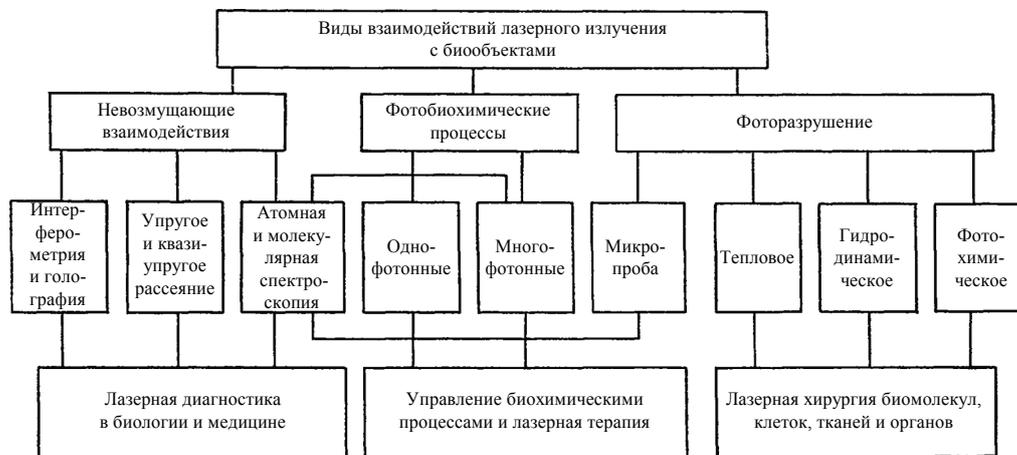


Рис. 1. Классификация основных принципов применения лазеров в биологии и медицине

Существование корреляционных связей между параметрами лазерного излучения и другими параметрами, характеризующими технологию лазерной обработки, является предпосылкой получения поверхности биоматериала с заданными характеристиками. Предлагаемый подход достаточно перспективен, так как в этом случае состояние поверхности будет функционально связано с параметрами лазерной обработки [8].

Для проблемно ориентированного управления параметрами поверхности система физических процессов при лазерной обработке представлена в виде модели из последовательной цепи модельных блоков, предназначенных для идентификации вида биологического материала, длины волны, мощности лазерного излучения, скорости движения лазерного луча, частоты следования импульсов, диаметра сфокусированного лазерного излучения на материале, угла падения лазерного луча. Каждый блок модели снабжается входными данными и возможностями адекватного представления результатов на выходе. Входными данными каждого блока могут служить либо измерительные и статистические данные (из баз данных, априорных знаний, экспертных систем), либо результаты модельных расчетов, поступающие с выхода предыдущего блока, либо те и другие одновременно, причем с весовыми коэффициентами, учитывающими уровень неопределенности в каждом из них.

Разработана обобщенная вероятностная математическая модель получения заданных параметров поверхности биоматериала при лазерной обработке. Модель организована иерархически и содержит несколько уровней пространственной, временной организации, специализированных, соответствующих конкретному материалу, или универсальных, охватывающих все возможные случаи практической реа-

лизации. Параллельно предусмотрено несколько уровней иерархии параметров модели, отвечающих разной степени детализации модельного представления процессов; например, может детализироваться модель реакции определенной аппаратуры управления на появление неоднородностей характеристик биоматериала. Если модель функционирует правильно, то чем выше уровень, тем более надежная информация в нем накапливается. В модели постоянно будет происходить фоновый процесс, отвечающий за согласование разных уровней представления информации. Алгоритм реализации математической модели для проблемно ориентированного управления состоянием поверхности при лазерной абляции представлен на рис. 2.

На основании разработанной модели с учетом ранее приведенных исходных данных сформированы требования к аппаратуре адаптивного контроля, выделены информативные параметры, заданы начальные условия, диапазоны изменения рабочих характеристик, определен алгоритм работы.

Для оперативного управления технологическим процессом, получения точных исходных данных, проверки адекватности математической модели разработана виртуальная система управления лазерным технологическим процессом обработки биоматериалов в реальном масштабе времени. Функциональная схема системы представлена на рис. 3.

Функционирование системы управления лазерным технологическим процессом обработки биоматериалов осуществляется следующим образом. На начальном этапе формируется архив на основании базы данных изменения состояния поверхности биологических материалов при лазерной абляции, функционально-корреляционных связей между характеристиками поверхности биоматериала и параметрами лазерного излучения. Затем на основании получен-

ных статистических материалов задаются режимы лазерной обработки, контролируются характеристики

ки поверхности, при отклонении результатов от заданных производится коррекция.



Рис. 2. Алгоритм создания математической модели



Рис. 3. Функциональная схема системы

Строение поверхности биоматериала воспринимается благодаря зрительному восприятию светотеневых неравномерностей и характеризуется степенью неровностей, различающихся по высоте и характеру рельефа, зависящего от глубины проникновения лазерного излучения в биоматериал.

Если лазерный луч имеет гауссов профиль, а плотность поглощенного на поверхности потока энергии постоянна при одинаковых и фиксированных расстояниях от центра нагреваемого пятна и глубины нагрева, отсчитываемой от поверхности, для преобразования выражения расчета распределения температуры в твердом материале и ее изменения во времени используется способ сведения с помощью замены переменной к интегралу, содержащему степенную и алгебраическую функции в результате разложения тригонометрической функции  $\arctg(x)$  в ряд и использования трех первых

членов ряда, что вносит погрешность менее 5 %, но существенно упрощает вычисления при использовании соотношения для описания зависимости между основными параметрами излучения и материала. Получено выражение для определения глубины проникновения излучения в материал:

$$h = \frac{4P}{C_p \rho T \pi d^2}, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина проникновения излучения в биоматериал, м;  $P$  – мощность излучения, Вт;  $C_p$  – теплоемкость биоматериала, Дж/К;  $\rho$  – плотность биоматериала, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр лазерного луча на поверхности, м;  $T(t)$  – изменение температуры материала при нагреве, К.

Поскольку термические свойства биоматериалов нелинейно изменяются с изменением температуры,

проведена проверка корректности применения выражения (1) для определения глубины проникновения лазерного излучения в материал и получаемого рельефа поверхности после абляции.

Исследования проведены на двух биологических материалах – коже и кости (рис. 4, 5). При выборе режимов лазерного воздействия учитывалось химическое строение кожи. Важнейшим веществом кожи являются белки, их доля составляет приблизительно 22-39 %. Белки являются высокомолекулярными веществами, состоящими из углерода, водорода, азота и кислорода. Содержание воды в коже составляет 14-16 %. Содержание жира в коже различного вида неодинаково и изменяется от 2-5 до 30 %. Жир в коже располагается неравномерно, в виде скоплений. В коже имеются соединения кальция, магния и железа, однако их количество не достигает и 1 %. Химический состав кости весьма своеобразен. В среднем кость содержит 51 % воды, минеральные вещества 32 %, жиры 15 % и белковые вещества 12 %. Минеральные вещества кости состоят из фосфорнокислого кальция (85 %), углекислого кальция (10,0 %), фосфорнокислой магнезии (1,5 %), фтористого кальция (0,3 %), хлористого кальция (0,2 %) и солей натрия (2,0 %).



Рис. 4. Лазерная обработка кожи



Рис. 5. Лазерная обработка кости

Каждая из этих составляющих обладает своими коэффициентами поглощения, теплопроводности и температуропроводности. Протекание процессов поглощения лазерного излучения и нагрева зависит от соотношения характерных размеров неоднородности материала, глубины проникновения света в материал и толщины прогреваемого слоя. При воздействии лазерного излучения температура нагрева зависит также от толщины образца и частоты следования импульсов. Поскольку коэффициент поглощения

сильно зависит от длины волны излучения и от состава биологической ткани, изменение характеристик лазерного излучения может кардинальным образом влиять на режимы поглощения, нагрева, абляции материала, состояние поверхности. Ситуация осложняется еще и тем обстоятельством, что коэффициент поглощения может меняться в процессе воздействия вследствие фото- и термомеханических реакций, приводящих к изменению состава ткани.

Основными физическими параметрами лазера, определяющими воздействие квантовой энергии на мишень, являются длина генерируемой волны, плотность потока энергии, время воздействия и угол падения лазерного луча.

Учитывая микроструктуру, химический состав и физико-механические характеристики используемых биоматериалов для проведения исследований выбрана лазерная установка на углекислом газе  $\text{CO}_2$ . Анализ изменений состояния поверхности проводился при изменении мощности лазерного излучения в пределах 2...12 Вт, скорости движения лазерного луча 10...180 см/сек., разрешающей способности – количества линий на дюйм – 100...1000 dpi, частоты импульсов излучения 500...1000 Гц, диаметра сфокусированного лазерного луча на материале 0,05...1,0 мм, угла падения лазерного луча 0...45° и комбинации этих режимов.

Величина микронеровностей при изменении мощности излучения лазера и других постоянных параметрах (скорости движения лазерного луча 18 см/сек, разрешающей способности 500 dpi, частоте импульсов 1000 Гц, диаметре сфокусированного лазерного луча на материале 0,1 мм, угле падения лазерного луча 0°) для кожи представлена на рис. 6, для кости – на рис. 7. Точечной кривой изображена аппроксимация функциональной зависимости полиномиальной функцией.

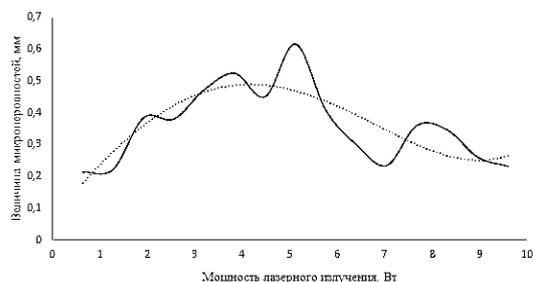


Рис. 6. Микронеровности кожи

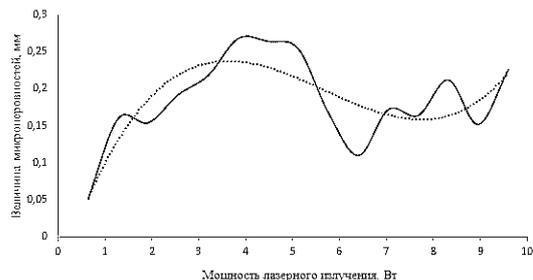


Рис. 7. Микронеровности кости

Для определения аналитических выражений зависимости величины микронеровностей при изменении мощности излучения лазера применен метод интерполяции и экстраполяции с использованием аппроксимации по методу наименьших квадратов с выполнением условия

$$F = \sum_{i=1}^n [Y_i - y(t_i)]^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $F$  – минимизируемая функция;  $Y_i$  – эмпирические точки статистической зависимости;  $y(t_i)$  – аналитическая функциональная зависимость.

Эта зависимость оптимально описывается полиномиальной функцией:

– для кожи

$$R_z = 0,0003x^4 - 0,0038x^3 - 0,0086x^2 + 0,1798x + 0,069; \quad (3)$$

– для кости

$$R_z = 0,0023x^3 - 0,0388x^2 + 0,1915x - 0,0556. \quad (4)$$

По результатам статистической обработки результатов (расчете дисперсии, коэффициента корреляции,  $t$ -критерия Стьюдента) даны рекомендации по назначению режимов работы лазерной установки, обеспечивающих необходимое состояние поверхности при лазерной абляции биоматериалов. Полученные аналитические выражения не противоречат результатам математического моделирования и результатам опытной эксплуатации. Согласованность теоретического и статистического распределения проверена с использованием критерия согласия, критерия  $\chi^2$  Пирсона.

Из приведенных графиков видно, что до определенного нарастания мощности величина микронеровностей увеличивается, затем снижается с последующим небольшим ростом. Это свидетельствует, что высота и характер рельефа как физические величины характеризуют скорость изменения температуры нагрева материала при неравновесных тепловых процессах, позволяют комплексно учесть нелинейное изменение термических параметров биоматериалов, вызванных изменением физических, механических, химических, эстетических свойств из-за неоднородности микроструктуры, вызванной объемной неопределенностью и многовариантностью реализаций характеристик используемого материала. Свойства биоткани определяются составом образующих соединений, местом создания, особенностями климатических и топографических условий, скоростью нарастания и т. д.

Проведенные исследования показали, что для достижения заданного состояния биологических материалов с помощью разработанных теоретических и методических основ перспективно использование комплексного подхода, учитывающего существование функционально-корреляционных связей между параметрами, характеризующими технологию лазерной обработки и состояние поверхности биоткани.

Получено 31.05.2017

Таким образом, практика лазерной обработки материалов подтверждает огромные возможности лазерных технологических процессов, которые позволяют эффективно решать крупные медико-биологические задачи. При этом применение лазерной техники выводит медицину на новый высокоинтеллектуальный уровень. Проведенные исследования позволяют повысить эффективность применения лазерной техники при создании новых биомедицинских технологий.

Практическая значимость исследований определяется разработанными предложениями, применимыми к решению актуальных задач задания режимов лазерной обработки для лазерной абляции биоматериалов при многовариантности реализаций в условиях неопределенности индивидуальных характеристик используемого материала. Предлагаемый способ позволяет максимально сохранить уникальные индивидуальные свойства биоткани, успешно компенсировать имеющиеся естественные неоднородности материала и обеспечить стабильно высокие результаты при масштабном применении лазерных технологий в медицине. Авторитетные ученые заверяют, что если квантовая физика определила технический прогресс человечества в XX веке, то квантовая медицина определит прогресс здравоохранения в XXI веке.

#### Библиографические ссылки

1. Laser materials processing: User's Handbook Manual // Sc. Edit. Panchenko V. Ya. – Bulgaria, Plovdiv, 2001.
2. Кинкэйд К., Андерсен С. Дж. Лазерный рынок в 2007 году // LFW, США.
3. Kozlovskaya N. A., Krokhin O. N., Zavestovskaya I. N. Ultrashort laser pulses ablation of the transparent materials // Proc. of 4th Int. Conf. FPPT, April 2009. – Kathmandu, 2000.
4. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. – М.: Техносфера, 2006. – 224 с.
5. Усольцева А. В. Состояние поверхности при лазерной абляции биоматериалов / Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2016 : Тр. XXIV Междунар. конф. (12–17 сентября 2016 г., Новороссийск) / под ред. проф. В. Е. Привалова. – Новороссийск : Изд-во РИО ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 2015. – С. 150–153.
6. Усольцева А. В. Использование лазеров при обработке биологических тканей в условиях неопределенности и отсутствии объективных критериев оценки эффективности / Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2015 : Тр. XXIII Междунар. конф. (7–11 сентября 2015 г., Новороссийск) / под ред. проф. В. Е. Привалова. – Новороссийск : Изд-во РИО ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 2015. – С. 54–55. – ISBN 978-5-89426-099-0.
7. Алексеев В. А., Усольцева А. В., Усольцев В. П. Исследование качества поверхности промышленных изделий из древесины при гравировании лазером // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 4. – С. 48–53.
8. Usovseva A. V. The laser engraving in decorative processing of organic glass. Instrumentation engineering, electronics and telecommunications – 2015 : Paper book of the I International Forum IET-2015 held within the framework of the XI International Scientific-Technical Conference “Instrumentation Engineering in the XXI Century. Integration of Science, Education and Production” (November, 25–27, 2015, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2016. – 190–194 p.