

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО CO<sub>2</sub> ЛАЗЕРА НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ

В.Г. Артюшенко, К.И. Калайджян, М.М. Миракян

*Предложена модель образования кратеров в биотканях под действием сфокусированного излучения непрерывного CO<sub>2</sub> лазера. Получены расчетные выражения и экспериментальные данные зависимости глубины, радиуса и скорости образования кратеров от параметров лазерного излучения и фокусирующей оптики.*

Исследования последних лет обеспечили широкое применение лазеров в медицине, и в настоящее время лазерный скальпель прочно вошел в хирургическую практику [1]. При проведении хирургического вмешательства при помощи лазера наряду с характеристиками самого лазерного излучения важную роль играет и фокусирующая оптика. Так, например, если необходимо обеспечить большую глубину резания биоткани, то плотность мощности лазерного излучения должна быть весьма высокой. Этого можно достичь уменьшением размера пятна облучения на поверхности ткани путем уменьшения фокусного расстояния линзы. Однако при такой фокусировке излучение, пройдя фокальную плоскость, дефокусируется уже на малой глубине, что приводит к быстрому уменьшению плотности мощности в направлении распространения луча. От параметров фокусирующего элемента зависит также и конфигурация образующегося при облучении кратера.

В настоящей работе рассматривается процесс формирования кратеров, образующихся в биотканях при действии сфокусированного непрерывного излучения CO<sub>2</sub> лазера.

При попадании лазерного излучения на биоткань часть его (около 4 – 8%) отражается от поверхности [2], оставшееся излучение проникает в ткань, где рассеивается и поглощается. Мощность излучения убывает по экспоненциальному закону  $P(z) = P_0 \exp(-\gamma z)$ , где  $\gamma = a + \beta$ ;  $\gamma$ ,  $a$ ,  $\beta$  – соответственно коэффициенты затухания, поглощения, рассеяния. Поскольку излучение CO<sub>2</sub> лазеров интенсивно поглощается водой, содержащейся в биотканях в большом количестве, коэффициент поглощения ( $a \approx 200 - 1000 \text{ см}^{-1}$ ) существенно превышает коэффициент рассеяния, и поэтому последним можно пренебречь.

Рассмотрим сфокусированный на поверхность биоткани гауссов пучок. Радиус пучка за фокальной плоскостью изменяется по закону  $1/r_l^2 = 1/r_0^2 + (hr_b/f)^2$ , где  $f$  – фокусное расстояние линзы;  $r_b$  – радиус пучка до входа в линзу;  $r_0$  – радиус пучка в фокальной плоскости;  $h$  – расстояние от фокальной плоскости вдоль оси  $z$ . Будем считать, что образование кратера есть результат послойного удаления биоткани при поглощении в слое энергии, достаточной для испарения. Глубину каждого слоя  $\Delta h$  положим равной обратной величине коэффициента поглощения ( $\Delta h \approx a^{-1}$ ). Кривизна поверхности испарения будет определяться распределением на ней плотности мощности лазерного пучка. Реализация испарительного режима определяется условием  $\tau \gg \Delta t$ , где  $\tau$  – характерное время отвода тепла из области поглощения излучения,  $\Delta t$  – время, необходимое для испарения этой области. Подобное ограничение по времени излучения энергии испарения позволяет рассматривать процесс образования кратера без учета теплоотвода, при наличии пороговой плотности мощности излучения  $4/P_{th} = \rho \chi a$ , где  $\rho$ ,  $\chi$ ,  $a$  – соответственно плотность, удельная энергия испарения и температуропроводность биоткани.

В данной модели процесс образования кратера описывается уравнением  $dm/dSdt = (P_s - P_{th})/\chi$ , где левая часть представляет собой скорость испарения биомассы с единичной поверхности,  $P_s$  – распределение плотности мощности по сечению пучка, имеющее вид  $P_s = (2P_0/\pi r_l^2) \exp(-2r^2/r_l^2)$ . Из приведенных выше формул получаем следующее уравнение для скорости углубления кратера:

$$dh/dt = [(2P_0/\pi r_l^2) \exp(-2r^2/r_l^2) - P_{th}]/\rho \chi. \quad (1)$$

Его решением при  $r = 0$  (на оси пучка) является

$$t = \frac{\rho \chi}{P_{th}} \left[ \frac{h_{max}^2 + (r_0 f / r_b)^2}{h_{max}} \operatorname{Arth} \left( \frac{h}{h_{max}} \right) - h \right], \quad (2)$$

где  $h_{max} = [(2P_0 f^2 / \pi P_{th} r_b^2) - (r_0 f / r_b)^2]^{1/2}$  представляет собой предельную глубину кратера для данного биоматериала и заданных параметров лазерного излучения.

К окончанию процесса образования кратера ( $dh/dt = 0$ ) выражение для его радиуса имеет вид:

$$r_{cr}^2 = (1/2) [r_0^2 + (r_b h / f)^2] \ln \left( (2P_0 / \pi P_{th}) [r_0^2 + (r_b h / f)^2]^{-1} \right). \quad (3)$$

Конфигурация кратера, определяемая (3), не зависит от времени, а радиус достигает максимальной величины на глубине  $H = [(2P_0 f^2 / \pi P_{th} r_b^2) - (r_0 f / r_b)^2]^{1/2}$  и равен  $r_{cr max} = (P_0 / \pi P_{th})^{1/2}$ .

Выражения (2), (4) упрощаются в предположении  $(r_0 f / r_b)^2 \ll h_{max}^2, H^2$ , что как правило реализуется в условиях эксперимента. При этом  $H/h_{max} = \exp(-1/2)$ . Введем безразмерные переменные  $T = P_{th} t / \rho \chi h_{max}$  и  $X = h/h_{max}$ , характеризующие соответственно время и относительную глубину образования кратера. В новых переменных формула (2) имеет вид

$$\operatorname{Arth} X - X = T. \quad (4)$$

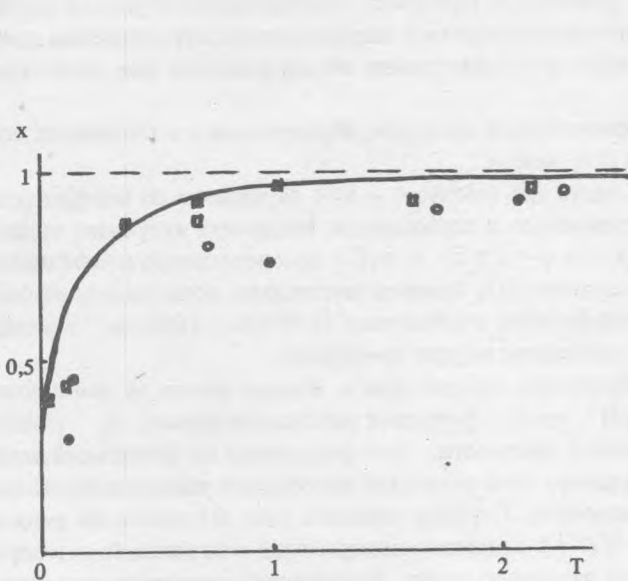


Рис. 1. Зависимость глубины кратера от времени; сплошная кривая – расчет по формуле (4), точки – экспериментальные данные:  $\blacksquare$  –  $P_0 = 15$  Вт,  $f = 9,5$  см;  $\square$  – 15 Вт, 6,2 см;  $\bullet$  – 5 Вт, 9,5 см;  $\circ$  – 7,5 Вт, 6,2 см.

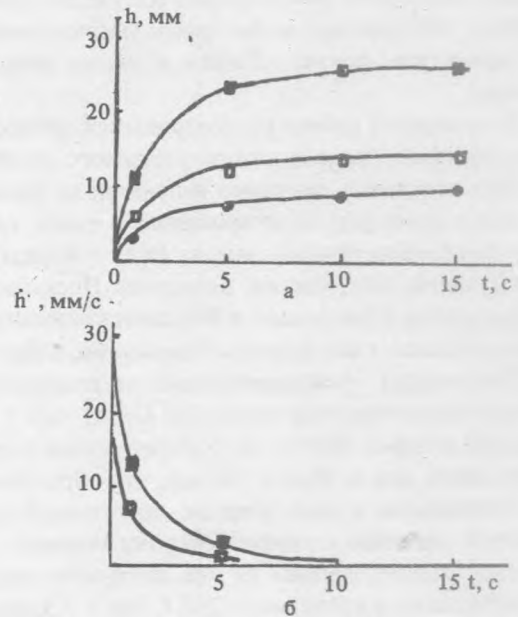


Рис. 2. Зависимость глубины (а) и скорости образования (б) кратеров от времени облучения. Обозначения те же, что на рис. 1.

Эта зависимость представлена на рис. 1 вместе с результатами эксперимента. Как следует из рисунка, довольно высокая скорость в начале сверления быстро падает до нулевого значения при  $T \gg 1$ . Это обусловлено расфокусировкой лазерного пучка, что ведет к уменьшению плотности мощности падающего на биоткань излучения и к остановке процесса формирования кратера.

Эксперименты проводились на установке "Скальпель-1". Источником излучения служил непрерывный  $CO_2$  лазер ЛГИ-703 с максимальной выходной мощностью 30 Вт. Излучение фокусировалось на объект

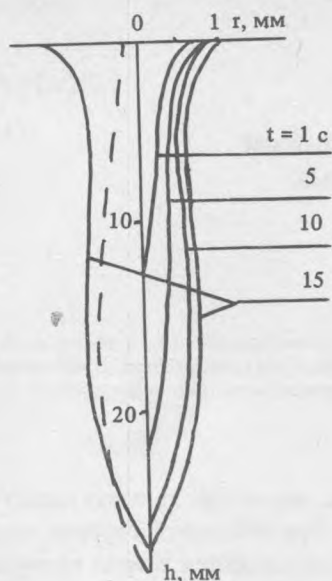


Рис. 3. Сечение кратера биоткани при  $P_0 = 15$  Вт и  $f = 9,5$  см: — экспериментальные данные, - - - расчет по формуле (3).

с помощью германиевых линз с просветлением на 10,6 мкм с фокусными расстояниями 9,5 и 6,2 см. В качестве модели биоматериала была выбрана мякоть картофеля, близкая по своим теплофизическим свойствам к биоткани, которая подвергалась дозированному облучению с последующим измерением глубины и радиуса кратера под микроскопом. На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости глубины и скорости углубления кратера от времени экспозиции лазерного излучения при разных значениях фокусных расстояний линз и мощности излучения. В соответствии с расчетной зависимостью (4) в начале процесса наблюдается быстрый рост кратера, затем скорость падает, и процесс образования кратера практически прекращается; большая скорость сверления наблюдается при использовании длиннофокусной линзы. В условиях эксперимента окончание процесса сопровождается сильным обугливанием до 0,2 мм и некрозом прилегающих к кратеру тканей (зона некроза до 1 мм). Горловина кратера (рис. 3) уширяется из-за теплоотвода и медленного сгорания биоткани при малых плотностях мощности  $P_s < P_{th}$  при  $r > r_{cr}$  на поверхности. На рис. 1 процессу обугливания соответствует область  $T \gg 1$ . Это означает, что путем ограничения экспозиции ( $T < 1$ ) можно избежать термического повреждения биотканей, прилегающих к кратеру.

Таким образом, на основе модели образования кратера сфокусированным лазерным излучением рассчитана зависимость (4), которая хорошо описывает эксперимент и позволяет оптимизировать параметры сфокусированного излучения и режимы его воздействия с целью эффективного и малотравмирующего применения лазерных скальпелей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лазеры в клинической медицине, под. ред. С.Д. Плетнева. М., Медицина, 1981.
2. Halldorsson T., Langerhole J. Appl. Opt., 17, 3948 (1978).
3. Алейников В. С. и др. Электронная промышленность, № 10, вып. 138, 5 (1984).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 17 июня 1987 г.