

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЬНОГО ОБЪЕМА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2008 С.П. Мурзин, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров

Самарский государственный аэрокосмический университет

Проведен расчет температурного поля в пластине из листового титанового сплава ОТ4-1 методом контрольного объема. Показано, что при выбранных распределении мощности поверхностного энергетического источника и скорости перемещения технологического объекта формирующееся температурное поле достаточно однородно. Результаты расчета удовлетворительно коррелируют с результатами экспериментальных исследований (погрешность составляет 10-15%). Полученные данные могут использоваться при выборе режимов термообработки титановых сплавов полосовыми энергетическими источниками.

*Титановый сплав, распределение мощности, энергетический источник, метод контрольного объема, температурное поле, лазерное воздействие, физико-механические свойства, термообработка*

Лазерное излучение с высокой эффективностью применяется в технологии обработки материалов для сварки, резки, термообработки и т.д. При лазерном воздействии наиболее существенными факторами, влияющими на физико-механические свойства материалов, являются значения максимальных температур и скорости нагрева и охлаждения. Для расчета температурных полей при лазерной обработке материалов используют аналитические и численные методы [1-3]. При использовании аналитических методов все случаи нагрева материалов лазерным излучением сводятся к трем основным схемам, учитывающим основные особенности этого процесса: тонкая пластина, полубесконечное тело, многослойные системы. Приближенные аналитические решения дифференциальных уравнений теплопроводности могут использоваться в относительно простых схематизированных моделях для проведения качественного и приближенного количественного анализа тепловых явлений. Возрастающие возможности вычислительных средств обуславливают широкое применение численных методов решения нестационарных трехмерных задач нелинейной теплопроводности. В работах [4, 5] рассмотрены особенности постановки таких задач, а для численного анализа рекомендуется использовать метод конечных разностей. При повышении точности расчета по методике, приведенной в работе [5], объем вычислений значительно возрастает, что требует больших затрат времени и существенного увеличения объема оператив-

ной памяти вычислительных средств.

Значительно ускорить расчеты при экономии ресурсов памяти персонального компьютера позволяет метод контрольного объема. Одним из важных свойств этого метода является точное интегральное сохранение величины энергии на всей расчетной области при любом минимальном числе узловых точек. Метод контрольного объема может быть реализован, например, в программном комплексе STAR-CD, рассчитанном на применение в рамках интегрированной CAE-среды [6].

При расчете температурного поля в материале используем дифференциальное уравнение теплопроводности, записанное в подвижной системе координат с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) - c_v(T) \left( \frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0; \quad (1)$$

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0(x, y, z); \quad (2)$$

$$\text{при } (x, y) \in \Phi, z = 0: \\ -k(T) \frac{\partial T}{\partial z} = A(T)q(x, y); \quad (3)$$

$$\text{при } (x, y) \notin \Phi, z = 0: \\ -k(T) \frac{\partial T}{\partial n_s} \Big|_{ss} = \alpha(T)(T - T_0). \quad (4)$$

Проведем расчет температурного поля в пластине из листового титанового сплава ОТ4-1 толщиной 2 мм, которая перемещается с постоянной скоростью  $v = 0,6 \cdot 10^{-2}$  м/с в положительном направлении оси  $Oy$  в системе координат  $(x, y, z)$ , помещенной в центр энергетического источника мощностью  $Q = 450$  Вт. На поверхность объекта воздействует полосовой энергетический источник с постоянным во времени пространственным распределением мощности, который занимает область  $\phi$  на поверхности исследуемого объекта, ограниченную прямыми:  $x = -a/2$ ;  $x = a/2$ ;  $y = -b/2$ ;  $y = b/2$ , где  $a, b$  – длина и ширина области  $\phi$  соответственно. Распределение мощности энергетического источника определяется выражением [7]:

$$q = \begin{cases} A(T)q(x, y) \text{ при } x \in \left[-\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right] \\ \text{и } y \in \left[-\frac{b}{2}; \frac{b}{2}\right]; \\ 0 \text{ при } x \notin \left[-\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right] \\ \text{и } y \notin \left[-\frac{b}{2}; \frac{b}{2}\right]. \end{cases} \quad (5)$$

Представим  $q(x, y)$  в виде уравнения

$$q(x, y) = q_0 \cdot (a_{n_1} \bar{x}^{-2n_1} + a_{n_1-1} \bar{x}^{-2(n_1-1)} + \dots + a_2 \bar{x}^{-4} + a_1 \bar{x}^{-2} + a_0) \cdot (b_{n_2} \bar{y}^{-2n_2} + b_{n_2-1} \bar{y}^{-2(n_2-1)} + \dots + b_2 \bar{y}^{-4} + b_1 \bar{y}^{-2} + b_0) \cdot v(x, y), \quad (6)$$

где  $q_0$  – плотность мощности в центре энергетического источника;  $\bar{x} = x / (10^{-3} \text{ м})$ ,  $\bar{y} = y / (10^{-3} \text{ м})$  – безразмерные координаты;  $a_{n_1}, a_{n_1-1}, \dots, a_2, a_1, a_0$ ;  $b_{n_2}, b_{n_2-1}, \dots, b_2, b_1, b_0$  – коэффициенты полиномов;  $n_1, n_2$  – целые числа;  $v(x, y)$  – дополнительная функция.

Задача нахождения распределения мощности воздействующего энергетического источника, входящего в граничные условия второго рода, является некорректной. Она решается методом подбора, подробно описанным в работе [8], заключающимся в решении прямых задач с итерациями на каж-

дом шаге. Условием окончания итераций является совпадение с требуемой точностью заданного и полученного на  $\bar{k}$ -той итерации температурных полей, определяемых дискретными значениями температур в точках исследуемого объекта. Таким образом, находим:

$$q(x, y) = q_0 \cdot (-2,4568 \cdot 10^{-7} \bar{x}^{-10} + 2,5128 \cdot 10^{-5} \bar{x}^{-8} - 7,7806 \cdot 10^{-4} \bar{x}^{-6} + 6,8237 \cdot 10^{-3} \bar{x}^{-4} - 1,7760 \cdot 10^{-2} \bar{x}^{-2} + 1,0142) \cdot (-1,0086 \bar{y}^{-6} + 2,7886 \bar{y}^{-4} - 2,7350 \bar{y}^{-2} + 0,9967) [ \text{Вт}/\text{м}^2 ] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{при } q_0 &= 3,7752 \cdot 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2; \\ x &\in [-6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}]; \\ y &\in [-10^{-3} \text{ м}; 10^{-3} \text{ м}]. \end{aligned}$$

Плотность мощности задаем в виде таблицы значений функции  $q(x, y)$ , представленной уравнением (3). Эффективный коэффициент поверхностного поглощения лазерного излучения определяем для поглощающего покрытия на основе метилцеллюлозы и силиката натрия толщиной  $\delta_{\text{покр}} \approx 40$  мкм, рекомендуемого для применения при лазерной термообработке металлических сплавов [1]. Зависимость данного коэффициента от температуры является линейно убывающей от 0,95 при  $T_0 = 293$  К с коэффициентом  $-2,7 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ .

Форма технологического объекта из однородного материала такова, что его ширина  $H_1$  и толщина  $H_2$  не изменяются вдоль траектории движения источника. В этом случае при длительном действии движущегося энергетического источника с неизменным распределением мощности процесс распространения тепла стремится к предельному квазистационарному состоянию [5]. Связанное с энергетическим источником подвижное температурное поле не изменяется со временем, а только перемещается вместе с источником. В период теплонасыщения, то есть от начала действия источника до установления предельного квазистационарного состояния, температура  $T(t)$  произвольной точки иссле-

дуемого объекта в подвижной системе координат, связанной с энергетическим источником, возрастает от  $T_0 = 293$  К до температуры предельного состояния  $T_{пр}$ , которое наступает теоретически при бесконечно длительном действии источника  $t \rightarrow \infty$ .

Если металлический сплав не испытывает полиморфных превращений, то зависимости от температуры коэффициента теплопроводности  $k$  и удельной объемной теплоемкости  $c_v$  носят плавный монотонный характер и могут быть описаны квадратичными полиномами. Для технологических объектов, при нагреве которых происходит структурное превращение, значения  $c_{v0}$ ,  $c_{v1}$ ,  $c_{v2}$  задаются различными для каждого из структурных состояний. При проведении расчетов значения теплофизических свойств материала можно задать в табличном виде. В этом случае значение параметра внутри интервала температур определяется линейной или квадратичной интерполяцией. При решении нелинейной задачи на каждом шаге расчета значения коэффициента теплопроводности  $k$  и удельной объемной теплоемкости  $c_v$  для конечных контрольных объемов уточняются в цикле прямых итераций.

Начальная температура объекта  $T_0 = 293$  К. Количество тепла, выделяемого объектом в окружающую среду, задается коэффициентом теплового сопротивления границы раздела двух сред  $R$ , который в случае принятой схемы нагрева принимает вид:  $R = 1/\alpha_1 + 1/\alpha_2$ , где  $\alpha_1$  – коэффициент полной поверхностной теплоотдачи воздуха,  $\alpha_2$  – коэффициент полной поверхностной теплоотдачи титанового сплава ОТ4-1.

На рис. 1 представлены результаты расчета температурного поля квазистационарного состояния для точек на глубине  $z = H_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  м исследуемого технологического объекта.

При выбранных значениях скорости движения, величины и распределения мощности поверхностного источника для точек исследуемого объекта, принадлежащих  $x \in [-6, 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; 6, 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}]$ , выполняется условие

$$\begin{aligned} \max [T(x, y, z)|_{z=H_2=2 \cdot 10^{-3} \text{ м}}]_y &\geq \\ &\geq (0,93 \dots 0,95) \max [T(x, y, z)|_{z=0}]_y. \end{aligned} \quad (8)$$

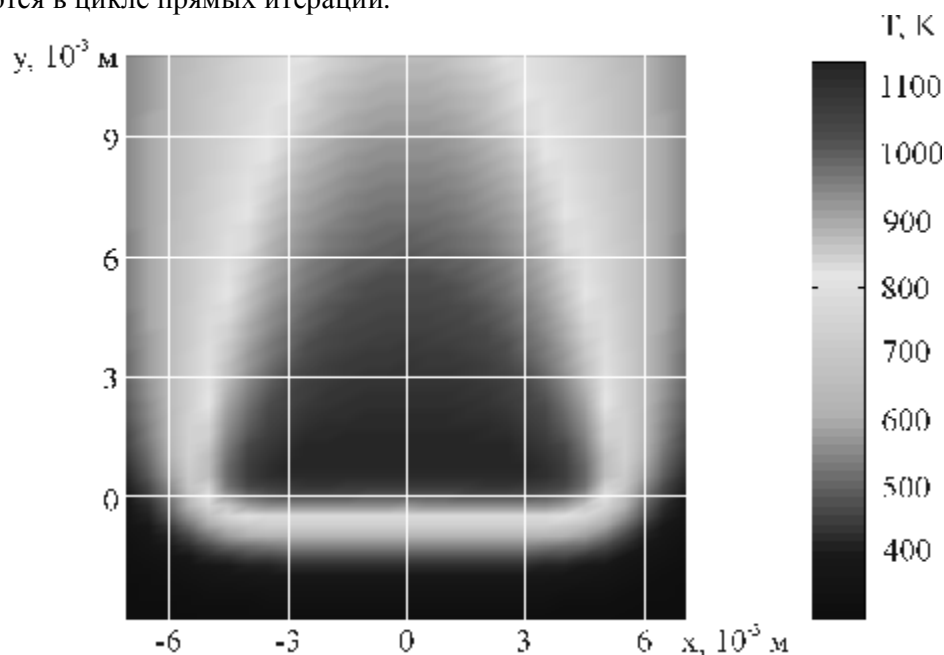


Рис. 1. Температурное поле на глубине  $z = H_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  м технологического объекта из листового титанового сплава ОТ4-1, формирующееся при движении поверхностного энергетического источника (3) мощностью  $Q = 450$  Вт ( $q_0 = 3,7752 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>) с постоянной линейной скоростью  $u = 0,6 \cdot 10^{-2}$  м/с

Вследствие достаточно низкой теплопроводности титановых сплавов лазерная обработка с обеспечением условия относительно равномерного прогрева по толщине листового материала (8) может быть реализована в основном для тонких заготовок толщиной до  $H_2 = (3...4) \cdot 10^{-3}$  м. Максимальная температура  $T$  вдоль линии перемещения энергетического источника имеет место при  $y \approx 1,08 \cdot 10^{-3}$  м, т.е. через  $t \approx 0,18$  с после прохождения центра источника над расчетной точкой. При воздействии энергетического источника (3) величина максимальной температуры в центре зоны термического влияния равна  $\max[T(x=0, y, z)]_{z=H_2} = 1134$  К.

Результаты расчета скоростей нагрева и охлаждения рассматриваемого технологического объекта приведены на рис. 2. Максимальная скорость нагрева точек на обратной стороне технологического объекта составляет  $v_n \approx 2,5 \cdot 10^3$  К/с. Скорость охлаждения в диапазоне значений температур от

$T = 1050$  К до  $T = 770$  К составляет  $v_{охл} \approx 10^2...4 \cdot 10^2$  К/с. Наиболее интенсивно прогреваются области, лежащие вблизи центра энергетического источника. Кривые, характеризующие скорость нагрева областей, удаленных от центра лазерного воздействия, имеют значительно более пологие максимумы. Динамика кривых охлаждения такова, что центральная зона технологического объекта охлаждается практически с постоянной скоростью, в то время как скорость теплоотвода по краям зоны энергетического воздействия возрастает с течением времени. При таких условиях отжига в центральной области зоны термического влияния материал изменяет исходную волокнистую структуру на зернистую, представленную  $\alpha$ -фазой и небольшим количеством  $\beta$ -фазы. Такая термообработка обеспечивает улучшение штампуемости листового конструкционного материала при гибке.

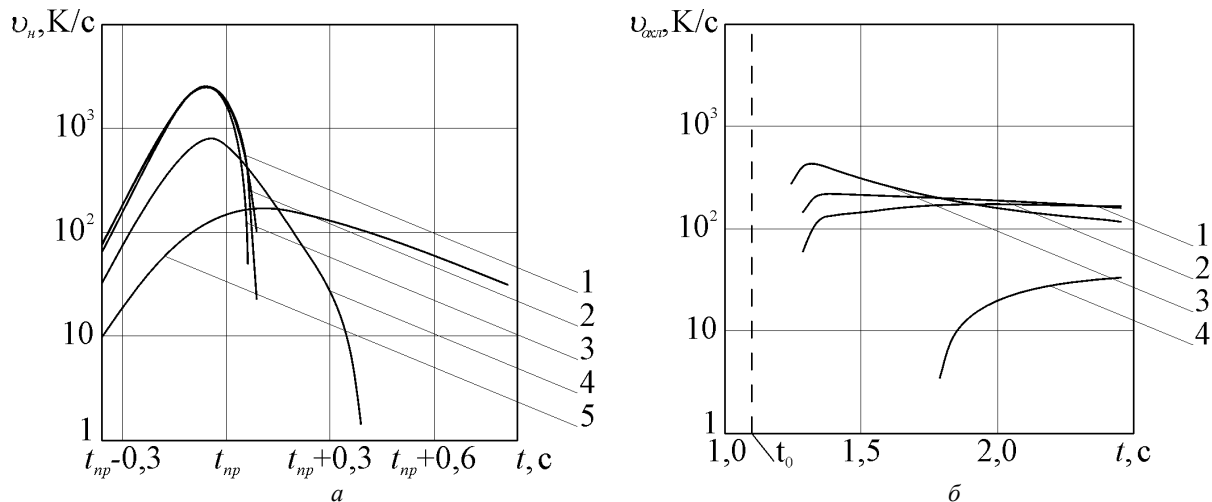


Рис. 2. Скорости нагрева  $v_n$  (а) и охлаждения  $v_{охл}$  (б) на глубине  $z = H_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  м технологического объекта из листового титанового сплава ОТ4-1.  $x, 10^{-3}$  м: 1 – 0; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 6; 5 – 8.  $t_{np}$  – момент прохождения центральной части лазерного пятна над расчетным сечением

Результаты расчета максимальных температур, достигаемых на глубине  $z = H_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  м технологического объекта из титанового сплава ОТ4-1 вдоль линии движения энергетического источника (3) приведены на рис. 3. До максимальных тем-

ператур свыше 1100 К прогревается область  $x \approx \pm 3$  мм. Эта область определяет зону максимального термического воздействия на технологический объект. Изотермы максимальных температур, достигаемых в начале действия поверхностного энергетического источника (3) в ходе термических циклов на-

грева на глубине  $z = H_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  м исследуемого объекта представлены на рис. 4. При  $x = \pm 4 \cdot 10^{-3}$  м:

$$\max[T(x = \pm 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}, y, z)|_{z=H_2}]_y = 1074 \text{ К.}$$

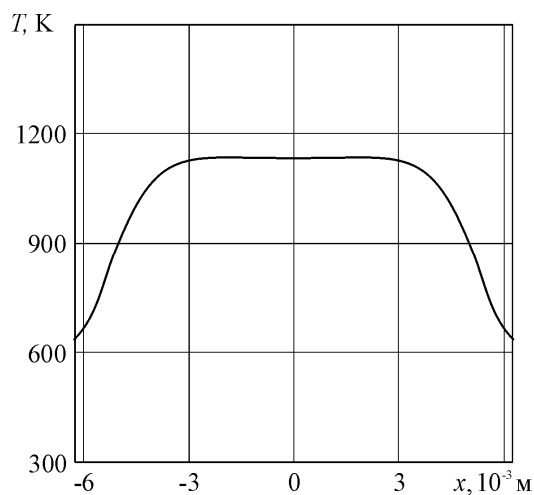


Рис. 3. Максимальные температуры, достигаемые в ходе термических циклов нагрева на глубине  $z = H_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  м технологического объекта из листового титанового сплава ОТ4-1 вдоль линии движения энергетического источника мощностью  $Q = 450 \text{ Вт}$ ,  $q_0 = 3,7752 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$  с постоянной линейной скоростью  $u = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$

Результаты расчета температурного поля в обрабатываемом материале при воздействии движущегося со скоростью  $v = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$  распределенного поверхностного источника энергии для конструкционного титанового сплава ОТ4-1 удовлетворительно коррелируют с результатами экспериментальных исследований (погрешность составляет 10-15%).

### Заключение

Построена математическая модель формирования температурных полей в зоне обработки для движущегося полосового энергетического источника. На основании дифференциального уравнения теплопроводности проведен расчет температурного поля, формирующегося в титановом сплаве ОТ4-1 с учетом реальной геометрии техно-

Ширина изотермы  $T = 1050 \text{ К}$  составляет  $b_{T=1050 \text{ К}} = 8,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Технологический объект подвергается достаточно равномерному термическому воздействию не только по ширине зоны термического влияния, но в направлении оси, вдоль которой происходит перемещение.

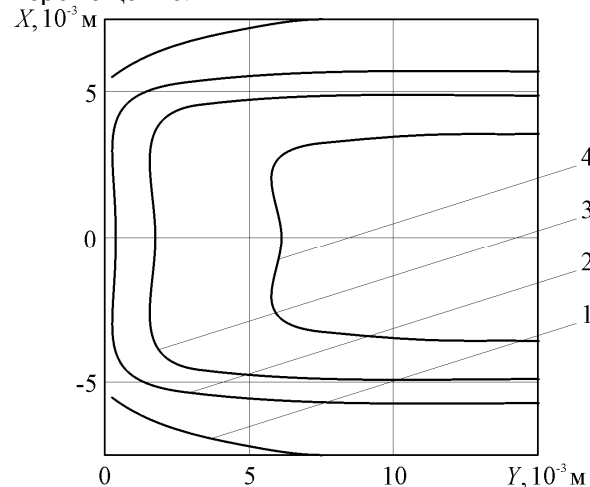


Рис. 4. Изотермы максимальных температур, достигаемых в начале действия энергетического источника (3) в ходе термических циклов нагрева на глубине  $z = H_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  м исследуемого объекта из листового титанового сплава ОТ4-1. Скорость движения энергетического источника (3) –  $u = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ . T, К: 1 – 500; 2 – 700; 3 – 900; 4 – 1100. (ХОУ – система координат, связанная с объектом)

логического объекта. Для решения дифференциального уравнения теплопроводности проведена его дискретизация методом контрольного объема.

Результаты расчета позволили определить распределение температуры по поверхности технологического объекта, а также установить, что формирующееся температурное поле достаточно однородно по всей длине излучения полосового энергетического источника, за исключением переходных зон вблизи краев  $(\pm 1 \dots 2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Взаимное перемещение источника излучения и технологического объекта при низкой теплопроводности титанового сплава ОТ4-1 приводит также к однородности температурного поля в поперечном направлении. Обработка поверхности полосовым энергетическим источником имеет ряд технологических преимуществ. В этом случае, как показывают расче-

ты, отдельные зоны лазерного воздействия, в которых достигается одна и та температура располагаются параллельно поверхности. То есть, полосовой тепловой источник позволяет обеспечить наиболее однородное распределение температуры по обработанной поверхности.

#### Библиографический список

1. Технологические лазеры: Справочник: В 2 т. Т. 1: Расчет, проектирование и эксплуатация [текст] / Под ред. Г.А. Абилюсеева – М.: Машиностроение, 1991. – 432 с.
2. Гуреев, Д.М. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов. [текст] / Д.М. Гуреев, С.В. Ямщиков – Самара, 2001. – 392 с.
3. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [текст] / С. Патанкар – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
4. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 6. Основы лазерного термоупрочнения сплавов: Учеб. пособие для вузов [текст] / Под ред. А.Г. Григорьянца – М.: Высш. шк., 1988. – 159 с.
5. Григорьянец, А.Г. Основы лазерной обработки материалов. [текст] / А.Г. Григорьянец – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
6. Руководство по применению STAR-CD version 3.10B (Вводный курс). [текст] – М.: CAD-FEM, 2001. – 882 с.
7. Мурзин, С.П. Расчет пространственного распределения мощности лазерного излучения для формирования требуемого энергетического воздействия [текст] / С.П. Мурзин, С.Ю. Ключков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2005. – Т. 7, № 2. – С. 483-488.
8. Алифанов, О.М. Обратные задачи теплообмена [текст] / О.М. Алифанов – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.

#### Сведения об авторах

**Мурзин Сергей Петрович**, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, профессор, доктор технических наук, доцент, [murzin@ssau.ru](mailto:murzin@ssau.ru). Область научных интересов: взаимодействие лазерного излучения с веществом, нанотехнологии.

**Меженин Андрей Викторович**, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, аспирант, [murzin@ssau.ru](mailto:murzin@ssau.ru). Область научных интересов: взаимодействие лазерного излучения с веществом, нанотехнологии.

**Осетров Евгений Леонидович**, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, студент, [murzin@ssau.ru](mailto:murzin@ssau.ru). Область научных интересов: взаимодействие лазерного излучения с веществом, нанотехнологии.