

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629:784

doi: 10.18698/0536-1044-2020-12-50-61

## Анализ динамики лазерной 2D-резки крупногабаритного объекта космического мусора в невесомости

**С.В. Аринчев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Dynamics Analysis of Laser 2D Cutting of a Large Space Debris Object Under Zero-Gravity Conditions

**S.V. Arinchev**

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены два независимых объекта, совершающих движение по околоземной орбите. Первый из них представляет собой крупногабаритный объект космического мусора, содержащий фрагменты, подлежащие извлечению с целью повторного использования. Второй объект — космический мусоросборщик с лазером, мощность которого достаточна для разрушения любого элемента конструкции объекта космического мусора за бесконечно малое время. Время включения и выключения лазерного луча принято бесконечно малым. Предполагалось, что объекты движутся по близким траекториям, разница скоростей их движения мала. Объект космического мусора защищает себя от резки закручиванием (путем включения двигателей ориентации). Для анализа динамики лазерной резки объекта космического мусора в невесомости применен метод частиц. В 2D-постановке режущий луч заменялся режущей точкой. Главное в работе — не обеспечение соответствия расчетной модели реальному изделию, а формулировка условий резки (деактивации) связей между частицами. В условиях невесомости опоры нет, прицеливание затруднено, поэтому использована хаотичная резка по площадям. Для обеспечения целостности вырезаемых фрагментов мусора их окружали виртуальными окружностями. Положение окружностей отслеживалось. Как только режущая точка попадала внутрь окружности, лазер мгновенно отключался.

**Ключевые слова:** лазерная резка, космический мусор, прицеливание в невесомости

In this paper two independent objects in low-earth orbit are analysed. The first object is a large piece of space debris containing fragments that need to be extracted and re-used. The second object is a space debris collector equipped with a laser powerful enough to destruct any element of the space debris in an infinitely small period of time. It is accepted that the switch on and switch off times of the laser beam are infinitely small. It is supposed that the objects are moving in near orbits and the difference between their velocities is small. The object protects itself by applying attitude jets and turning the structure round. The particle

method is used to analyze the dynamics of laser cutting of a piece of space debris under zero gravity. In the 2D formulation, the cutting beam is replaced by a cutting dot. The objective in the work was not ensuring conformity between the calculated model and the real part but rather formulating the cutting conditions (deactivation) of the links between the particles. Aiming is problematic under gravity-free conditions, hence random cutting was used. To ensure integrity of the cut-out debris fragments, they were encircled by virtual circumferences and the circumferences' positions were tracked. As soon as the cutting point entered the circle, the laser was immediately switched off.

**Keywords:** laser cutting, space debris, aiming in gravity-free operation

Рассмотрена ситуация, когда целевые захваты-ваемые фрагменты космического мусора (КМ) представляют собой встроенные блоки крупногабаритного космического объекта. Эти блоки сначала надо вырезать лазером, а затем захватить специальным спутником-мусоросборщиком.

Детальный обзор конструкций спутников-мусоросборщиков дан в книге [1]. Перспективы использования лазеров в космосе рассмотрены в работе [2]. Лазерная техника интенсивно развивается. Разработано большое количество устройств лазерной резки [3, 4]. Лазерные устройства обладают широкими возможностями и высокой производительностью [5].

Конструкции космических аппаратов выполнены из различных материалов. Важно учитывать, что неодинаковые материалы взаимодействуют с лазерным лучом по-разному. Имеется информация об особенностях лазерной резки армированных углеродным волокном пластиков (CFRP) [6, 7], стеклопластиков [8, 9], сапфировых пластин [10], порошковых металлических материалов [11], стальных пластин [12] и т. п.

При лазерной резке очень важно правильно организовать движение лазерной головки. Описанные в научной литературе (например, в работах 13–15) исследования движения лазерной головки предполагают наличие твердой устойчивой опоры.

К этому же классу относятся исследования движения рабочих головок роботизированных устройств намотки волокон [16]. Для работы в невесомости такие устройства непригодны. Важные результаты получены в публикациях [17, 18] по изучению движения роботизированных устройств захвата фрагментов КМ.

Рассмотрим динамический процесс лазерной резки в невесомости. Имеются два космических тела: крупногабаритный объект КМ и космический мусоросборщик с лазером. Из объекта КМ лазер вырезает два фрагмента.

Объект КМ и мусоросборщик произвольно вращаются. В этих условиях очень трудно представить себе поверхность резания, образуемую на твердом теле лазерным лучом.

Для решения рассматриваемой задачи лазерной резки целесообразно отказаться от использования понятия твердого тела и воспользоваться методом частиц (рис. 1).

Исторически древние люди понимали, что все в природе состоит из частиц, движущихся поступательно. Но компьютеров не было, посчитать движения отдельных частиц они не могли. По этой причине (*от безысходности*) они стали рассматривать движение совокупностей частиц, все суммировать, перешли к понятию твердого тела и его интегральным характеристикам типа тензора инерции. Вместе с понятием твердого тела появилось понятие его вращательного движения.

Вращательное движение — это свойство совокупности частиц, движущихся поступательно. Состояние *безысходности* продолжалось очень долго до появления компьютеров. Тем временем идея вращательного движения твердого тела развивалась. Появились понятия кватернионов [19] и даже бикватернионов [20].

Но для задач анализа динамики лазерной резки в невесомости такой путь тупиковый. **Нужно вернуться назад к частицам** (указано стрелкой на рис. 1), и задача лазерной резки резко упростится. Тогда лазерная резка — это проблема активации (деактивации, резки) связей между частицами. Вращательное движение исключается из рассмотрения.

В работах, посвященных методу частиц, показано, что имеет место высокая скорость сходимости результатов расчета по их числу. Так, для инженерных расчетов достаточно взять 3000...5000 частиц, а для тестовых задач (таких как рассматриваемая в данной статье) — нескольких десятков частиц.

Цель работы — не обеспечение соответствия расчетной модели реальному изделию, а фор-

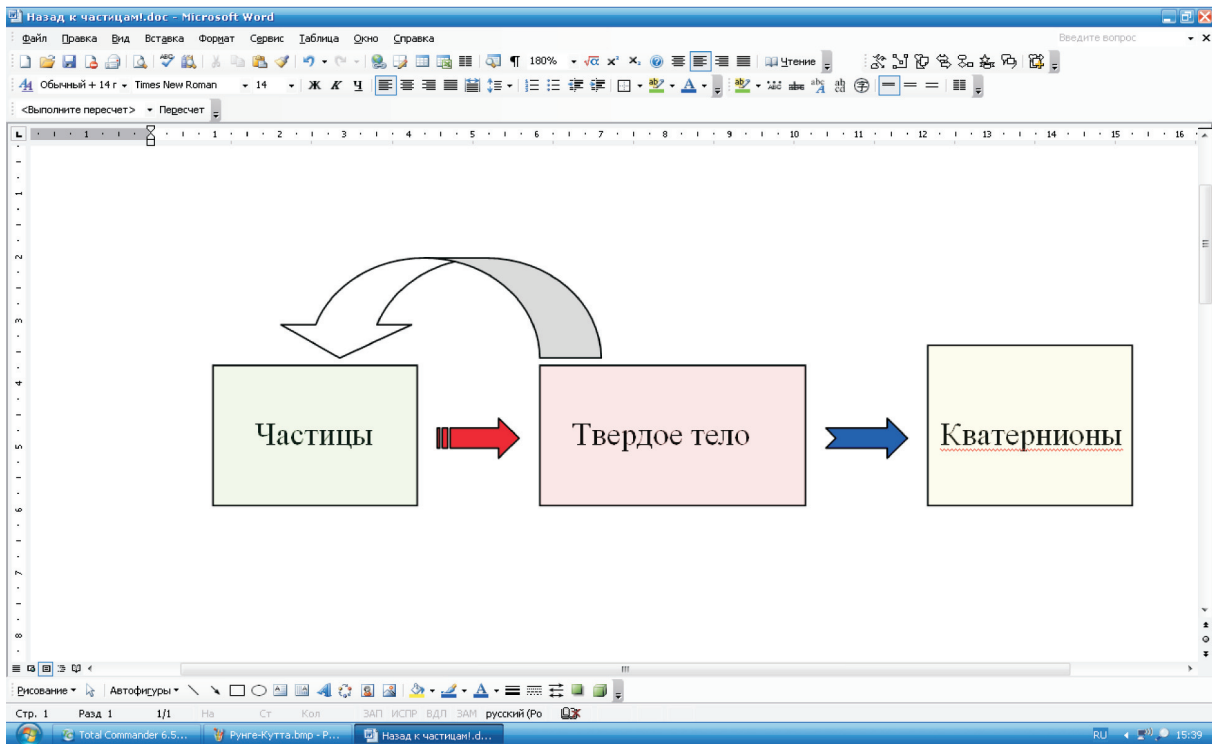


Рис. 1. Понятия, используемые для решения задачи лазерной резки в невесомости

мулирование условий резки (деактивации) связью между частицами.

Процесс прицеливания в невесомости затруднительный. Так, в соответствии с известными теоремами механики при развороте лазерной пушки разворачивается и весь спутник-мусоросборщик. Поэтому здесь предлагается отказаться от прицеливания совсем. Принято, что лазер работает хаотично, по площадям. Задача решена в 2D-постановке. Понятие режущего луча заменено режущей точкой.

Целевые захватываемые фрагменты КМ должны оставаться целыми. Будем считать, что лазер может мгновенно включаться и отключаться. Целевой захватываемый фрагмент КМ окружается пограничной окружностью, которая отслеживается. Как только режущая точка попадает внутрь пограничной окружности, лазер отключается.

Полученные результаты анализа динамики лазерной резки позволяют сформулировать дополнительные требования к конструкции спутника-мусоросборщика.

**Уравнения динамики лазерной резки упругой конструкции.** Для решения задачи лазерной резки упругой конструкции затруднительно использовать модель твердого тела [19, 20]. Ги-

потеза непрерывности деформирования не работает, поэтому применен метод частиц.

Частицы — это материальные точки. Они движутся только поступательно, их относительные смещения являются большими. Система — геометрически нелинейна. Связи — упругие. С течением времени связи могут быть деактивированы. Трение не учитывается.

Рассматриваемые модели крупногабаритного объекта КМ и мусоросборщика приведены на рис. 2. Начальные расстояния между частицами

$$d_{0ij} = \sqrt{(x_{0j} - x_{0i})^2 + (y_{0j} - y_{0i})^2}, \quad i, j = 1, \dots, 17.$$

Текущие расстояния между частицами

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}, \quad i, j = 1, \dots, 17.$$

Деформации упругих связей

$$\Delta_{ij} = d_{ij} - d_{0ij}.$$

Пусть  $\mathbf{q}$  — бинарная матрица признаков целостности упругих связей,  $\mathbf{q} = |q_{ij}|$ ,  $i, j = 1, \dots, 17$ . Если  $q_{ij} = 1$ , то связь активирована. Если  $q_{ij} = 0$ , то связь деактивирована (разрезана). Процесс деактивации связей моделирует процесс лазерной резки. Связи деактивируются при выполнении необходимых условий.

Уравнения динамики резки крупногабаритного объекта КМ для соответствующих компонентов векторов координат  $\mathbf{x}(t) = (x_1, \dots, x_{17})$  и  $\mathbf{y}(t) = (y_1, \dots, y_{17})$  имеют следующий вид (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i &= \frac{c_1}{m_1} \sum_{\substack{j=5 \\ i \neq j}}^{16} q_{ij} \Delta_{ij} \cos \varphi_{ij}; \\ \ddot{y}_i &= \frac{c_1}{m_1} \sum_{\substack{j=5 \\ i \neq j}}^{16} q_{ij} \Delta_{ij} \sin \varphi_{ij}, \quad i = 5, \dots, 16, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $c_1$  — жесткость упругих связей;  $m_1$  — масса частиц;

$$\cos \varphi_{ij} = \frac{x_j - x_i}{d_{ij}}; \quad \sin \varphi_{ij} = \frac{y_j - y_i}{d_{ij}}.$$

Уравнения динамики мусоросборщика для соответствующих компонентов векторов координат  $\mathbf{x}(t) = (x_1, \dots, x_{17})$  и  $\mathbf{y}(t) = (y_1, \dots, y_{17})$  имеют следующий вид (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \frac{c_2}{m_2} (\Delta_{12} \cos \varphi_{12} + \Delta_{13} \cos \varphi_{13} + \Delta_{14} \cos \varphi_{14}); \\ \ddot{x}_2 &= \frac{1}{m_2} (c_2 \Delta_{21} \cos \varphi_{21} + c_2 \Delta_{23} \cos \varphi_{23} + \\ &+ c_2 \Delta_{24} \cos \varphi_{24} + c_3 \Delta_{2,17} \cos \varphi_{2,17}); \\ \ddot{x}_3 &= \frac{1}{m_2} (c_2 \Delta_{31} \cos \varphi_{31} + c_2 \Delta_{32} \cos \varphi_{32} + \\ &+ c_2 \Delta_{34} \cos \varphi_{34} + c_3 \Delta_{3,17} \cos \varphi_{3,17}); \\ \ddot{x}_4 &= \frac{c_2}{m_2} (\Delta_{41} \cos \varphi_{41} + \Delta_{42} \cos \varphi_{42} + \Delta_{43} \cos \varphi_{43}); \\ \ddot{y}_1 &= \frac{c_2}{m_2} (\Delta_{12} \sin \varphi_{12} + \Delta_{13} \sin \varphi_{13} + \Delta_{14} \sin \varphi_{14}); \quad (2) \\ \ddot{y}_2 &= \frac{1}{m_2} (c_2 \Delta_{21} \sin \varphi_{21} + c_2 \Delta_{23} \sin \varphi_{23} + \\ &+ c_2 \Delta_{24} \sin \varphi_{24} + c_3 \Delta_{2,17} \sin \varphi_{2,17}); \\ \ddot{y}_3 &= \frac{1}{m_2} (c_2 \Delta_{31} \sin \varphi_{31} + c_2 \Delta_{32} \sin \varphi_{32} + \\ &+ c_2 \Delta_{34} \sin \varphi_{34} + c_3 \Delta_{3,17} \sin \varphi_{3,17}); \\ \ddot{y}_4 &= \frac{c_2}{m_2} (\Delta_{41} \sin \varphi_{41} + \Delta_{42} \sin \varphi_{42} + \Delta_{43} \sin \varphi_{43}), \end{aligned}$$

где  $c_2, c_3$  — жесткости упругих связей;  $m_2, m_3$  — массы частиц;

$$\cos \varphi_{ij} = \frac{x_j - x_i}{d_{ij}}; \quad \sin \varphi_{ij} = \frac{y_j - y_i}{d_{ij}}, \quad i, j = 1, \dots, 17.$$

Уравнения динамики лазерной головки для соответствующих компонентов векторов коор-

динат  $\mathbf{x}(t) = (x_1, \dots, x_{17})$  и  $\mathbf{y}(t) = (y_1, \dots, y_{17})$  имеют следующий вид (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{17} &= \frac{c_3}{m_3} (\Delta_{17,2} \cos \varphi_{17,2} + \Delta_{17,3} \cos \varphi_{17,3}); \\ \ddot{y}_{17} &= \frac{c_3}{m_3} (\Delta_{17,2} \sin \varphi_{17,2} + \Delta_{17,3} \sin \varphi_{17,3}). \end{aligned} \quad (3)$$

Рассматриваемая плоская задача — это геометрически нелинейная задача Коши с начальными условиями. Для расчета приняты следующие начальные условия интегрирования уравнений (4)–(6):

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(0) &= (7, 5, 15, 12, 0, -2, 3, 4, 3, 5, 9, 11, 8, 13, \\ &14, 12, 14, 5), \text{ м}; \\ \dot{\mathbf{x}}(0) &= (0, \dots, 0); \\ \mathbf{y}(0) &= (3, 0, 1, 4, 10, 15, 20, 12, 14, 18, 8, 13, 16, \\ &11, 17, 19, 0, 95), \text{ м}; \\ \dot{\mathbf{y}}(0) &= (-10, 0, 0, 10, -50, \dots, 50, 0, 0, 0), \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (4)$$

В начальный момент времени упругие связи недеформированы. Система уравнений (1)–(3) с начальными условиями (4) — это уравнения динамики лазерной резки упругой конструкции.

Объект КМ может совершать пассивный полет (не реагируя на действия спутника-мусоросборщика) и активно маневрировать при его приближении и проведении лазерной резки. Вариантов защиты много. В рассматриваемом случае объект КМ защищает себя от внешнего воздействия разворотом.

Красные стрелки на рис. 2 показывают начальные скорости частиц № 5 и 14 объекта КМ. Это возмущения, обусловленные включением двигателей ориентации. Для выбранных исходных данных время полного разворота объекта равно примерно 5 с. Синие стрелки показывают начальные скорости частиц № 1 и 4 мусоросборщика.

Через некоторое время, т. е. на пятитысячном шаге интегрирования системы уравнений (1)–(4), происходит противоположное скачкообразное изменение этих скоростей. Это включают двигатели ориентации. Лазерная головка (частица № 17) не имеет поперечного подкрепления, поэтому включение двигателей ориентации спутника инициирует ее хаотическое движение вокруг частицы № 3 мусоросборщика (рис. 3, а).

В рассматриваемой плоской задаче понятие режущего луча заменено режущей точкой (не-

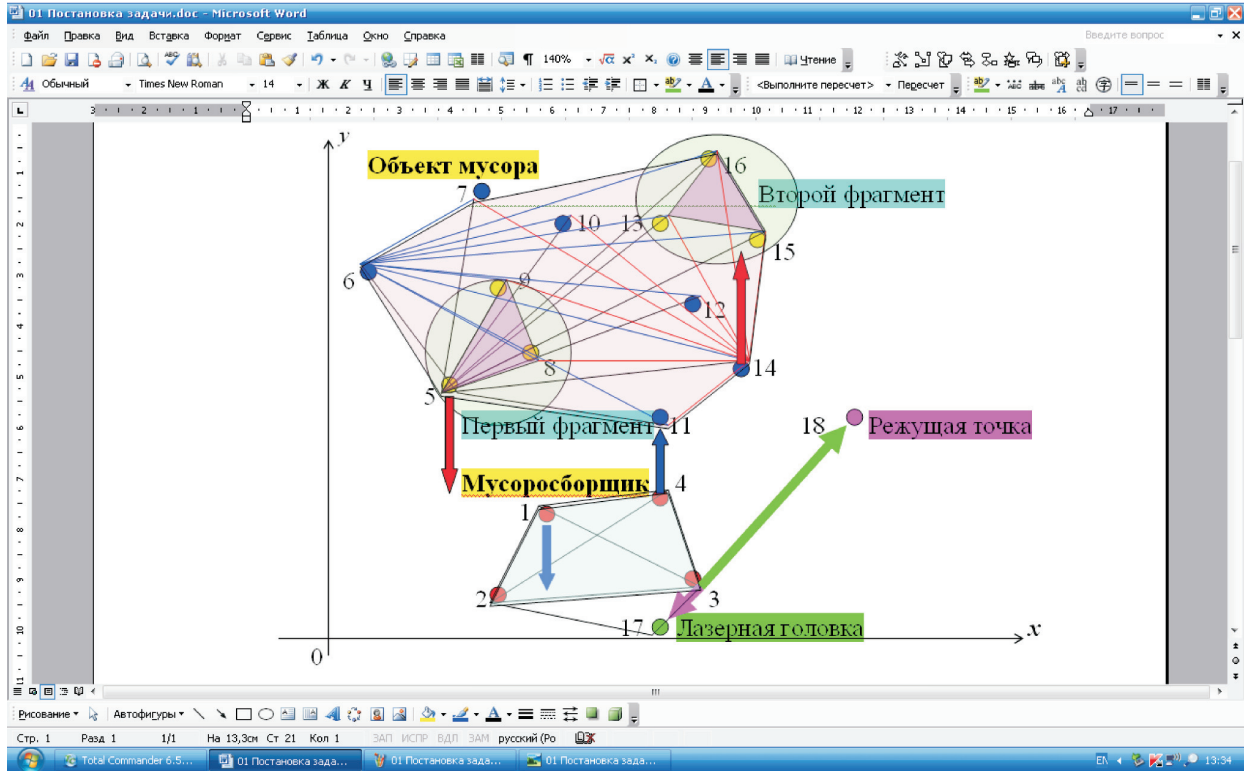


Рис. 2. Пример моделирования упругой конструкции крупногабаритного объекта КМ и мусоросборщика методом частиц

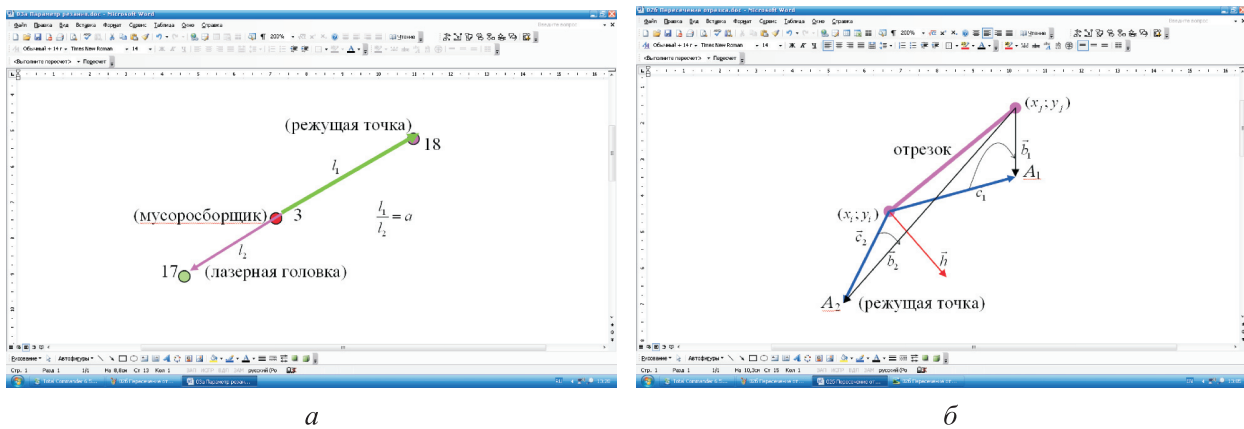


Рис. 3. Схемы, поясняющие понятие параметра резания (а) и условие пересечения отрезка (б)

весомой частицей № 18). На рис. 3, а в рассмотрение введен параметр резания

$$a = l_1/l_2 \approx 3...5,$$

где  $l_1$  и  $l_2$  — расстояние от режущей точки и лазерной головки до точки крепления лазера на мусоросборщике.

Параметр резания показывает, во сколько раз расстояние  $l_1$  больше расстояния  $l_2$ . Режущая точка, лазерная головка и частица № 3 лежат на одной прямой. Из рис. 3, а следует, что

$$\frac{y_{18} - y_3}{x_{18} - x_3} = \frac{y_3 - y_{17}}{x_3 - x_{17}} = k;$$

$$\frac{x_{18} - x_3}{x_3 - x_{17}} = a.$$

Таким образом, положение режущей точки (невесомой частицы № 18) однозначно определяется положением лазерной головки:

$$x_{18} = x_3 + a(x_3 - x_{17});$$

$$y_{18} = y_3 + k(x_{18} - x_3).$$

**Условия деактивации (резки) связей между частицами.** Рассматриваемый крупногабаритный объект КМ (см. рис. 2) имеет 66 упругих связей, каждая из которых деактивирована (разрезана режущей точкой). Если связь деактивирована, то активировать ее повторно нельзя. Связь между частицами геометрически представлена отрезком, соединяющим данные частицы.

Положение режущей точки относительно каждой связи и необходимость ее деактивации проверяется на каждом шаге численного интегрирования. Для режущей точки проверяются три условия: пересечения отрезка, а не прямой (лежащей на данном отрезке); попадания внутрь пограничной окружности (условие сохранения целым вырезаемого фрагмента КМ); деактивации связи.

Условие пересечения отрезка, а не прямой проиллюстрировано на рис. 3, б. Режущая точка может находиться в двух возможных положениях:  $A_1$  и  $A_2$ . Рассмотрим взаимное положение векторов  $\mathbf{c}_1$  и  $\mathbf{b}_1$ . В непосредственной окрестности отрезка угол между этими векторами тупой, т. е. их скалярное произведение

$$\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{b}_1 < 0. \quad (5)$$

Это есть условие пересечения отрезка, а не прямой. Если режущая точка находится в положении  $A_2$  (угол между векторами острый), и  $\mathbf{c}_2 \cdot \mathbf{b}_2 > 0$ , то связь деактивировать нельзя. Пусть  $\mathbf{c}_1 = (x_{18} - x_i; y_{18} - y_i)$  и  $\mathbf{b}_1 = (x_{18} - x_j; y_{18} - y_j)$ . Тогда условие пересечения отрезка, а не прямой (5) принимает окончательный вид

$$(x_{18} - x_i)(x_{18} - x_j) + (y_{18} - y_i)(y_{18} - y_j) < 0. \quad (6)$$

Если условие (6) не выполнено, то нет смысла проверять прочие условия.

Условие попадания режущей точки внутрь пограничной окружности проиллюстрировано на рис. 4, а. При хаотической резке крупногабаритного объекта КМ важно сохранить целыми два вырезаемых фрагмента. На рис. 2 эти фрагменты представляют собой треугольники с вершинами 5–8–9 и 13–15–16. В невесомости опоры нет, прицелиться нельзя. Зато лазер можно мгновенно включить и мгновенно отключить. Вырезаемый фрагмент КМ помещается внутрь виртуальной пограничной окружности. Положение окружности отслеживается. Никакие упругие связи внутри пограничной окружности не могут быть деактивированы.

Из рис. 3, а следует, что центр пограничной окружности треугольника имеет следующие координаты:

$$x_0 = \frac{x_i + x_j + x_k}{3}; \quad y_0 = \frac{y_i + y_j + y_k}{3}.$$

Расстояния от центра пограничной окружности до вершин треугольника определяются следующими выражениями:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2};$$

$$R_j = \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2};$$

$$R_k = \sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2}.$$

Радиус пограничной окружности выбирается с запасом  $\Delta$ :

$$R = R_{\max} + \Delta,$$

где

$$R_{\max} = \max(R_i, R_j, R_k).$$

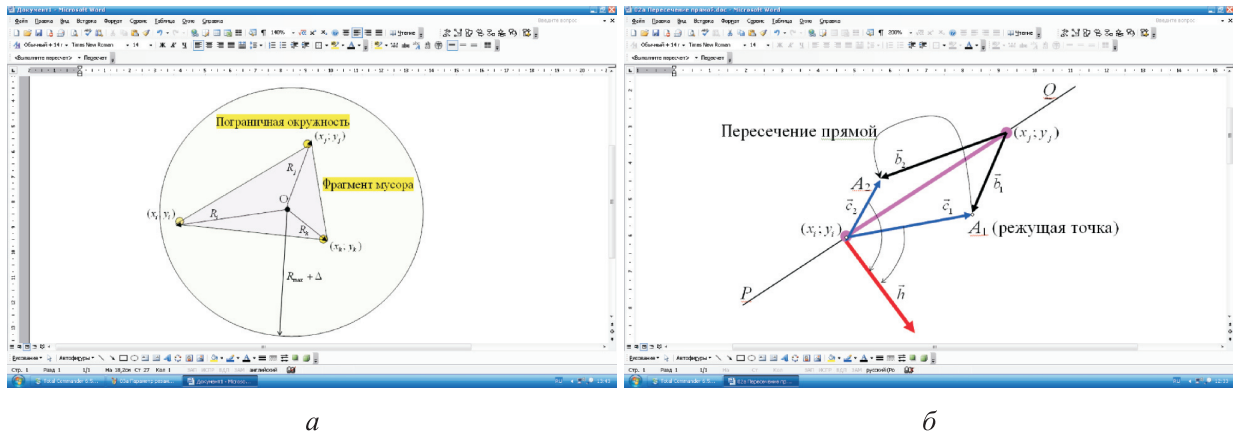


Рис. 4. Схемы, поясняющие условия попадания режущей точки внутрь пограничной окружности (а) и деактивации связи (б)



Условие попадания режущей точки внутрь пограничной окружности имеет вид

$$d_{18,0} < R,$$

где  $d_{18,0}$  — расстояние от режущей точки до центра пограничной окружности,

$$d_{18,0} = \sqrt{(x_{18} - x_0)^2 + (y_{18} - y_0)^2}.$$

Условие деактивации связи (т. е. условие резки) проиллюстрировано на рис. 4, б. Рассмотрено взаимное положение вектора  $\mathbf{c}$ , определяющего положение режущей точки, и вектора нормали  $\mathbf{h}$  к отрезку. Режущая точка пересекает прямую  $PQ$  и из положения  $A_1$  переходит в положение  $A_2$ . Угол между векторами  $\mathbf{c}_1$  и  $\mathbf{h}_1$  — острый. Их скалярное произведение положительно:

$$\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{h}_1 > 0,$$

где

$$\mathbf{c}_1 = (x_{18} - x_i; y_{18} - y_i); \quad \mathbf{h} = \left( \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}; -1 \right).$$

На рис. 4, б угол между векторами  $\mathbf{c}_2$  и  $\mathbf{h}$  тупой. Их скалярное произведение отрицательно:

$$\mathbf{c}_2 \cdot \mathbf{h} < 0.$$

Критерием деактивации связи между частицами является смена знака скалярного произведения

$$\mathbf{c} \cdot \mathbf{h} = \frac{(x_{18} - x_i)(y_j - y_i)}{x_j - x_i} - (y_{18} - y_i). \quad (7)$$

Чтобы отследить эту смену знака, в программе следует сохранять предшествующее значение этого скалярного произведения и все время его обновлять. В начальный момент времени скалярное произведение неизвестно. Это начальное значение можно считать равным нулю.

**Результаты расчета.** Вычисления проведены при следующих параметрах расчетной схемы:  $c_1 = 30$  Н/м;  $c_2 = 100$  Н/м;  $c_3 = 30$  Н/м;  $m_1 = 0,01$  кг;  $m_2 = 2$  кг;  $m_3 = 1$  кг,  $a = 3$ . На рис. 5 розовым цветом показан след режущей точки, зеленым — след лазерной головки. Видно, что лазерная резка — это интенсивный динамический процесс. Лазерная головка движется хаотически и рубит все подряд. Рассматриваемая продолжительность процесса — 15 с. Вырезанные фрагменты КМ улетают вниз и вправо.

Программа расчета написана на языке Фортран. Важный элемент вычислительного

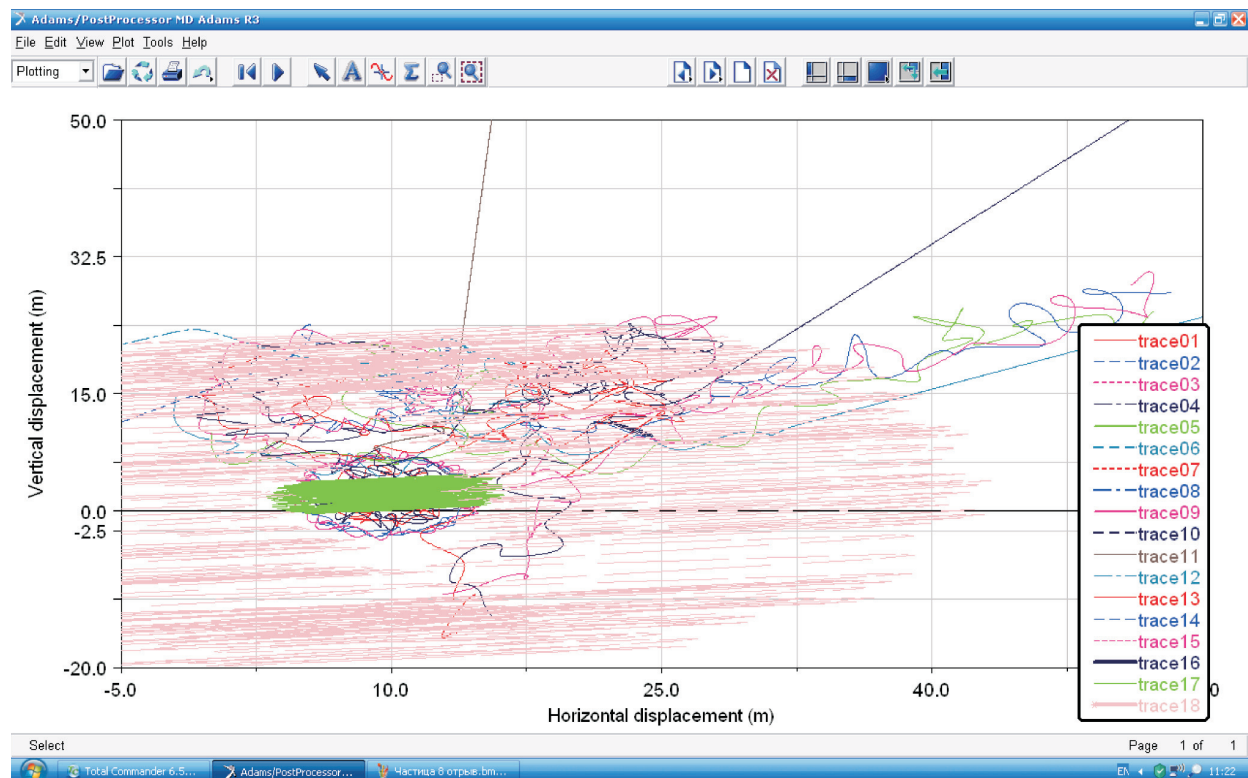


Рис. 5. Картина лазерной резки

алгоритма — формирование матрицы учета деактивированных связей. В начальный момент времени крупногабаритный объект КМ (см. рис. 2) имел 66 связей.

На рис. 6 красной стрелкой показано, что в момент времени 9.148040 с оставались 22 активных связи. Затем деактивировалась связь

между частицами № 6 и 2. Скалярное произведение (7) поменяло знак и стало равным  $-10.930990$ . И так далее. Наконец, в момент времени 12.193540 осталось только 6 связей. Это связи двух вырезанных треугольников 5–8–9 и 13–15–16. Процесс лазерной резки крупногабаритного объекта КМ закончился.

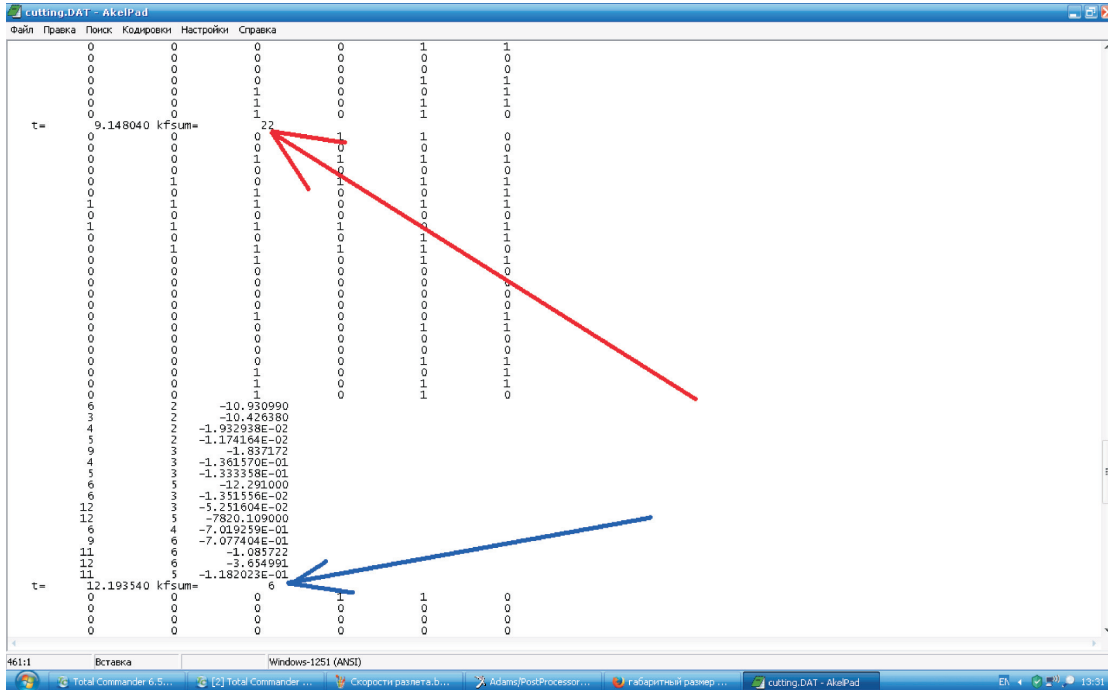


Рис. 6. Окно файла cutting.dat учета деактивированных связей

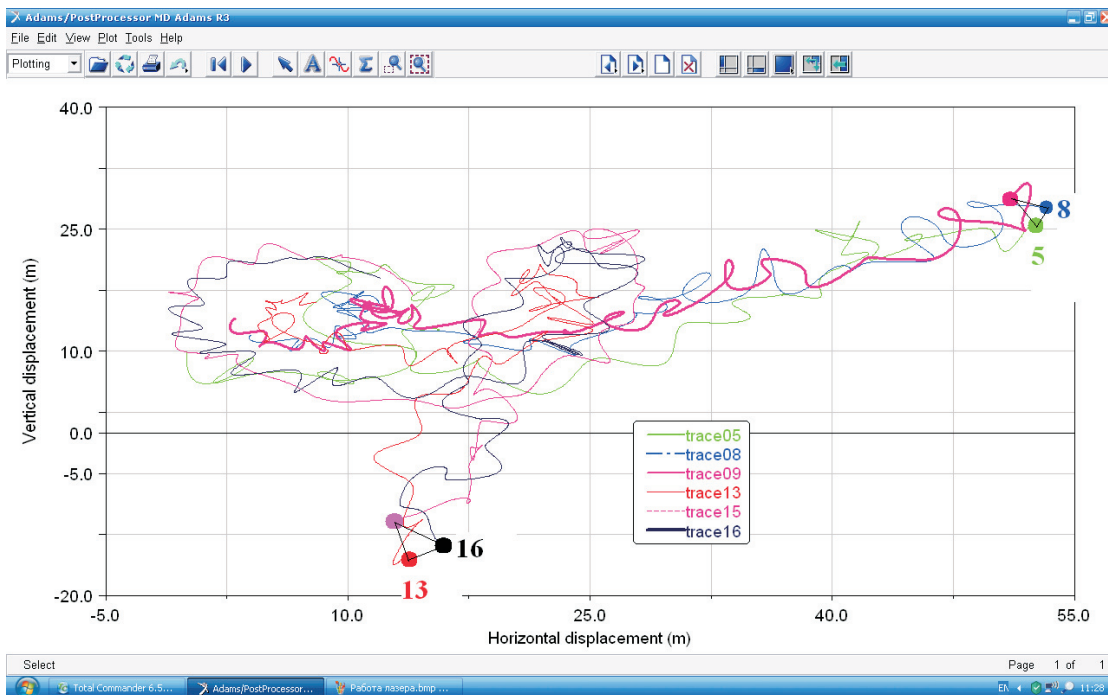


Рис. 7. Перемещения вырезанных фрагментов КМ 5–8–9 и 13–15–16, показывающие как они разлетаются в противоположных направлениях



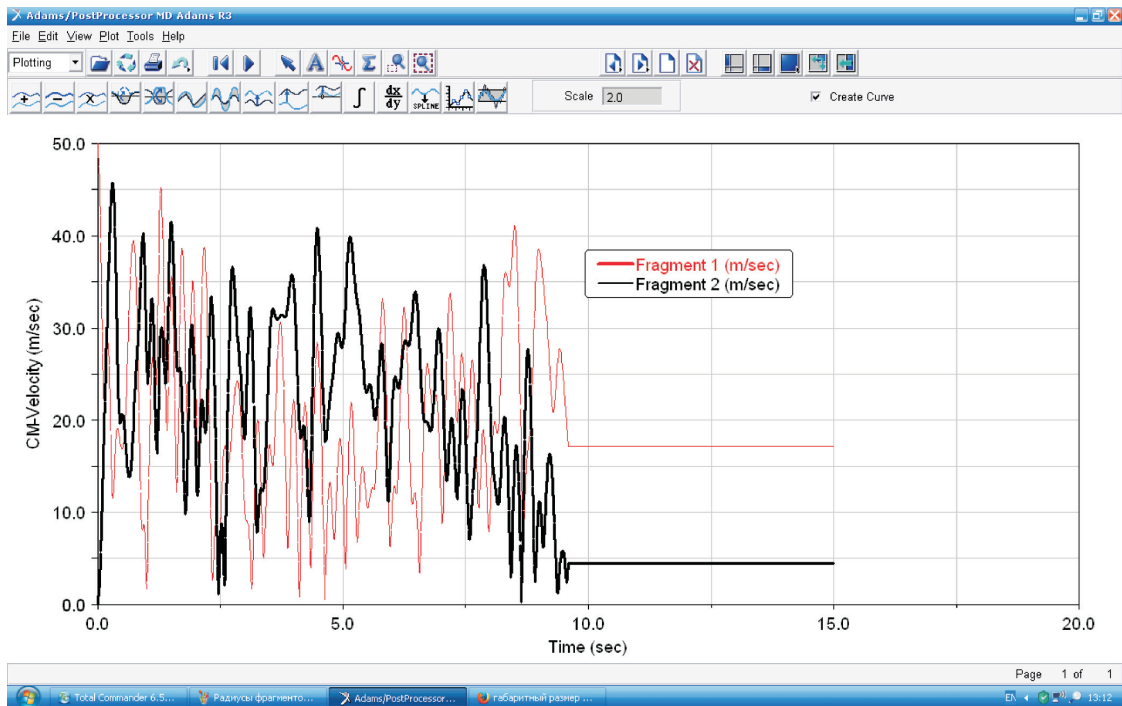


Рис. 8. Зависимости скорости центров масс вырезаемых фрагментов КМ 5–8–9 (—) и 13–15–16 (—) от времени

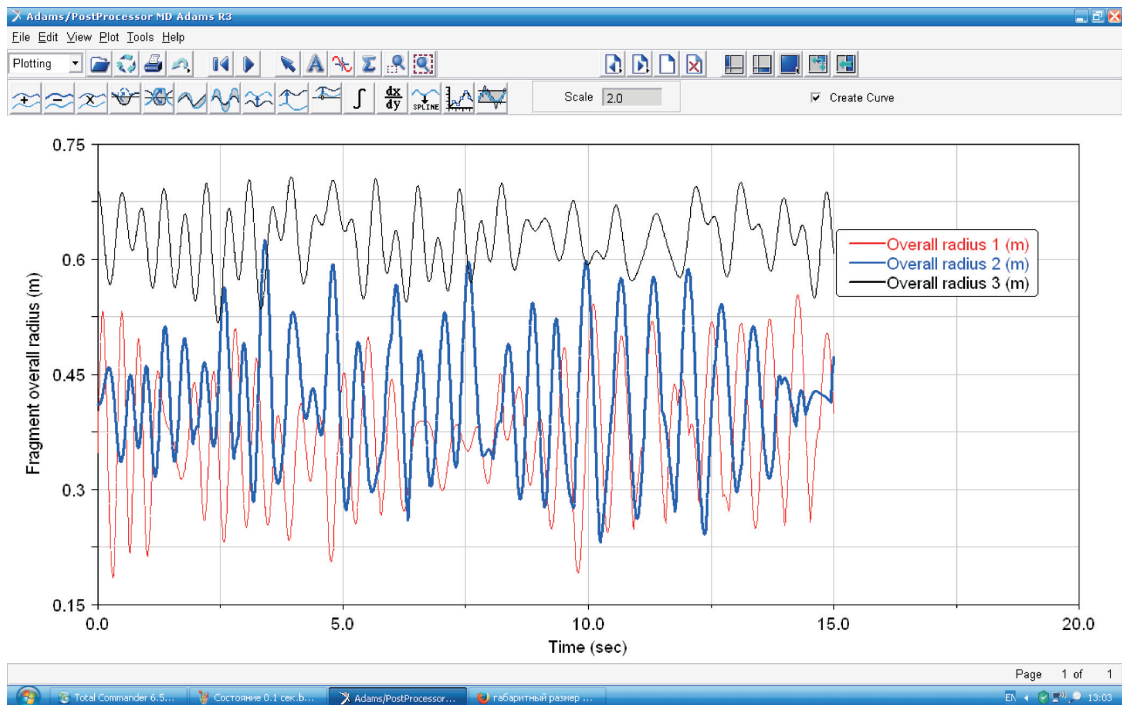


Рис. 9. Зависимости радиусов пограничных окружностей фрагмента 1–2–3 (—) мусоросборщика и вырезаемых фрагментов КМ 5–8–9 (—) и 13–15–16 (—) от времени

На рис. 7 показано, что лазерная резка упругой конструкции в невесомости — интенсивный динамический процесс. Видно, что вырезанные фрагменты КМ разлетаются в разные стороны. Эту особенность следует учитывать

при проектировании устройства захвата космического мусоросборщика.

На рис. 8 приведены зависимости скорости центров масс вырезаемых фрагментов КМ 5–8–9 и 13–15–16 от времени. Во время резки кривая

имеет полигармонический характер. Если резка закончена, то скорость вырезанного фрагмента КМ остается постоянной и примерно равной 10...20 м/с. Эти скорости существенно превышают значения 1...3 м/с, традиционно используемые при проектировании систем стыковки и захвата.

На рис. 9 приведены зависимости радиусов пограничных окружностей фрагмента 1–2–3 мусоросборщика и вырезаемых фрагментов КМ 5–8–9 и 13–15–16 от времени. Видно, что колебания интенсивные и имеют полигармонический характер.

## Выводы

1. Задача лазерной резки — геометрически нелинейная задача Коши с начальными условиями. Для решения использован метод частиц. Сформулированы условия деактивации (резки) упругих связей между частицами.

2. Вырезаемые фрагменты КМ разлетаются в противоположные стороны со скоростью 10...20 м/с. Эти особенности следует учитывать при проектировании устройства захвата космического мусоросборщика.

## Литература

- [1] Леонов А.Г., Зеленцов Вл.В., Щеглов Г.А. *Космические аппараты утилизации космического мусора*. Москва, Изд-во ВПК «НПО машиностроения», 2019. 48 с.
- [2] Аполлонов В.В. Лазерное оружие: проблемы и перспективы. *Путь науки*, 2016, № 2(24), с. 33–41.
- [3] Бойтлер Б. Система для лазерной резки деталей лазерным лучом с переменной скоростью резания. Пат. RU2516155C2 РФ, 2014, бюл. № 14, 27 с.
- [4] Борисов М.В. Объемная лазерная резка корпуса электропневматического клапана ЭПК-150И. *Молодежный научно-технический вестник*, 2013, № 5. URL: <http://ainsnt.ru/doc/568965.html> (дата обращения 26 июля 2020).
- [5] Витшас А.А., Зеленцов А.Г., Лопота В.А., Менахин В.П., Панченко В.П., Сорока А.М. Особенности прецизионной резки щелевых отверстий большого калибра излучением одномодового волоконного лазера. *Доклады Академии Наук РАН*, 2014, т. 454, № 4, с. 399, doi: 10.7868/S0869565214040136
- [6] Jung K.-W., Kawahito Y., Katayama S. Ultra-high speed disk-laser cutting of carbon-fiber reinforced plastics. *Journal of Laser Applications*, 2012, vol. 24, no. 1, 012007, doi: 10.2351/1.3673521
- [7] Finger J., Weinand M., Wortmann D. Ablation and cutting of carbon-fiber reinforced plastics using picosecond pulsed laser radiation with high average power. *Journal of Laser Applications*, 2013, vol. 25, no. 4, p. 042007, doi: 10.2351/1.4807082
- [8] Горский В.В., Евдокимов И.М., Реш В.Г. Расчетно-теоретическое исследование влияния скорости лазерной резки стеклопластика на термическое состояние материала. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 2(2). URL: <http://www.engjournal.ru/catalog/mathmodel/material/55.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2012-2-55
- [9] Горский В.В., Евдокимов И.М., Запривода А.В., Реш В.Г. Ослабление радиационного теплового потока парами материала при лазерной резке стеклопластика. *Теплофизика высоких температур*, 2014, т. 52, № 1, с. 139, doi: 10.7868/S0040364413060136
- [10] Кондратенко В., Зобов А., Наумов А., Лу-Хунг Ту. Технология прецизионной лазерной резки сапфировых пластин. *Фотоника*, 2015, № 2(50), с. 42–53.
- [11] Костромин С.В. Особенности лазерной резки порошковых металлических материалов. *Современные инновации в науке и технике. Сб. науч. тр. 4-ой Междунар. науч.-практической конф.*, Курск, 17 апреля 2014, Курск, Университетская книга, 2014, с. 281–284.
- [12] Минаев И.В., Сергеев Н.Н., Тихонова И.В., Гвоздев А.Е., Хонелидзе Д.М., Голышев И.В. Влияние параметров лазерной резки на качество поверхности реза стальных листов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2014, № 3, с. 50–58.
- [13] Николаев Д.А., Черныш И.А., Шкундин С.З., Стучилин В.В. Разработка аппаратно-программного комплекса (АПК) для лазерной резки и гравировки полимерных материалов. *Научный вестник Московского государственного горного университета*, 2011, № 7, с. 92–100.

- [14] Syam W.P., Bansal P., Benardos P., Britchford E., Hopkinson A., Voisey K.T., Branson D.T. Image processing algorithm to determine an optimized 2D laser cutting trajectory. *Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on Automation and Computing*, Lancaster, United Kingdom, 5–7 September 2019, no. 19136767, doi: 10.23919/ConAC.2019.88955106
- [15] Xebing Xy, Jun Hu, Wencai Wu. Optimization of the 3D laser cutting-head orientation based on the minimum energy consumption. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, pp. 1283–1291, doi: 10.1007/s00170-014-6080-4
- [16] Gao J., Pashkevich A., Caro S. Manipulator motion planning in redundant robotic system for fiber placement process. *New Trends in Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science*, Springer, Cham, 2016, vol. 43, doi: 10.1007/978-3-319-44156-6\_25
- [17] Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е. Управление космическим роботом-манипулятором при встрече и механическом захвате пассивного спутника. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2018, т. 20, № 6, с. 202–209.
- [18] Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е. Нелинейный анализ долговременного движения пассивного спутника на солнечно-синхронной орбите и его механического захвата космическим роботом. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2019, т. 21, № 1, с. 136–144.
- [19] Титов А.М. Определение параметров кватерниона ориентации космического аппарата при фиксированном объеме измерений и последовательной оценке. *Космонавтика и ракетостроение*, 2018, № 3(102), с. 5–21.
- [20] Ахрамович С.А., Малышев В.В., Старков А.В. Математическая модель движения беспилотного летательного аппарата в бикватернионной форме. *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*, 2018, № 4, с. 9–20.

## References

- [1] Leonov A.G., Zelentsov V.I., Shcheglov G.A. *Kosmicheskiye apparaty utilizatsii kosmicheskogo musora* [Space debris recovery vehicles]. Moscow, VPK NPO mashinostroyeniya, 2019. 48 p.
- [2] Apollonov V.V. Laser weapons: issues and prospects. *Put' nauki*, 2016, no. 2(24), pp. 33–41 (in Russ.).
- [3] Boytler B. *Sistema dlya lazernoy rezki detaley lazernym luchom s peremennoy skorost'yu rezaniya* [Laser beam cutting system with variable cutting speed]. Patent no. RU2516155S2 RF, 2014.
- [4] Borisov M.V. Volumetric laser cutting of the electropneumatic valve body EPK-150I. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik*, 2013, no. 5. Available at: <http://ainsnt.ru/doc/568965.html> (accessed 26 July 2020).
- [5] Vitshas A.A., Zelentsov A.G., Lopota V.A., Menakhin V.P., Panchenko V.P., Soroka A.M. Special aspects of precision laser-cutting the large slot opening using the single-mode optical-fiber laser. *Doklady Akademii Nauk RAN*, 2014, vol. 454, no. 4, p. 399 (in Russ.), doi: 10.7868/S0869565214040136
- [6] Jung K.-W., Kawahito Y., Katayama S. Ultra-high speed disk-laser cutting of carbon-fiber reinforced plastics. *Journal of Laser Applications*, 2012, vol. 24, no. 1, 012007, doi: 10.2351/1.3673521
- [7] Finger J., Weinand M., Wortmann D. Ablation and cutting of carbon-fiber reinforced plastics using picosecond pulsed laser radiation with high average power. *Journal of Laser Applications*, 2013, vol. 25, no. 4, p. 042007, doi: 10.2351/1.4807082
- [8] Gorskiy V.V., Evdokimov I.M., Resh V.G. Computational and theoretical study of influence of laser cutting speed of glass-fiber plastic on material's thermal state. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 2(2) (in Russ.). Available at: <http://www.engjournal.ru/catalog/mathmodel/material/55.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2012-2-55
- [9] Gorskiy V.V., Zaprivoda A.V., Resh V.G., Evdokimov I.M. Radiation heat flux attenuation by material vapors during laser cutting of glass-reinforced plastic. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 117–120, doi: 10.1134/S0018151X13060138
- [10] Kondratenko V., Zobov A., Naumov A., Lu-Khung Tu. Technologies of precision laser cutting sapphire wafers. *Fotonika*, 2015, no. 2(50), pp. 42–53 (in Russ.).

- [11] Kostromin S.V. Features of laser cutting of powdered metal materials. *Sovremennyye innovatsii v nauke i tekhnike. Sb. nauch. tr. 4-oy Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf.* [Modern innovations in science and technology. Collection of scientific papers of the 4<sup>th</sup> International scientific and practical conference]. Kursk, 2014, pp. 281–284.
- [12] Minayev I.V., Sergeyev N.N., Tikhonova I.V., Gvozdev A.E., Khonelidze D.M., Golyshch I.V. Influence of parameters of laser cutting burr surface cutting of steel plates. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, 2014, no. 3, pp. 50–58 (in Russ.).
- [13] Nikolayev D.A., Chernysh I.A., Shkundin S.Z., Stuchilin V.V. Development of hardware and software complex for laser cutting and engraving of polymer materials. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2011, no. 7, pp. 92–100 (in Russ.).
- [14] Syam W.P., Bansal P., Benardos P., Britshford E., Hopkinson A., Voisey K.T., Branson D.T. Image processing algorithm to determine an optimized 2D laser cutting trajectory. *Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on Automation and Computing*, Lancaster, United Kingdom, 5–7 September 2019, no. 19136767, doi: 10.23919/ConAC.2019.88955106
- [15] Xebing Xy, Jun Hu, Wencai Wu. Optimization of the 3D laser cutting-head orientation based on the minimum energy consumption. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, pp. 1283–1291, doi: 10.1007/s00170-014-6080-4
- [16] Gao J., Pashkevich A., Caro S. Manipulator motion planning in redundant robotic system for fiber placement process. *New Trends in Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science*, Springer, Cham, 2016, vol. 43, doi: 10.1007/978-3-319-44156-6\_25
- [17] Somov E.I., Butyrin S.A., Somov S.E. Control of a space robot-manipulator at rendezvous and mechanical capturing a passive satellite. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 202–209 (in Russ.).
- [18] Somov E.I., Butyrin S.A., Somov S.E., Somova T.E. Nonlinear analysis of long-term motion of a passive satellite in a sun-synchronous orbit and of its mechanical capturing a space robot. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 136–144 (in Russ.).
- [19] Titov A.M. Identification of the parameters of spacecraft' orientation quaternion while using fixed range of measurements and sequential estimation. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2018, no. 3(102), pp. 5–21 (in Russ.).
- [20] Akhramovich S.A., Malyshev V.V., Starkov A.V. A mathematical model of the motion of an unmanned aerial vehicle in a dual quaternions. *All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot"*, 2018, no. 4, pp. 9–20 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.06.2020

## Информация об авторе

**АРИНЧЕВ Сергей Васильевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

## Information about the author

**ARINCHEV Sergei Vasilyevich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аринчев С.В. Анализ динамики лазерной 2D-резки крупногабаритного объекта космического мусора в невесомости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 12, с. 50–61, doi: 10.18698/0536-1044-2020-12-50-61

### Please cite this article in English as:

Arinchev S.V. Dynamics Analysis of Laser 2D Cutting of a Large Space Debris Object Under Zero-Gravity Conditions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 12, pp. 50–61, doi: 10.18698/0536-1044-2020-12-50-61