

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ НАНОСПУТНИКА ФОРМАТА CUBESAT ОТ ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА**

Е.В. Баринава, Е.А. Лапшова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

[elena.lapshova031@gmail.com](mailto:elena.lapshova031@gmail.com)

Наноспутники (НС) CubeSat - формат малых (сверхмалых) искусственных спутников Земли для исследования космоса, имеющих габариты  $10 \times 10 \times 10$  см при массе не более 1,33 кг [1]. Несмотря на малый размер, современные НС имеют широкую область применения: обработка новейших технологий, методов и программно-аппаратных решений; образовательные программы; экологический мониторинг; исследования геофизических полей; астрономические наблюдения. Основное преимущество НС – низкая стоимость их разработки и запуска на орбиту по сравнению с большими космическими аппаратами.

CubeSat выводятся на орбиту сразу по несколько (до 70) единиц либо посредством ракет-носителей, либо с борта пилотируемых и автоматических грузовых космических кораблей и орбитальных станций. Для размещения на ракете-носителе, запуска и выведения CubeSat на орбиту используются транспортно-пусковые контейнеры (ТПК). Это система, позволяющая доставить НС на орбиту, минимизировав нагрузки, которые действуют на него при транспортировке на космодром, а также в процессе выведения на орбиту со стороны ракеты-носителя. В данной статье рассматривается ТПК типа Poly-PicoSatellite Orbital Deployer (P-POD) [2]. Контейнер допускает объединение 2 или 3 стандартных кубов в составе одного спутника: обозначаются 2U и 3U с размерами  $10 \times 10 \times 20$  или  $10 \times 10 \times 30$  см. Один P-POD имеет размеры, достаточные для запуска трех спутников  $10 \times 10 \times 10$  см или меньшего количества, общим размером не более 3U.

Из-за наличия зазоров между НС и направляющими ТПК в процессе отделения НС приобретает угловую скорость. Зная диапазон угловых скоростей отделения НС, можно быстрее обеспечить нужную ориентацию и стабилизацию НС, а также более точно определить количество ресурсов, необходимых для демпфирования угловой скорости. Таким образом, задача исследования движения НС при отделении от ТПК является актуальной. Этому вопросу посвящены работы российских и зарубежных авторов. В работе [3] процесс отделения описывается моделями виброударов с одной степенью свободы и с тремя степенями свободы для различных стадий разворачивания. На основании полученной модели проводится оценка угловых скоростей отделения НС. Также подобную задачу рассматривал В.В. Юдинцев в работе [4]. Он занимался исследованием процесса отделения НС от ТПК в случае плоского движения. В его работе получены уравнения движения НС внутри контейнера, а также приведены оценки влияния параметров НС и ТПК на его кинематические параметры после отделения.

Целью данной работы является построение математической модели, описывающей процесс отделения НС от ТПК в случае пространственного движения. Составленная модель позволяет произвести оценку закручивания НС по трем осям, обеспечивая большую точность определения угловой скорости отделения.

Рассматривается движение НС формата CubeSat 3U внутри ТПК типа P-POD с момента начала его движения до полного выхода из контейнера. При построении модели предполагается, что НС и ТПК — абсолютно твердые тела; движение НС происходит только под действием силы пружинного толкателя; сила трения не учитывается; толщиной и массой платформы толкателя

пренебрегается. НС и ТПК рассматриваются как прямоугольные параллелепипеды, без учета элементов, находящиеся за пределами габаритов рамы НС. Рама полагается изготовленной точно, возможным ее искривлением пренебрегается.

На рис. 1-3 приведены проекции положения НС внутри ТПК при отделении.

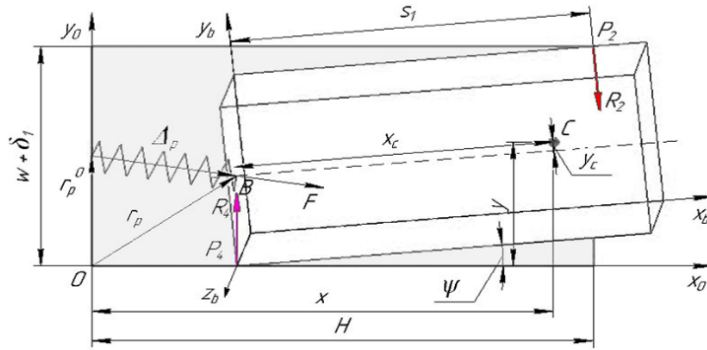


Рисунок 1 – Положение НС в ТПК (горизонтальная проекция)

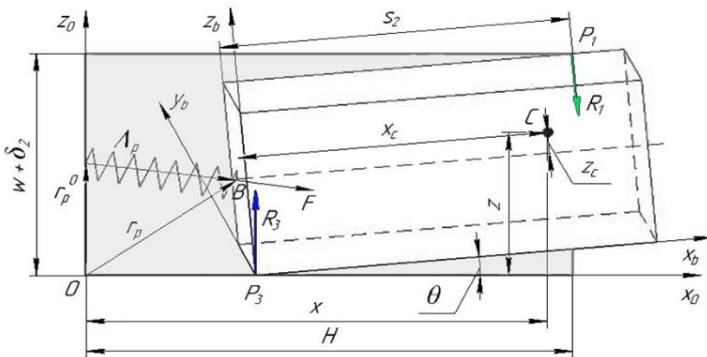


Рисунок 2 – Положение НС в ТПК (фронтальная проекция)

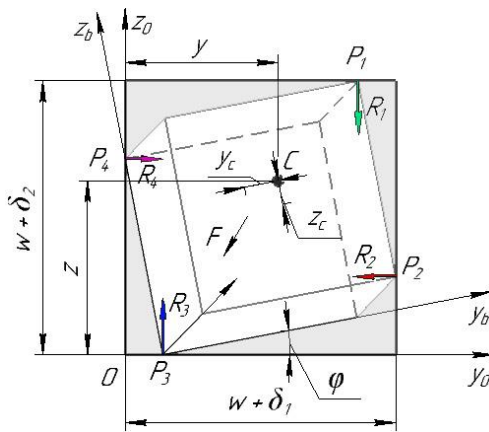


Рисунок 3 – Положение НС в ТПК (профильная проекция)

Движение НС рассматривается относительно системы координат  $Ox_0y_0z_0$ , связанной с ТПК. Положение НС в пространстве определяется с помощью шести переменных:  $x, y, z$  – расстояния до центра масс (ЦМ) НС,  $\theta, \psi, \varphi$  – углы поворота НС ( $\theta$  – угол между проекцией продольной оси НС на плоскость ТПК  $Ox_0z_0$  и осью  $Ox_0$ ,  $\psi$  – угол между проекцией продольной оси НС на плоскость ТПК  $Ox_0y_0$  и осью  $Ox_0$ ,  $\varphi$  – угол собственного вращения).

Предполагается, что в начальный момент времени НС повернут таким образом, что он касается направляющих ТПК в четырех точках:  $P_1, P_2, P_3, P_4$ .

Отделение НС происходит под действием силы пружинного толкателя  $F$ , приложенной в геометрический центр торцевой части НС. Величина силы определяется следующим образом:

$$F = P_0 - c_x |\Delta_p|, \quad (1)$$

где  $c_x$  – жесткость пружины,  $P_0 = c_x h_p$  – начальное усилие толкателя,  $h_p$  – ход толкателя,  $\Delta_p$  – перемещение платформы толкателя, которое вычисляется по следующей формуле:

$$\begin{pmatrix} \Delta_{px} \\ \Delta_{py} \\ \Delta_{pz} \end{pmatrix} = B^T \begin{pmatrix} -x_c \\ -y_c \\ -z_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{w + \delta_1}{2} \\ \frac{w + \delta_2}{2} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $B$  – матрица перехода от СК  $Ox_0y_0z_0$ , связанной с ТПК, к СК  $Ox_by_bz_b$ , связанной с НС;  $x_c$  – смещение ЦМ НС относительно задней торцевой части по оси  $x$ ;  $y_c, z_c$  – смещение ЦМ НС относительно геометрического центра по осям  $y$  и  $z$  соответственно;  $w$  – поперечный размер НС;  $\delta_1, \delta_2$  – величины зазоров между НС и направляющими ТПК.

Уравнения пространственного движения НС в процессе отделения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_x + R_1 \sin \theta + R_2 \sin \psi, \\ m\ddot{y} &= F_y + R_4 - R_2 \cos \psi, \\ m\ddot{z} &= F_z + R_3 - R_1 \cos \theta, \\ J_1\ddot{\psi} &= F_{xb}y_c - F_{yb}x_c - R_2 \cos \theta (s_1 - x_c) - \\ &- R_4 \left( x_c \cos \psi \cos \theta - \left( \frac{w}{2} + y_c \right) \sin \psi \cos \varphi \right), \\ J_2\ddot{\varphi} &= -(F_{yb}z_c - F_{zb}y_c) \cdot \\ &\cdot \left[ R_1 \left( \left( \frac{w}{2} - y_c - \left( \frac{w}{2} - z_c \right) \operatorname{tg} \varphi \right) \cos \varphi \cos \psi \right) + \right. \\ &+ R_3 \left( \left( \frac{w}{2} + y_c - \left( \frac{w}{2} + z_c \right) \operatorname{tg} \varphi \right) \cos \varphi \cos \psi \right) + \\ &+ R_2 \left( \left( \frac{w}{2} + z_c - \left( \frac{w}{2} - y_c \right) \operatorname{tg} \varphi \right) \cos \varphi \cos \theta \right) + \\ &\left. + R_4 \left( \left( \frac{w}{2} - z_c - \left( \frac{w}{2} + y_c \right) \operatorname{tg} \varphi \right) \cos \varphi \cos \theta \right) \right], \\ J_3\ddot{\theta} &= F_{xb}z_c - F_{zb}x_c - R_1 \cos \psi (s_2 - x_c) - \\ &- R_3 \left( x_c \cos \psi \cos \theta - \left( \frac{w}{2} + z_c \right) \sin \theta \cos \varphi \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – силы реакции, действующие на НС со стороны направляющих ТПК;  $s_1$  – расстояние от точки контакта  $P_2$  до оси  $y_b$ ;  $s_2$  – расстояние от точки контакта  $P_1$  до оси  $z_b$ . Расстояния  $s_1$  и  $s_2$  вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} s_1 &= H - x + x_c \cos \psi + \left[ \frac{w}{2} (\cos \varphi + \sin \varphi) - y_c \right] \sin \psi, \\ s_2 &= H - x + x_c \cos \theta + \left[ \frac{w}{2} (\cos \varphi + \sin \varphi) - x_c \right] \sin \theta. \end{aligned} \quad (4)$$

Чтобы учесть контакт НС с направляющими ТПК в точках  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , систему уравнений (1) необходимо дополнить уравнениями связей:

$$\begin{aligned}x &= H - (s_2 - x_c) \cos \theta \cos \psi + \left(\frac{W}{2} - z_c\right) \sin \theta \cos \varphi, \\x &= H - (s_1 - x_c) \cos \psi \cos \theta + \left(\frac{W}{2} - y_c\right) \sin \psi \cos \varphi, \\z &= \left(\frac{W}{2} + z_c\right) \cos \theta \cos \varphi + x_c \sin \theta, \\y &= \left(\frac{W}{2} + y_c\right) \cos \psi \cos \varphi + x_c \sin \psi,\end{aligned}\tag{5}$$

где  $H$  – длина ТПК.

Системы (4) и (5) образуют систему дифференциально-алгебраических уравнений. Для ее решения необходимо дважды продифференцировать уравнения кинематических связей (5). Таким образом, система (4) и дважды продифференцированные уравнения кинематических связей образуют систему линейных уравнений относительно ускорений и реакций.

Если в процессе отделения потерял контакт НС с какой-либо направляющей ТПК, соответствующая реакция становится равной нулю и из системы исключается уравнение связи, ей соответствующее. После этого процесс интегрирования возобновляется до полного выхода НС из контейнера [4].

Моделирование процесса отделения НС формата CubeSat 3U от ТПК типа P-POD проводилось в математическом пакете Matlab. С помощью полученной математической модели можно получить информацию о времени отделения НС от контейнера, количестве точек контакта НС с направляющими ТПК, а также об изменении угловой скорости НС в процессе движения внутри ТПК и в момент отделения НС.

Полученная в работе математическая модель может быть использована для предварительной оценки начальной угловой скорости НС при выходе из ТПК.

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

#### **Список литературы:**

1. Cubesat design specification rev. 13 / R. Munakata [et al.] // The CubeSat Program, California Polytechnic State University, 2013.
2. Redesign of the Poly Picosatellite Orbital Deployer for the Dnepr Launch Vehicle [сайт]: – URL: [http://www.inpe.br/nordeste/conasat/arquivos/projetos/CP1/CP1-SYS-Redesign\\_of\\_theP-POD.pdf](http://www.inpe.br/nordeste/conasat/arquivos/projetos/CP1/CP1-SYS-Redesign_of_theP-POD.pdf) (дата обращения: 15.06.2023).
3. Modeling of the CubeSat deployment and initial separation angular velocity estimation / J. Guo, J. Zhang, C. Yue [et al.] // Journal of Aerospace Science and Technology, Vol. 95, 2019.
4. В.В. Юдинцев. Динамика отделения наноспутника формата кубсат от транспортно-пускового контейнера // Полет. № 8-9. 2015. С. 10-15.