

# АВИАЦИЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

---

---

УДК 629.7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫХОДА НАНОСПУТНИКА ФОРМАТА CUBESAT ИЗ ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА В СЛУЧАЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

Е. А. Лапшова

В настоящее время всё больше возрастает интерес к наноспутникам (НС). Запуск НС в основном происходит с помощью транспортно-пусковых контейнеров (ТПК). В процессе выхода из ТПК НС приобретает угловую скорость отделения, которую необходимо демпфировать для выполнения большинства поставленных задач. НС обладают небольшим запасом энергии, следовательно, при больших угловых скоростях отделения его может не хватить на выполнение основных задач миссии. В связи с этим оценка начальных угловых скоростей отделения является важной задачей. Данная статья посвящена построению математической модели, описывающей процесс отделения НС стандарта CubeSat от ТПК в случае пространственного движения. Приведены результаты численного моделирования процесса выхода НС формата CubeSat 3U из ТПК типа P-POD. Моделирование проводилось с использованием математического пакета MATLAB.

**Ключевые слова:** наноспутник, транспортно-пусковой контейнер, угловая скорость, процесс отделения, математическая модель.

Наноспутники (НС) – это малые космические аппараты с массой от 1 до 10 кг [1]. Обычно запуск НС происходит с помощью транспортно-пусковых контейнеров (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 (РН). Также с помощью ТПК производится отделение НС после доставки на рабочую орбиту.

ТПК является вторичной полезной нагрузкой и работает как интерфейс между НС и РН. Поскольку вторичная полезная нагрузка создает дополнительный риск для любой миссии, нужно минимизировать вероятность ошибок путем создания стандартизированной вторичной полезной нагрузки, которую знают и которой доверяют поставщики

запусков. ТПК должен сохранять свою структурную целостность, несмотря на любые структурные сбои, которые могут возникнуть в самом развёртывающем устройстве или в НС. ТПК электрически и механически изолирует НС от остальной части РН, снижая риск повреждения в результате возникновения нештатных ситуаций. Основные задачи, которые выполняет ТПК: защита РН и основной полезной нагрузки; обеспечение безопасного и надежного процесса отделения НС; обеспечение возможности запуска НС на различных РН. В данной работе проводится обзор некоторых ТПК, с помощью которых чаще всего производится запуск НС.

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 [2] процесс отделения описывается моделями виброударов с одной степенью свободы и с тремя степенями свободы для различных стадий развертывания. На основании полученной модели проводится оценка угловых скоростей отделения НС. Также подобную задачу рассматривал В. В. Юдинцев в работе [3]. 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 трём осям, обеспечивая большую точность определения угловой скорости отделения.

Практическая ценность исследования заключается в построенной математической модели процесса отделения НС от ТПК для определения начальной угловой скорости отделения. Результаты исследования могут быть использованы при предварительной оценке начальной угловой скорости отделения НС.

## Виды ТПК

Рассмотрим наиболее часто используемые ТПК.

### 1. X-POD

ТПК X-POD - exoadaptable pyroless deployer (экспериментальный выталкивающий развертыватель) был разработан в Институте аэрокосмических исследований Университета Торонто [4].

Система X-POD может быть адаптирована для работы с НС различных размеров: от одного НС до более крупных НС произвольных размеров. На данный момент система разделения X-POD включает четыре проверенные на практике модификации (табл. 1). Внешний вид конструкций ТПК X-POD для НС различных размеров приведен на рис. 1.

Также в настоящее время проходят квалификационные испытания новой конструкции X-POD, которая может вмещать космические аппараты массой до 15 кг и размером 20 см x 20 см x 40 см [5].

Приспосабливаясь к различным факторам, конструкция X-POD накладывает определенные ограничения на все НС, а именно минимизацию компонентов, которые крепятся к внешней оболочке. Система отделения X-POD использует метод развертывания с помощью выталкивания, т.е. после получения команды на развертывание люк открывается, и пружина выталкивает НС наружу. Данный метод часто используется для наноспутников и микроспутников, т.к. их структуры не имеют большой доступной поверхности или жесткость конструкции не позволяют использовать более сложные методы развертывания.

Таблица 1

Виды ТПК X-POD

Название X-POD	Максимальная масса НС	Размеры НС
Single	1 кг	10 см x 10 см x 10 см
Double	2,7 кг	10 см x 10 см x 23 см
Triple	3,5 кг	10 см x 10 см x 34 см
GNB	7,5 кг	20 см x 20 см x 20 см

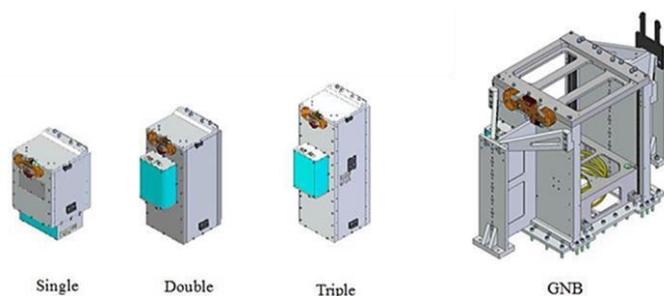


Рис. 1. Внешний вид конструкций ТПК X-POD

## 2. J-SSOD

ТПК J-SSOD (JEM Small Satellite Orbital Deployer) – японский экспериментальный модуль для развертывания малых спутников. Он является первым устройством для выведения малых спутников с Международной космической станции. Это является преимуществом данного ТПК, т.к. возможна проверка работоспособности НС непосредственно перед запуском.

ТПК J-SSOD вмещает до трёх НС размера 1U. Каждый предварительно упакованный ТПК для вывода НС на орбиту загружается членами экипажа МКС на экспериментальную платформу, после чего она прикрепляется к специальному столу внутри шлюза для передачи системе дистанционного манипулятора. Манипулятор захватывает платформу и перемещается в нужное положение, после чего J-SSOD сбрасывает НС.

При отделении от ТПК J-SSOD скорость НС достигает 1,5 м/с. С помощью данного ТПК отделился наноспутник 2U «Raiko», угловая скорость которого на момент отделения составляла 2 градус/сек.

## 3. ISIPOD

ISIPOD — это система отделения полезной нагрузки компании ISIS (Innovative Solutions In Space). ISIPOD может вмещать любой тип НС: 1U, 2U, 3U, 6U до 12U и 16U, при этом можно быстро реализовать пользовательские форматы и объемы (например, 4U, 5U или дополнения, такие как 0,5U). Внешний вид ТПК ISIPOD приведен на рис. 2 (а).

Преимуществом данного ТПК является независимость от аккумуляторной батареи, т.е. ISIPOD не требует питания, чтобы оставаться закрытым, а также не нуждается в зарядке.

Таким образом, ТПК CubeSat компании ISIS доступны в различных размерах от 1U до 16U. Однако, если ни один из стандартных ТПК не удовлетворяет требованиям миссии, ISIS может разработать индивидуальные решения, отвечающие любым требованиям проекта, что также является достоинством данного вида ТПК [6].

## 4. P-POD

Запуск НС в основном происходит с помощью ТПК типа P-POD (Poly-Picosatellite Orbital Deployer), основанных на пружинном толкателе. Это наиболее простой способ выведения на орбиту НС формата CubeSat для университетов или небольших компаний, т.к. они сравнительно недорогие, а также достаточно просты в применении. Внешний вид ТПК P-POD изображен на рис. 2 (б). Стандартное устройство развертывания P-POD вмещает три CubeSat 1U, но конструкция также может быть удлинена, чтобы вместить большее количество CubeSat [7].

P-POD сводит к минимуму потенциальное взаимодействие с основной полезной нагрузкой на РН, физически ограждая наноспутники и требуя, чтобы они запускались в неактивном состоянии.

Во время развертывания НС перемещается по направляющим, встроенным в углы трубы. Конструкция трубы обеспечивает отделение НС без значительного вращения. Данный ТПК отличается тем, что в нем нет механизма для фиксации НС внутри трубы. Это снижает вероятность того, что НС заклинит внутри трубы и он не сможет отделиться [8]. С другой стороны, могут увеличиться ударные и вибрационные нагрузки.



(a)



(б)

(a) ТПК ISIPOD (б) ТПК P-POD

**Рис. 2. Внешний вид конструкций**

Основная пружина в P-POD должна быть рассчитана на выполнение требований по выходу НС из ТПК, предъявляемых поставщиком услуг по запуску. CubeSats должны полностью отделиться менее, чем за одну секунду после получения сигнала об отделении. Это необходимо для того, чтобы все полезные нагрузки были развернуты до того, как топливные баки системы управления положением разгонного блока будут исчерпаны.

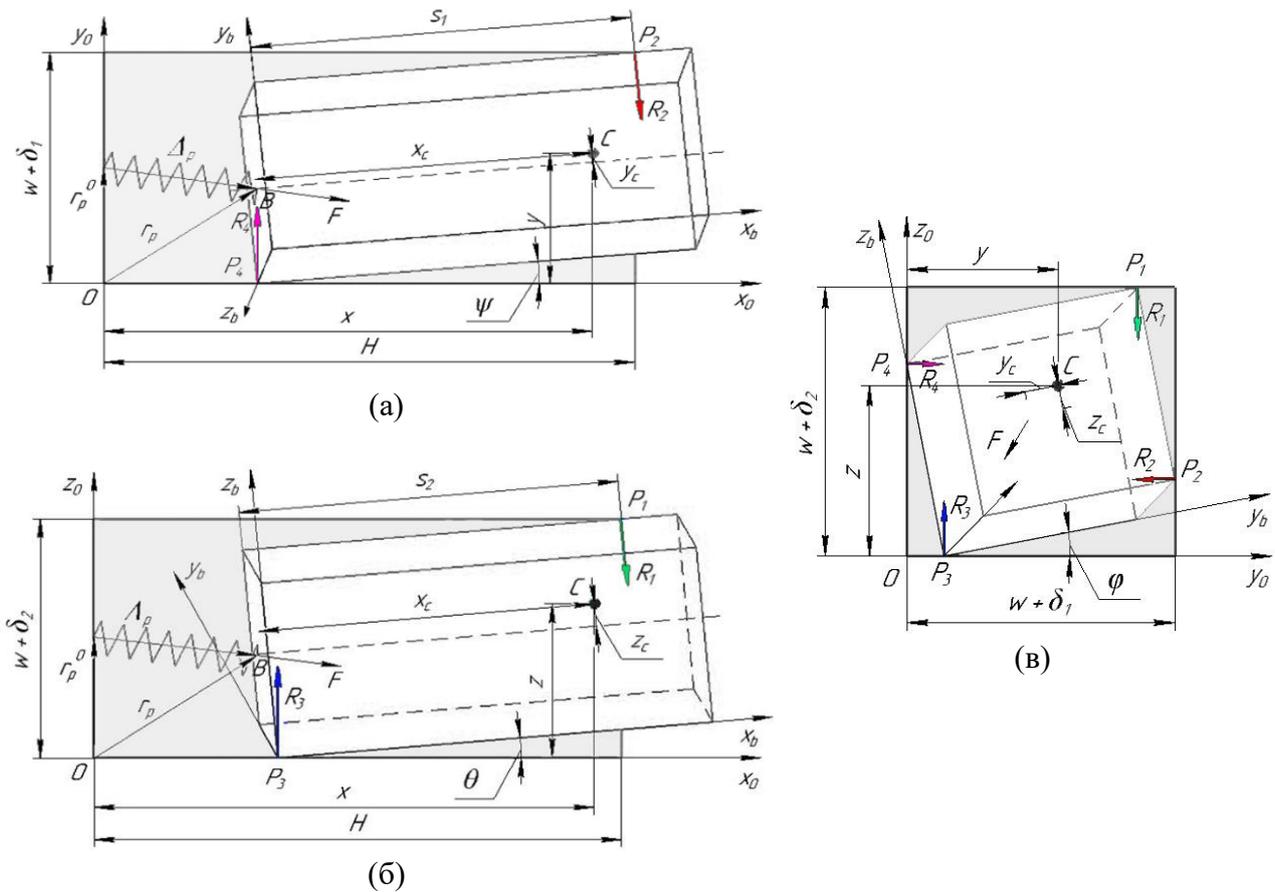
**Моделирование процесса выхода НС из ТПК в случае пространственного движения**

В работе [3] В. В. Юдинцева описана математическая модель процесса отделения в случае плоского движения. Она позволяет оценить закрутку НС только вокруг одной из поперечных осей. В данной работе рассматривается процесс отделения в случае пространственного

движения. Составленная модель позволяет произвести оценку закручивания НС по трём осям, обеспечивая большую точность определения угловой скорости отделения.

На рис. 3 (а-в) приведены проекции положения НС внутри ТПК при отделении.

Рассматривается движение НС внутри ТПК 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 учёта элементов, находящиеся за пределами габаритов рамы НС. Рама полагается изготовленной точно, возможным её искривлением пренебрегается.



(а) горизонтальная проекция (б) фронтальная проекция (в) профильная проекция

**Рис. 3. Положение НС в ТПК**

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:

$$F = P_0 - c_x |\Delta_p|,$$

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

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_x + R_1 \sin \theta + R_2 \sin \psi, \\ m\ddot{y} &= F_y + R_4 - R_2 \cos \psi, \\ m\ddot{z} &= F_z + R_3 - R_1 \cos \theta, \\ J_1 \ddot{\psi} &= F_{xb} y_c - F_{yb} x_c - R_2 \cos \theta (s_1 - x_c) - \\ &- R_4 \left( x_c \cos \psi \cos \theta - \left( \frac{w}{2} + y_c \right) \sin \psi \cos \varphi \right), \\ J_2 \ddot{\varphi} &= -(F_{yb} z_c - F_{zb} y_c) \cdot \\ &\left[ R_1 \left( \left( \frac{w}{2} - y_c - \left( \frac{w}{2} - z_c \right) \operatorname{tg} \varphi \right) \cos \varphi \cos \psi \right) + \right. \\ &+ R_3 \left( \left( \frac{w}{2} + y_c - \left( \frac{w}{2} + z_c \right) \operatorname{tg} \varphi \right) \cos \varphi \cos \psi \right) + \\ &+ R_2 \left( \left( \frac{w}{2} + z_c - \left( \frac{w}{2} - y_c \right) \operatorname{tg} \varphi \right) \cos \varphi \cos \theta \right) + \\ &\left. + R_4 \left( \left( \frac{w}{2} - z_c - \left( \frac{w}{2} + y_c \right) \operatorname{tg} \varphi \right) \cos \varphi \cos \theta \right) \right], \\ J_3 \ddot{\theta} &= F_{xb} z_c - F_{zb} x_c - R_1 \cos \psi (s_2 - x_c) - \\ &- R_3 \left( x_c \cos \psi \cos \theta - \left( \frac{w}{2} + z_c \right) \sin \theta \cos \varphi \right), \end{aligned} \tag{1}$$

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

где  $B$  – матрица перехода от СК  $Ox_0y_0z_0$ , связанной с ТПК, к СК  $Ox_b y_b z_b$ , 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. Проекции силы упругости на оси СК, связанной с ТПК ( $Ox_0y_0z_0$ ):

$$F_x = F \frac{\Delta_{px}}{|\Delta_p|}, \quad F_y = F \frac{\Delta_{py}}{|\Delta_p|}, \quad F_z = F \frac{\Delta_{pz}}{|\Delta_p|}.$$

Проекция силы упругости на оси базовой СК ( $Bx_b y_b z_b$ ):

$$\begin{aligned} F_{xb} &= BF_x, \\ F_{yb} &= BF_y, \\ F_{zb} &= BF_z. \end{aligned}$$

Уравнения пространственного движения НС в процессе отделения имеют следующий вид (1):

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:

$$s_1 = H - x + x_c \cos \psi + \left[ \frac{w}{2} (\cos \varphi + \sin \varphi) - y_c \right] \sin \psi,$$

$$x = H - (s_2 - x_c) \cos \theta \cos \psi + \left( \frac{w}{2} - z_c \right) \sin \theta \cos \varphi,$$

$$x = H - (s_1 - x_c) \cos \psi \cos \theta + \left( \frac{w}{2} - y_c \right) \sin \psi \cos \varphi,$$

$$z = \left( \frac{w}{2} + z_c \right) \cos \theta \cos \varphi + x_c \sin \theta,$$

$$y = \left( \frac{w}{2} + y_c \right) \cos \psi \cos \varphi + x_c \sin \psi,$$

где  $H$  — длина ТПК.

$$s_2 = H - x + x_c \cos \theta + \left[ \frac{w}{2} (\cos \varphi + \sin \varphi) - x_c \right] \sin \theta.$$

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

(2)

Таблица 2

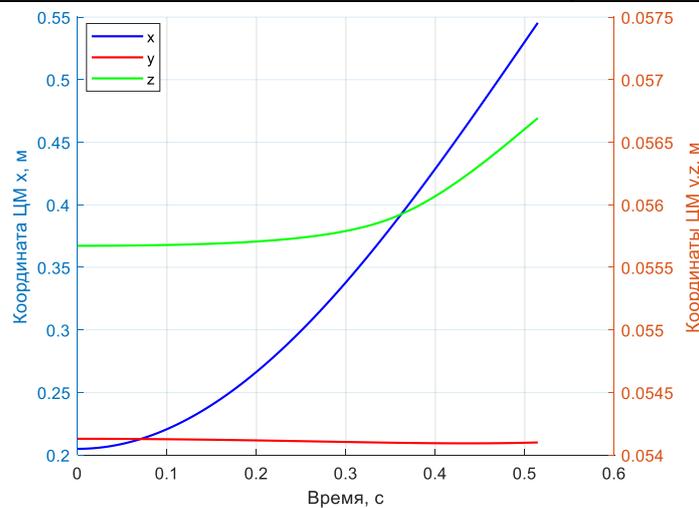
**Характеристики НС**

Масса НС	$m = 3,54$ кг
Длина НС	$l = 0,34$ м
Поперечный размер НС	$w = 0,1$ м
Смещение ЦМ НС относительно задней торцевой части по оси $x$	$x_c = 0,185$ м
Смещение ЦМ НС относительно геометрического центра по оси $y$	$y_c = 0,005$ м
Смещение ЦМ НС относительно геометрического центра по оси $z$	$z_c = 0,004$ м
Момент инерции НС относительно оси $x$	$I_x = 0,008$ кг · м <sup>2</sup>
Момент инерции НС относительно оси $y$	$I_y = 0,037$ кг · м <sup>2</sup>
Момент инерции НС относительно оси $z$	$I_z = 0,037$ кг · м <sup>2</sup>

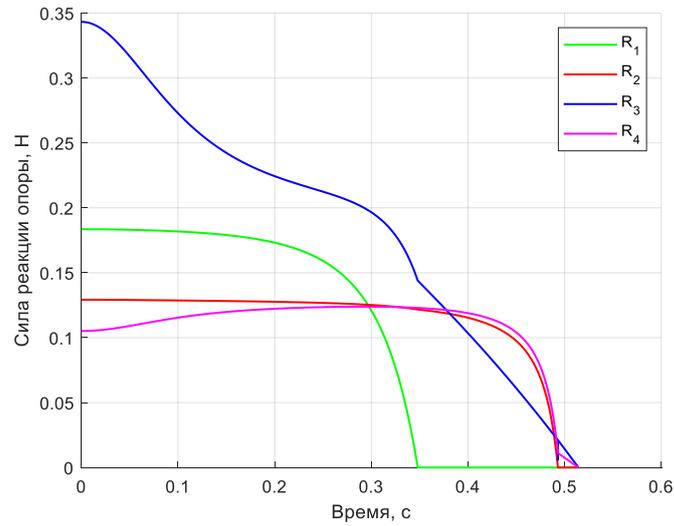
Таблица 3

**Характеристики ТПК**

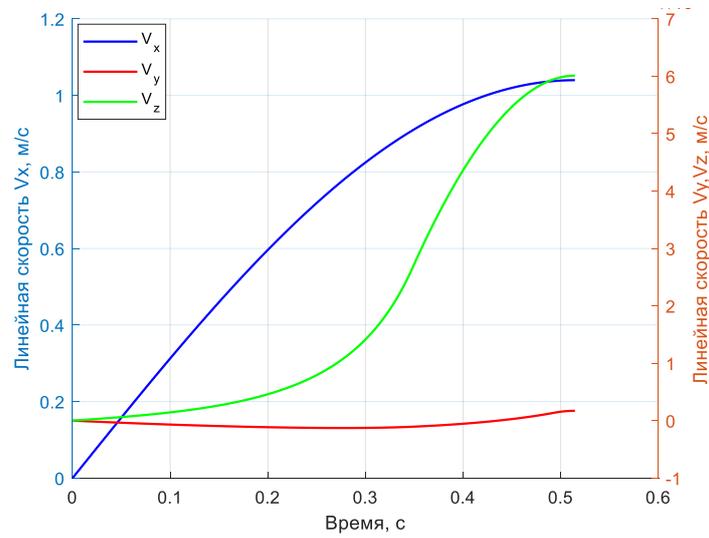
Длина	$H = 0,36$ м
Максимальный зазор между НС и направляющими ТПК по оси $y$	$\delta_1 = 0,5$ мм
Максимальный зазор между НС и направляющими ТПК по оси $z$	$\delta_2 = 0,5$ мм
Жёсткость пружины	$c_x = 33$ Н/м



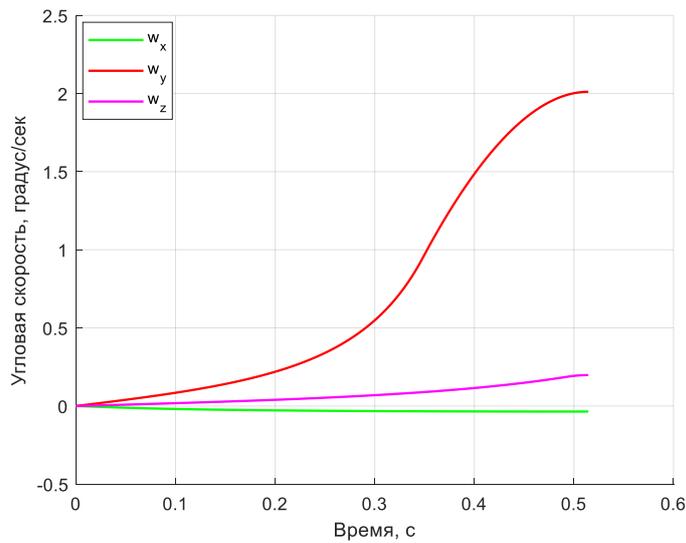
**Рис. 4. Изменение координат центра масс НС при выходе из ТПК (левая шкала ординат — изменение координаты ЦМ  $x$ , правая шкала ординат — изменение координат ЦМ  $y, z$ )**



**Рис. 5. Изменение сил реакции опор**



**Рис. 6. Изменение линейной скорости НС при выходе из ТПК (левая шкала ординат – изменение линейной скорости  $V_x$ , правая шкала ординат – изменение линейной скорости  $V_y, V_z$ )**



**Рис. 7. Изменение угловой скорости НС при выходе из ТПК**

Системы (1) и (2) образуют систему дифференциально-алгебраических уравнений. Для ее решения необходимо дважды продифференцировать уравнения кинематических связей (2). Таким образом, система (1) и дважды продифференцированные уравнения кинематических связей образуют систему линейных уравнений относительно ускорений и реакций.

Если в процессе отделения потерян 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 [3].

В качестве примера рассмотрим НС формата CubeSat и ТПК типа P-POD со следующими характеристиками (табл. 2, 3).

Моделирование проводилось при максимальном значении величины хода толкателя, равному длине НС, т. е. толкатель действует на НС до момента полного выхода из ТПК. Результаты моделирования приведены на рис. 4-7.

Из рис. 4-7 видно, что отделение НС от ТПК происходит через 0,52 секунды. Графики на рис. 5 позволяют определить количество точек контакта НС с направляющими ТПК в каждый момент времени в процессе отделения. Таким образом, через 0,34 секунд после начала движения контакт в точке  $P_1$  потерян, реакция  $R_1$  становится равной нулю (рис. 5) и не оказывает влияния на дальнейшее движение НС. Через 0,5 секунд реакции  $R_2$  и  $R_4$  также становятся равными нулю, и оставшиеся 0,02 секунды на движение НС оказывает влияние только реакция  $R_3$ .

Таким образом, при параметрах ТПК  $c_x = 33$  Н/м,  $H = 0,36$  м,  $h_p = 0,34$  м,  $\delta_1 = 0,5$  мм,  $\delta_2 = 0,5$  мм НС отделяется через 0,52 секунд с линейной скоростью 1 м/с и на выходе из ТПК приобретает следующие угловые скорости:  $\omega_x = -0,02$  градус/сек,  $\omega_y = 2$  градус/сек,  $\omega_z = 0,22$  градус/сек. Кроме того, моделирование показало, что на конечные результаты значительное влияние оказывает начальное положение НС в ТПК. При изменении начальных углов положения НС внутри ТПК угловые скорости отделения также будут изменяться. Данная задача носит

вероятностный характер и требует дальнейшего изучения.

### Заключение

В ходе выполнения работы был проведён обзор ТПК, с помощью которых наиболее часто осуществляется запуск НС. Были рассмотрены такие ТПК, как X-POD, J-SSOD, ISIPOD, P-POD, выявлены их достоинства и недостатки. Составлена математическая модель процесса отделения в случае пространственного движения, после чего проведено исследование процесса отделения НС формата CubeSat от ТПК типа P-POD. Были получены значения линейной и угловой скорости отделения для НС формата CubeSat 3U, а также построены графики изменения координат центра масс НС в процессе отделения.

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.*

### Литература

1. Гансвинд И. Н. Малые космические аппараты в дистанционном зондировании Земли // Исследование Земли из космоса. № 5. 2019. С. 82–88.
2. Guo J., Zhang J., Yue C., Wang F., Modeling of the CubeSat deployment and initial separation angular velocity estimation // Journal of Aerospace Science and Technology, 2019, Vol. 95. P. 2-4.
3. Юдинцев В. В. Динамика отделения наноспутника формата кубсат от транспортно-пускового контейнера // Полёт. № 8-9. 2015. С. 10-15/
4. Carvalho R. A., Estela J., Langer M. Nanosatellites: Space and Ground Technologies // Operations and Economics. 2020. P. 380-382.
5. Fine J. Design, Analysis, Assembly, Integration and Testing of Mechanical Systems for Micro-Satellites and Micro-Satellite Separation Systems, 2014.

6. ISIS-CubeSat-deployers-Brochure. URL: <https://www.cubesatshop.com/product/3-unit-cubesat-deployer/> (accessed: 10.04.2023). URL: [projotos/CP1/CP1-SYS-Redesign\\_of\\_theP-POD.pdf](https://www.inpe.br/nordeste/conasat/arquivos/projetos/CP1/CP1-SYS-Redesign_of_theP-POD.pdf) (accessed: 10.04.2023).
7. Redesign of the Poly Picosatellite Orbital Deployer for the Dnepr Launch Vehicle. URL: <http://www.inpe.br/nordeste/conasat/arquivos/>
8. CubeSat concept. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cubesat-concept> (accessed: 08.05.2023).

## MODELING THE PROCESS OF CUBESAT NANOSATELLITE SEPARATION FROM A DEPLOYER IN THE CASE SPATIAL MOTION

E. A. Lapshova

Currently, there is a growing interest in nanosatellites (NS). The launch of the NS mainly occurs with the help of CubeSat deployer. During the process of exiting the deployer, the NS acquires an angular separation velocity, which needs to be dampened to carry out most of the mission tasks. NS have a small energy reserve, therefore, at high angular separation velocities, it may not be sufficient to carry out the main mission tasks. Therefore, before launching the NS, it is important to evaluate its initial separation angular velocities. This article is devoted to mathematical modeling that describes the process of separation of a CubeSat NS from a deployer in case of spatial motion. The results of numerical modeling of the process of exiting a CubeSat 3U NS from a P-POD type deployer are presented. The modeling was carried out using the MATLAB mathematical package.

**Key words:** nanosatellite, CubeSat deployer, angular velocity, separation process, mathematical model.

*Статья поступила в редакцию 22.06.2023 г.*