

3. Морган, К.Л. Государственные расходы на красные приливы Флориды: опрос управляющих прибрежными районами / К.Л. Морган, С.Л. Ларкин, К.М. Адамс//Флоридский центр исследований сельскохозяйственного рынка. Отраслевой отчет. – 2007. – №45. – С. 35-42.

УДК 629.7

Барина Е.В., Лапшова Е.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫХОДА НАНОСПУТНИКА ИЗ ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА

В настоящее время всё больше возрастает интерес к наноспутникам (НС) – малым космическим аппаратам с массой менее 10 кг [1]. Это связано с простотой разработки и низкими затратами на их создание по сравнению с обычными космическими аппаратами. Обычно запуск НС происходит с помощью транспортно-пусковых контейнеров (ТПК). Это система, позволяющая доставить НС на космодром, снизить нагрузки, действующие на НС, а также произвести его отделение после доставки на орбиту [2]. При отделении НС от ТПК возникает проблема оценки угловых скоростей отделения, которые приобретает НС в процессе выхода. Зная диапазон угловых скоростей отделения, можно быстрее обеспечить требуемую ориентацию НС, а также точнее определить количество ресурсов, необходимых для демпфирования угловой скорости.

В данной работе рассматривается плоский случай процесса выхода НС Sam-Sat-ION из ТПК (рис. 1).

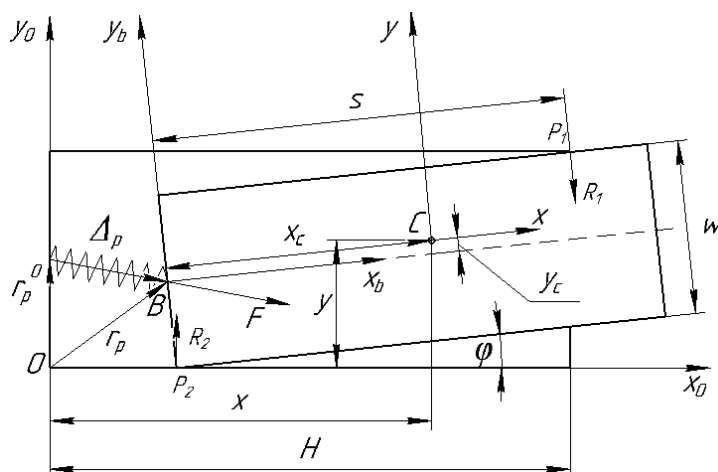


Рис. 1. Схематичный чертёж положения НС при выходе из ТПК

В работе приняты следующие допущения: НС и ТПК – абсолютно твёрдые тела; движение НС происходит только под действием силы пружинного толкателя; толщиной и массой платформы толкателя пренебрегается.

При моделировании процесса выхода из ТПК НС SamSat-ION была использована математическая модель, описанная в [3]. При положении НС, показанном на рис. 1, уравнения плоского движения наноспутника имеют вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_x + R_1 \sin \varphi, \\ m\ddot{y} = F_y - R_1 \cos \varphi + R_2, \\ I\ddot{\varphi} = F_{xb}y_c - F_{yb}x_c - R_2 \left(x_c \cos \varphi - \left(\frac{w}{2} + y_c \right) \sin \varphi \right) - R_1(s - x_c), \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса НС, I – момент инерции НС, x, y — расстояния, определяющие положение ЦМ НС относительно СК Ox_0y_0 ; w – поперечный размер НС; φ – угол между продольной осью НС и направляющими ТПК; x_c, y_c – расстояния, определяющие положение ЦМ НС относительно СК Ox_by_b ; F_x, F_y – проекции силы действия пружинного толкателя на оси СК Ox_0y_0 ; R_1, R_2 – силы реакции, действующие на НС со стороны направляющих ТПК; s – расстояние от точки контакта P_1 до оси y_b ; F_{xb}, F_{yb} – проекции силы действия пружинного толкателя на оси системы координат Ox_by_b .

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

$$\begin{cases} x = H - (s - x_c) \cos \varphi + \left(\frac{w}{2} - y_c \right) \sin \varphi, \\ y = y_c \cos \varphi + x_c \sin \varphi + \frac{w}{2} \cos \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где H – длина ТПК.

Системы (1) и (2) образуют систему дифференциально-алгебраических уравнений. Для её решения необходимо дважды продифференцировать уравнения кинематических связей (2), образуя тем самым систему линейных уравнений относительно ускорений и реакций. Данная система решается с помощью метода Крамера.

Для ТПК со следующими параметрами: $H = 0,36$ м, зазор между НС и направляющими ТПК $\delta = 0,5$ мм, жёсткость пружины $c_x = 33$ Н/м было проведено численное моделирование процесса отделения на примере НС SamSat-ION, имеющего параметры: длина НС $l = 0,3405$ м, $m = 3,54$ кг, $w = 0,1$ м, $x_c = 0,1854$ м, $y_c = 0,0054$ м, $I = 0,034$ кг · м². Изменение угла отклонения и угловой скорости приведено на рис. 2. НС SamSat-ION полностью отделяется от ТПК через 0,51 секунд после начала движения и приобретает угловую скорость отделения, равную 2 градус/сек.

В процессе создания НС возможны отклонения от проектных параметров. Так, изменение положения ЦМ оказывает существенное влияние на угловую ско-

рость НС. Проведённый анализ показал, что для уменьшения угловой скорости отделения следует смещать ЦМ НС по оси x в направлении движения НС, а смещение по оси y делать минимально возможным.

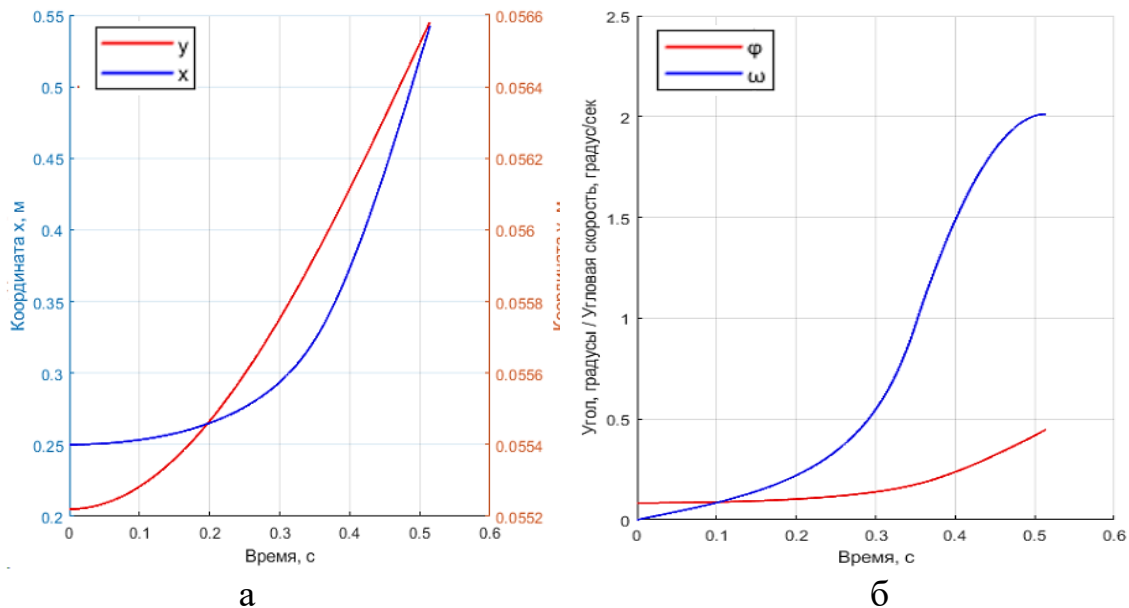


Рис. 2а – Изменение координат ЦМ НС SamSat-ION при выходе из ТПК,

Рис. 2б – Изменение угла отклонения и угловой скорости НС SamSat-ION при выходе из ТПК

На угловую скорость отделения также влияют параметры ТПК, такие как жёсткость пружины, ход толкателя и величина зазора между НС и направляющими ТПК. Проведённый анализ показал, что для уменьшения угловой скорости отделения НС зазор, ход толкателя и жёсткость пружины следует делать минимально возможными. Однако, нужно учитывать, что при слишком маленьком зазоре НС может заклинить в ТПК. Поэтому рекомендуется делать зазор не менее 0,2 мм. Кроме того, на значения жёсткости пружины и хода толкателя также накладываются ограничения, обусловленные минимальной скоростью отделения НС от ТПК. На рис. 3а приведены графики зависимостей хода толкателя от минимальной жёсткости пружины, обеспечивающей полный выход НС из ТПК с линейными скоростями отделения 0,5 м/с и 1 м/с.

На рис. 3б приведены графики зависимостей максимальной жёсткости пружины от максимального зазора при различных значениях хода толкателя, обеспечивающие угловую скорость отделения НС SamSat-ION не более 1 градус/сек и линейную скорость отделения не менее 0,5 м/с. Минимальные значения по осям графика соответствуют минимальным значениям жёсткости пружины и величины зазора, обеспечивающих линейную скорость отделения 0,5 м/с при различном ходе толкателя. При меньшей линейной скорости отделения появляется вероятность того, что силы пружинного толкателя не хватит, чтобы вывести НС из ТПК.

Зависимости для других расстояний хода толкателя можно получить путём интерполяции данных графиков.

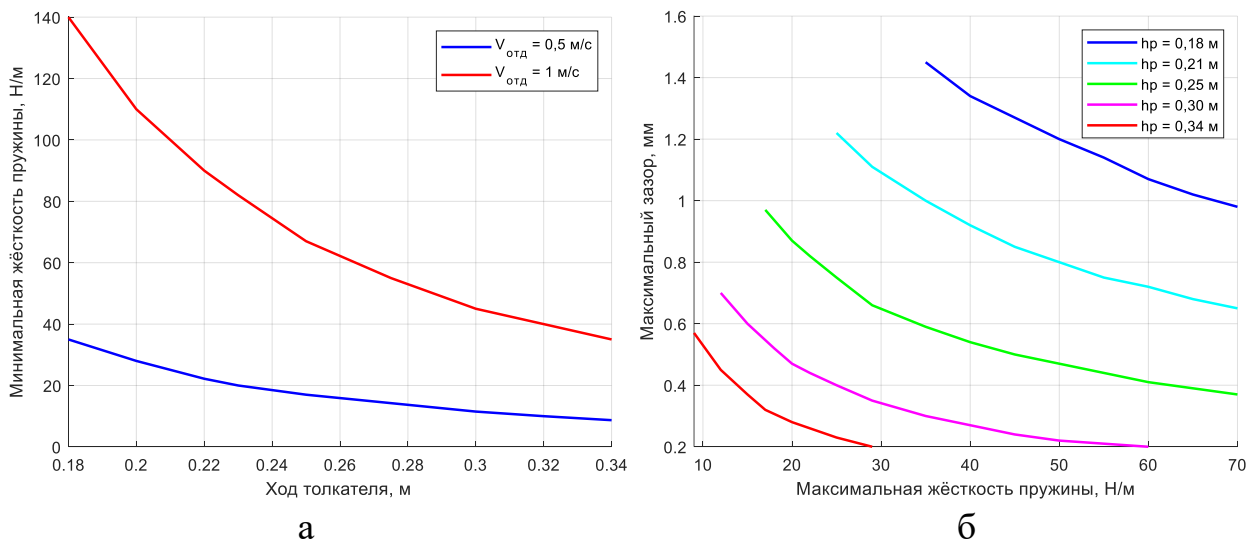


Рис. 3а - Зависимости хода толкателя от минимальной жёсткости пружины при различных линейных скоростях отделения НС,

Рис. 3б – Максимальные значения жёсткости пружины и величины зазора при различных значениях хода толкателя

Таким образом, в данной работе смоделирован процесс выхода НС SamSat-ION из ТПК, проведён анализ влияния параметров НС и параметров ТПК на угловую скорость отделения НС. Подобраны параметры ТПК, обеспечивающие начальную угловую скорость НС, не превышающую 1 градус/сек.

Результаты исследования могут быть использованы при предварительной оценке угловой скорости отделения НС SamSat-ION и других НС. Кроме того, результаты можно использовать при проектировании ТПК для обеспечения минимальной угловой скорости отделения НС.

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

Библиографический список

1. Cubesat design specification rev. 13 / R. Munakata. et al. // The CubeSat Program, California Polytechnic State University, 2013
2. Космодемьянский Е. В., Кириченко А. С. [и др.]. Инновационный формат организации миссий по выведению малых космических аппаратов // «Труды МАИ» № 74. 2013. – 14 с.
3. Юдинцев В. В. Динамика отделения наноспутника формата кубсат от транспортно-пускового контейнера // Полёт. № 8-9. 2015. С. 10-15.