

УДК 629.7.076.6

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО СХОДА С ОРБИТЫ ВЕРХНЕЙ СТУПЕНИ РН «СОЮЗ» ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСТАТКОВ ТОПЛИВА В БАКАХ

©2010 И.В. Белоконов¹, Г.Е. Круглов², В.И. Трушляков³, В. В. Юдинцев¹¹Самарский государственный аэрокосмический университет,²ФГУП «ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» г. Самара,³Омский государственный технический университет

Рассматривается движение блока «И» РН «Союз» и космического аппарата после отделения. В статистической постановке определены кинематические параметры блока «И» после окончания работы реактивного сопла бака окислителя. Рассмотрен вариант отделения блока «И» без задействования реактивного сопла, что не приводит к ухудшению безопасности относительного движения блока «И» и КА. Это создаёт благоприятные предпосылки для изучения возможности обеспечения управляемого схода ступени с орбиты за счет газификации остатков топлива.

Ракета-носитель, система отделения, полезный груз, реактивное сопло

Основным требованием, предъявляемым к системам отделения КА от верхней ступени РН, является обеспечение безударного относительного движения. Безударное отделение тел должно обеспечиваться как на этапе близкого относительного движения, так и при дальнейшем движении по орбите. Безопасность «близкого» движения КА и верхней ступени РН определяется работой системы отделения, включающей в себя толкатели, которые сообщают относительную скорость КА и верхней ступени. Безопасность орбитального участка движения определяется выбором направления отделения КА.

Рассматриваемая в работе система отделения полезного груза от верхней ступени РН «Союз» (в дальнейшем блок «И») включает в себя три пружинных толкателя, кратковременно воздействующих на КА после срабатывания средств разделения, и реактивное сопло «увода», которое установлено с целью закрутки блока «И» и сообщения ему дополнительного импульса для безопасного увода от КА (рисунок 1).

Результаты численного моделирования процесса разделения свидетельствуют о том, что при номинальных значениях параметров блока «И» и системы

отделения блоку сообщается дополнительный импульс, увеличивающий его скорость относительно КА в благоприятном с точки зрения безударности направлении, то есть в направлении, противоположном орбитальной скорости КА. Однако, отклонения инерционно-массовых характеристик блока «И», возможные вариации тяги сопла увода существенно влияют на величину и направление приращения скорости. Для более детального изучения процесса отделения блока «И» построена математическая модель и произведено численное моделирование работы системы в статистической постановке (выполнено 1000 численных экспериментов).

Моделирование движения КА и блока «И» проводилось в два этапа. На первом этапе рассматривалось движение объектов с начала разделения и до окончания работы толкателей. Целью первого этапа было определение параметров движения блока «И» и КА после отделения. При этом инерционно-массовые и центровочные параметры блока и полезного груза, параметры толкателей рассматривались как случайные величины с равномерными законами распределения на предельных интервалах изменения их возможных значений.

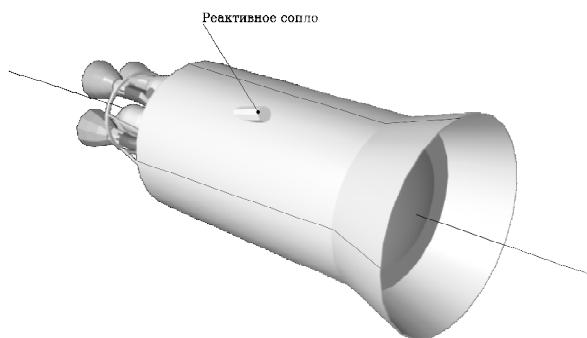


Рис. 1 – Схема расположения реактивного сопла на блоке “И”

Рассматривалось движение двух связанных тел под действием силы от трёх толкателей. При этом этап движения под действием толкателей разделялся на два участка: движение по направляющим (шпилькам) и свободное относительное движение КА и блока “И”. В результате проведённых расчётов получены следующие приращения линейной скорости КА в проекциях на оси орбитальной системы координат, соответствующей невозмущённой орбите на момент времени, предшествующий разделению:

$$\Delta V_t = (0,32 \pm 0,03) \text{ м/с},$$

$$\Delta V_r = (0,00 \pm 0,01) \text{ м/с},$$

$$\Delta V_n = (0,00 \pm 0,01) \text{ м/с},$$

где $\Delta V_t, \Delta V_n, \Delta V_b$ - приращения скорости КА на направление орбитальной скорости, в плоскости орбиты и перпендикулярно скорости, на направление бинормали, соответственно.

Отклонения кинематических параметров от средних значений приведены в предположении о нормальном законе распределения соответствующих случайных величин, а сами отклонения вычислены как утроенное значение стандартного отклонения (правило “трёх σ ”).

Для блока “И” приращения линейной скорости в проекциях на оси орбитальной системы координат принимали значения в диапазонах:

$$\begin{aligned} \Delta V_t &= -(0,90 \pm 0,10) \text{ м/с}, \\ \Delta V_r &= (0,00 \pm 0,01) \text{ м/с}, \\ \Delta V_n &= (0,00 \pm 0,01) \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом угловые скорости блока “И” в проекциях на оси связанной системы координат (с учётом погрешностей системы управления) также изменялись в диапазонах:

$$w_x = -(2,5 \pm 0,3)^\circ / \text{с},$$

$$w_y = (0,0 \pm 2,5)^\circ / \text{с},$$

$$w_z = (0,0 \pm 2,5)^\circ / \text{с}.$$

Вышеприведённые результаты получены на момент окончания работы толкателей.

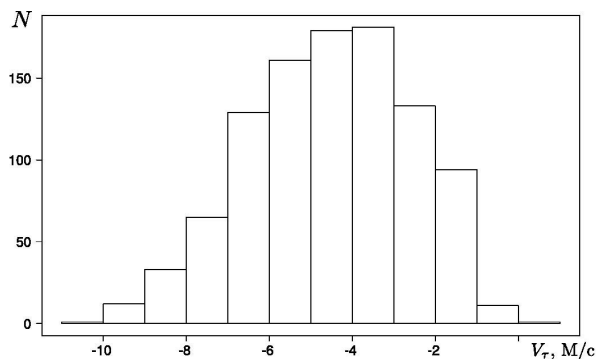


Рис. 2 – Распределение проекции V_t приращения линейной скорости блока “И” после окончания работы реактивного сопла

По штатной циклограмме работы РН «Союз» через 0,7с после отделения КА от блока “И” открывается реактивное сопло бака окислителя, создающее дополнительную силу, уводящую блок “И” от КА. Выбранное направление и точка приложения силы приводит к тому, что блоку “И” сообщается значительная угловая скорость. Максимальное время действия реактивного сопла составляет 50 секунд, после чего тяга падает до нуля. На момент времени окончания работы реактивного сопла получены следующие оценки значений проекций угловых скоростей блока “И” на его собственные оси:

$$w_x = (93 \pm 120)^\circ / \text{с},$$

$$w_y = (-11 \pm 117)^\circ / \text{с},$$

$$w_z = (2 \pm 69)^\circ / \text{с},$$

а также следующие средние значения проекций приращения линейной скорости блока:

$$\begin{aligned} \Delta V_t &= -5 \text{ м/с}, \\ \Delta V_r &= 2 \text{ м/с}, \\ \Delta V_n &= -5 \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (2)$$

На рисунках 2-5 показаны гистограммы распределения проекций приращения линейной скорости блока.

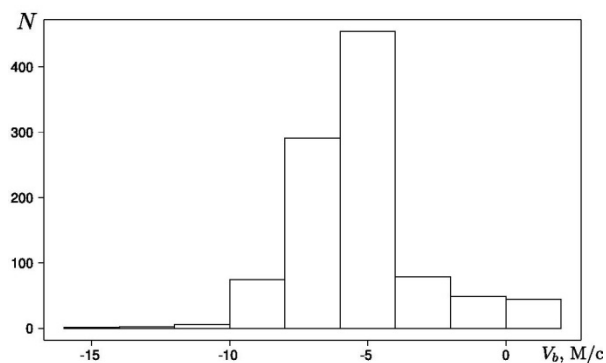


Рис. 3 – Распределение проекции V_b приращения линейной скорости блока “И” после окончания работы реактивного сопла

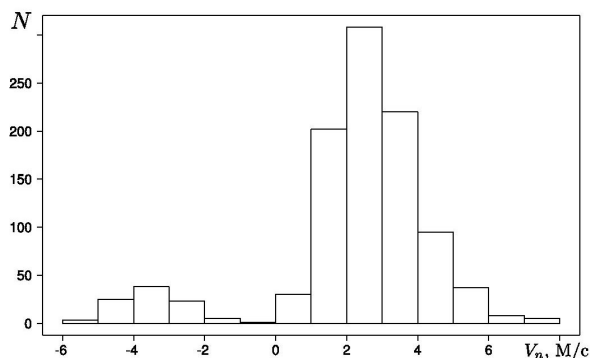


Рис. 4 – Распределение проекции V_n приращения линейной скорости блока “И” после окончания работы реактивного сопла

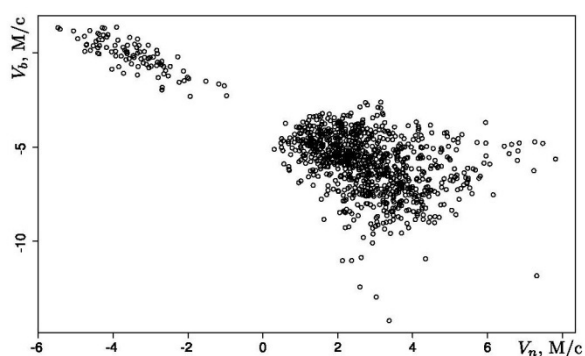


Рис. 5 – Статистическая зависимость между проекциями V_n и V_b приращения линейной скорости блока “И” после окончания работы реактивного сопла

Как следует из полученных результатов, значительная часть энергии расходуется на закрутку блока “И”. При

этом значение приращения его линейной скорости, обладая большой дисперсией, имеет среднее значение только около 7,5 м/с.

Возможны более эффективные схемы использования остаточных энергетических возможностей верхней ступени, в том числе и для её скорейшего управляемого спуска с орбиты.

Так, например, простейшим решением может быть изменение направления тяги реактивного сопла и установка его по продольной оси блока. При этом для предварительной стабилизации ступени после отделения КА могут быть использованы РДТТ. Это позволит изменить модуль орбитальной скорости блока “И” примерно на 20 м/с, что существенно выше значения скорости, сообщаемой блоку при традиционной схеме работы системы отделения.

Другое решение предлагается в работе [1], где для значительного увеличения импульса реактивного сопла предлагается использовать остатки топлива в баках отработавших ступеней РН с их предварительной газификацией. Как правило, после выключения маршевого ЖРД в баках РН остаются неиспользованные остатки жидкого топлива, величины которых составляют 2-3% от величины начальной заправки. В [1] на примере РН “Космос-3М” показано, что небольшие по массе доработки конструкции орбитальной ступени позволяют обеспечить тормозной импульс скорости около 66 м/с. Применительно к третьей ступени РН «Союз» такая доработка позволит создать тормозной импульс до 100 м/с, что значительно снизит время существования ступени на орбите с одновременным устранением возможности её взрыва на орбите.

Результаты расчётов первого этапа (кинематические параметры блока “И” и КА) использовались как начальные условия для интегрирования уравнений движения тел в их орбитальном движении. Рассмотрим движение блока “И” и КА после отделения. На рисунке 6 показана система координат, в которой записываются уравнения движения.

Плоскость OXY геоцентрической системы координат совпадает с плоскостью орбиты, ось OY проходит через точку перигея. КА и блок "И" рассматриваются как материальные точки, движущиеся в центральном поле силы тяжести Земли. Уравнение движения материальной точки имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -\frac{m \mathbf{r}_i}{r_i^3} - s(h) r(h) V_i^2 \frac{\dot{\mathbf{r}}_i}{|\dot{\mathbf{r}}_i|}, \quad (3)$$

где m - гравитационный параметр Земли; $\dot{\mathbf{r}}_i$ - вектор скорости; $s(h)$ - баллистический коэффициент объекта; $r(h)$ - плотность воздуха, зависящая от высоты. Плотность воздуха определялась для ночной атмосферы и максимального индекса солнечной активности.

Движение КА и блока "И" рассматривалось на двух орбитах. Первая орбита - низкая околокруговая, используемая для выведения КА типа "Прогресс", с максимальной высотой 245 км, минимальной высотой 193 км и наклоном 51 градус. Вторая орбита - эллиптическая с высотой апогея и перигея 730 км и 200 км соответственно, используемая для выведения КА прикладного назначения.

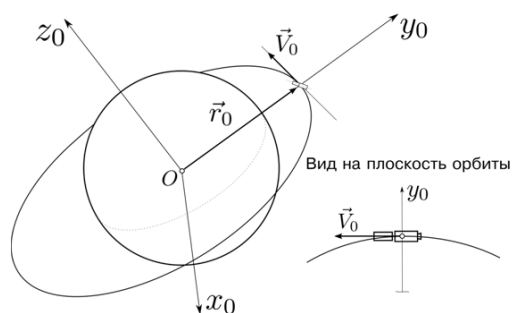


Рис. 6 – Система координат, используемая при моделировании движения КА и блока "И" после отделения

На рисунке 7 показана типовая траектория движения КА относительно блока "И" при отделении КА по направлению орбитальной скорости.

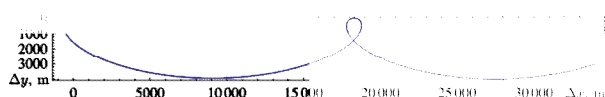


Рис. 7 – Изменение расстояния между КА и блоком "И" после отделения

Вследствие того, что начальные условия движения КА и ступени являются случайными величинами, моделирование орбитального движения блока и КА производилось в статистической постановке. В качестве начальных условий помимо параметров орбиты использовались кинематические параметры КА и блока "И" после окончания работы толкателей (1) и после работы реактивного сопла бака окислителя (2).

На рисунке 8 приведены результаты изменения расстояния между КА и блоком "И", полученные при статистическом моделировании для первой околокруговой орбиты при учёте режима включения реактивного сопла увода. Из анализа нижней и верхней границ области, полученной после проведения 1000 моделирований, можно сделать вывод, что случаи соударения КА и блоком "И" не возникают.

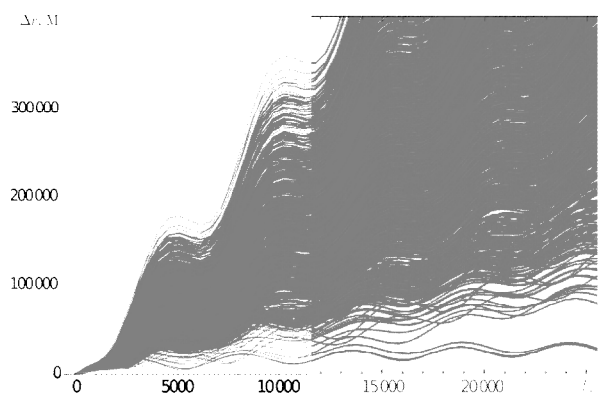


Рис. 8 – Изменение расстояния между КА и блоком "И"

Расчетное время существования блока "И" на рассмотренной орбите составляет в среднем 40 часов и изменяется в диапазоне от 20 до 60 часов. Время существования определялось по результатам численного интегрирования уравнений движения (3) и проверялось с использованием NASA Debris Assessment Software.

Также рассматривался вариант, при котором после окончания работы толкателей не включается реактивное сопло увода. На рисунке 9 совмещены две области изменения расстояний между

блоком “И” и КА для случаев с использованием и без использования реактивного сопла увода.

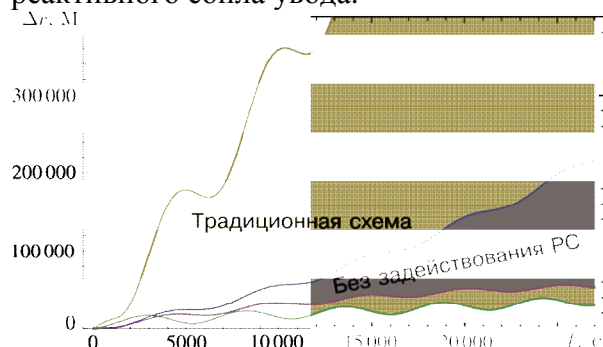


Рис. 9 – Границы изменения расстояний между КА и блоком “И” (орбита 1)

На рисунке 10 показаны результаты аналогичных расчётов, проведённых для эллиптической орбиты: приведены нижняя и верхняя границы, внутри которых лежат кривые изменения расстояния между КА и блоком “И”.

Расчётное время существования блока “И” на второй орбите находится в диапазоне от 65 до 135 суток. На это время практически не оказывает влияние дополнительный импульс, сообщаемый реактивным соплом.

Результаты проведённых расчётов свидетельствуют о том, что использование реактивного сопла увода в среднем увеличивают относительную скорость между КА и блоком третьей ступени. Однако, вследствие значительных разбросов инерционно - массовых характеристик ступени, параметров реактивного сопла, кинематические параметры блока на момент окончания работы сопла имеют значительную дисперсию.

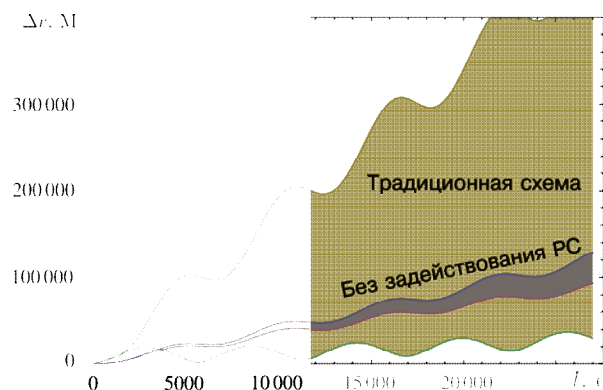


Рис. 10 - Границы изменения расстояний между КА и блоком “И” (орбита 2)

Как следует из графиков, представленных на рисунках 9 и 10, несмотря на то, что среднее значение приращения скорости блока “И” при отказе от использования сопла увода меньше, чем при его использовании, однако *статистически это не приводит к ухудшению безопасности относительного движения блока “И” и КА*. Кроме того, в этом случае дисперсия кинематических параметров блока значительно меньше, что приводит к более предсказуемому движению блока на орбитальном участке.

Приведённые результаты позволяют сделать вывод о возможности исключения режима использования реактивного сопла увода из циклограммы работы РН «Союз» без *опасности для отделяемого полезного груза*. Это позволяет рассмотреть варианты использования отработавшей ступени как платформы для проведения кратковременных научных экспериментов, а также как носителя пикоспутников. Кроме того создаются благоприятные предпосылки для изучения возможности обеспечения управляемого схода ступени с орбиты за счет газификации остатков топлива.

Библиографический список

1. Колесников К.С. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет [Текст]/К.С. Колесников, В.В. Кокушкин, С.В. Борзых, Н.В. Панкова – М.:Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
2. Трушляков, В. И. Развитие технологий снижения техногенного воздействия ракетных средств выведения на окружающую среду [Текст]/ В. И. Трушляков, В. В. Шалай и др. // Космонавтика и ракетостроение.- М.:ЦНИИМаш, 2008, №4 (53), с.117-124.
3. ГОСТ Р 25645.166-2004. Атмосфера Земли Верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли. [Текст] – Введ. 2004-12-31. М.: издательство стандартов, 2004-87с.

4. Охоцимский Д.Е. Основы механики космического полета [Текст] / Охоцимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г. // М.: Наука, 445с.

References

1. Position Paper on Space Debris Mitigation. International Academy of Astronautics (IAA) Edited by: Christophe Bonnal and John Hussey. Published by the

International Academy of Astronautics. F-75766. Paris Cedex, 16 France. May 2006.

2. Akhmetov R.N. Low-cost launch services for micro satellites by means of utilization of Soyuz orbital stage / R.N. Akhmetov, V.N. Novikov, I.V. Belokonov // Small Satellites for Earth Observation: Digest of the 7-th International Symposium of the International Academy of Astronautics. Berlin. May 4-8.2009.-p.521-526.

ANALYSIS OF POSSIBILITY OF RESIDUAL PROPELLANT UTILIZATION IN SOYUZ ORBITAL STAGE FOR CONTROLLABLE DESCENT

© 2010 I.V. Belokonov¹, G.E. Kruglov², V.I. Trushlyakov³, V.V. Yudinsev¹

¹Samara State Aerospace University,

² State research and production space rocket center "TsSKB-Progress", Samara

³Omsk State Technical University

Apparent motion of Soyuz orbital stage and spacecraft is investigated in statistical dynamic description. It is shown that exclusion of the breaking jet-nozzle on Soyuz orbital stage doesn't impair the safety of the expended payload and offer the challenge for utilization of orbital stage as carrier of picosatellites and use residual propellant in orbital stage for controllable descent.

Orbital stage, separation subsystem, payload, pressurizing gas jet nozzle, residual propellant

Информация об авторах

Белоконов Игорь Витальевич, д.т.н., профессор кафедры динамики полета и систем управления. Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, Московское шоссе, 34, 267-44-44, acad@ssau.ru. Динамика полета, баллистика, навигация в космосе.

Круглов Генрих Евгеньевич, к.т.н., доцент, начальник сектора ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 228-98-32, kruglov79@gmail.com. Системы отделения.

Трушляков Валерий Иванович, профессор кафедры конструирования машин, д.т.н., Омский государственный технический университет, Омск, vatrushlyakov@eandex.ru. Проектирование ракет-носителей.

Юдинцев Вадим Вячеславович, Самарский государственный аэрокосмический университет, к.т.н., доцент кафедры теоретической механики, 267-45-98, yudinsev@classmech.ru. Динамика систем многих тел.

Belokonov Igor Vitalievich, Doctor of Engineering, Professor at Flight Dynamics and Control System Department, Samara State Aerospace University, Samara, Moscovskoye highway, 34, 267-44-44, acad@ssau.ru. Flight dynamics, ballistics and space navigation.

Kruglov Genrikh Evgenievich, Candidate of Science, Associate Professor, Team Leader at FSUE SRP SC “TsSKB-Progress”, 228-98-32, kruglov79@gmail.com Separation systems

Trushlyakov Valery Ivanovich, Professor at Mechanical Engineering Chair, Doctor of Engineering, Omsk State Technical University, Omsk, vatrushlyakov@eandex.ru Launch vehicles design

Yudintsev Vadim Vyacheslavovich, Samara State Aerospace University, Candidate of Science, Associate Professor at Theoretical Mechanics Chair, 267-45-98, yudintsev@classmech.ru Many-body system dynamics