

УДК 629.7.021:519.2

Расчет и анализ безопасного отделения головного обтекателя твердотопливной космической ракеты-носителя Старт-1М

Савельев Дмитрий Михайлович

saveljevdm1trij@yandex.ru

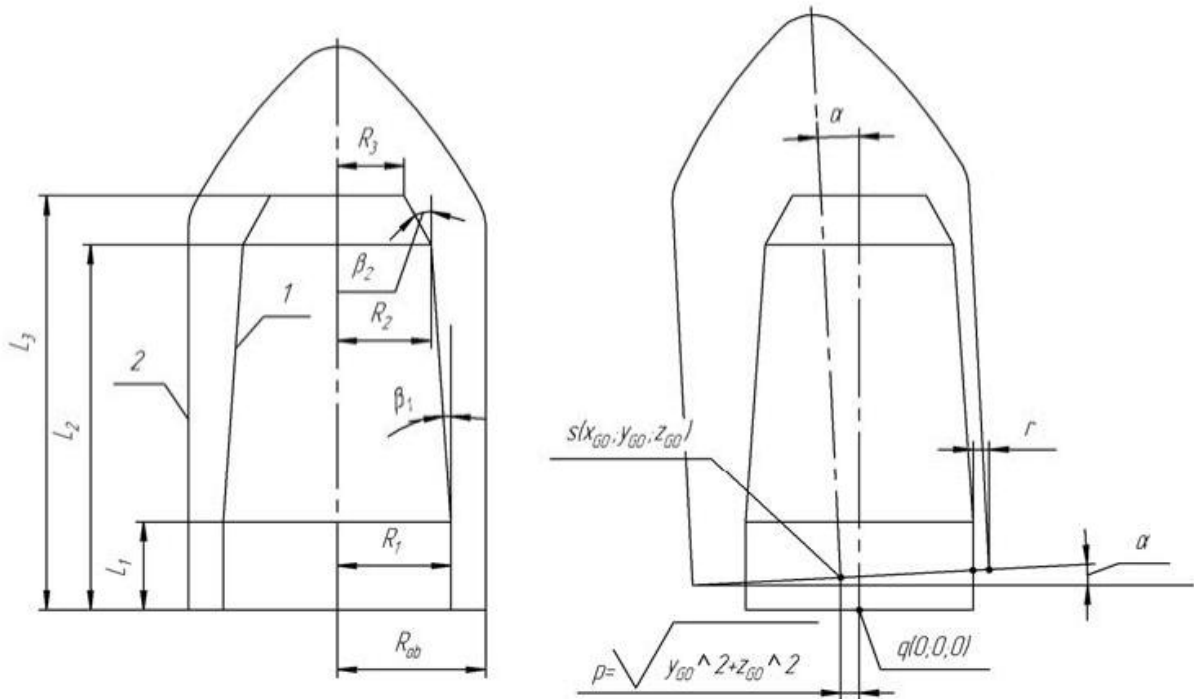
АО «Корпорация «МИТ», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача безопасного отделения головного обтекателя (ГО) на конечном участке полета твердотопливной космической ракеты-носителя (РН) Старт-1М. Представлена математическая модель динамики сброса ГО с системой, включающей пружинные толкатели и направляющие для компенсации угловых скоростей ГО в поперечной плоскости. Показано, что применение направляющих стабилизирует траекторию и исключает столкновение ГО с полезной нагрузкой (ПН) при его отделении.

Ключевые слова: головной обтекатель, динамика движения, пружинный толкатель, метод Монте-Карло

Введение. Актуальность работы обусловлена повышением востребованности конверсионных сверхлегких РН, обеспечивающих доставку малых космических аппаратов на низкую околоземную орбиту. В отличие от распространенного подхода с использованием двигателя увода, который создает значительные ударные и вибрационные нагрузки, неприемлемые для чувствительной аппаратуры космических аппаратов, в данной работе используется механическая система сброса ГО с помощью пружинных толкателей и направляющих [1]. Отделение ГО происходит на высоте ≈ 300 км, что позволяет не учитывать атмосферу в математической модели [2]. Таким образом, в данной задаче наибольшее влияние на возможное столкновение ГО с ПН оказывает разброс значений импульсов разрывных болтов и пружинных толкателей [3]. Целью работы является разработка математической модели, формирование численного критерия безударного отделения ГО и расчет относительного движения ГО и РН вследствие срабатывания пружинных толкателей.

Методы и материалы; результаты. Для расчета динамики движения ГО была разработана математическая модель в программном комплексе Euler [4]. В модели были учтены следующие возможные отклонения: координат центров масс ГО и РН, импульсов пружинных толкателей (± 3 % от номинальных значений), импульсов разрывных болтов, обеспечивающих первоначальное жесткое соединение ГО и РН (± 35 % от номинальных значений). Кроме этого, в модели учитывались кинематические связи, обеспечиваемые направляющими штангами. Для формирования численного критерия безударного отделения ГО (расчета текущего зазора между ГО и ПН) использована геометрическая модель (см. рисунок), где зазор определялся как минимальное расстояние между внутренней поверхностью ГО и зоной полезной нагрузки (ЗПН).



Геометрические параметры обтекателя и зоны полезной нагрузки:

1 — ЗПН; 2 — ГО; $L_1, L_2, L_3, R_1, R_2, R_3, \beta_1, \beta_2, R_{ob}$ — геометрические параметры ЗПН и ГО; α — угол наклона ГО относительно ЗПН; r — зазор; s — точка в центре основания ГО; q — точка в центре основания ЗПН; p — поперечное смещение точки s относительно точки q

Формулы для расчета локального зазора имеют вид:

если $x_{GO} \leq L_1$:

$$r = R_{ob} \cos \alpha - R_1 - p;$$

если $L_1 < x_{GO} \leq L_2$:

$$r = \left(R_{ob} - (p + R_2 + (L_2 - x_{GO}) \operatorname{tg} \beta_1) \frac{\cos \beta_1}{\sin(90^\circ + \beta_1 - \alpha)} \right) \cos \alpha;$$

если $L_2 < x_{GO} \leq L_3$:

$$r = \left(R_{ob} - (p + R_3 + (L_3 - x_{GO}) \operatorname{tg} \beta_2) \frac{\cos \beta_2}{\sin(90^\circ + \beta_2 - \alpha)} \right) \cos \alpha.$$

Численное интегрирование производилось методом Рунге — Кутты с автоматическим выбором шага. Для статистической оценки минимального зазора с учетом разброса входных параметров применен метод Монте-Карло [5]. Проведено 1000 вычислительных экспериментов с вариациями импульсов пружинных толкателей, времени срабатывания разрывных болтов, расположения центров масс РН и ГО, направление вектора поперечной угловой скорости, которые имела РН перед разделением. В результате анализа установлено, что минимальный зазор составляет 20 мм с вероятностью 99,7 %.

Заключение. Разработана модель, позволяющая рассчитывать зазор между сбрасываемым ГО и ЗПН. Проведенное статистическое моделирование методом Монте-Карло подтвердило, что при существующей форме ЗПН безударное разделение обеспечивается с высокой степенью надежности. Сформулированы рекомендации по форме ЗПН: для увеличения гарантийного запаса предлагается скорректировать контур в области наибольшего сближения путем уменьшения радиуса R_2 (см. рисунок).

Список источников

- [1] Панкова Н.В., Борзых В.В. *Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 373 с.
- [2] Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. *Баллистика и навигация космических аппаратов*. Москва, Дроф, 2004, 544 с.
- [3] Юмашев Л.П. *Головные части ракет (иллюстративный материал по курсу «Конструкция и проектирование ЛА»)*. Куйбышев, Куйбышев. авиац. ин-т, 1990, 36 с.
- [4] Бойков В.Г., Юдаков А.А. Моделирование динамики системы твердых и упругих тел в программном комплексе Euler. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2011, № 1, с. 42–52.
- [5] Савелова Т.И. *Метод Монте-Карло*. Москва, НИЯУ МИФИ, 2011, 152 с.