

УДК 629.196.3

Канд. техн. наук А.И. Логвиненко

ОСОБЕННОСТИ ПАССИВАЦИИ ОТРАБОТАВШИХ КОСМИЧЕСКИХ СТУПЕНЕЙ РН

Обобщен современный опыт пассивации топливных систем отработавших верхних ступеней ракет-носителей как эффективного средства борьбы с космическим мусором.

Узагальнено сучасний досвід пасивації паливних систем верхніх ступенів ракет-носіїв, які відпрацювали, як ефективного засобу боротьби з космічним сміттям.

The paper summarizes on the up-to-date experiences of passivation of fuel systems of launch vehicles depleted upper stages as an efficient means of space debris utilization.

За последние 60 лет отработавшие ступени РН и КА значительно пополнили космический мусор (КМ). За это время совершено ~5250 пусков, запущено 6700 КА (более 60 государств), из них 3102 пуска – СССР (2931 – успешные), 1552 – США (1423 – успешные), 202 – "Арианспейс", Куру; КНР в последнее время набирает темпы запусков КА.

Следует отметить, что с Плесецка проведены 1592 запуска, с Байконура – 1395; по программе "Морской старт" – 36 пусков (1-й запуск 27.03.1999 г – с экватора, на котором массу полезного груза удалось повысить на 25–30% относительно обычного пуска). Сейчас в мире в среднем проводится 75 пусков/год, рекордным был 1975 г. (133 пуска); минимальное количество – 3 пуска в 1957 г.

Спутники наряду с полезностью (обеспечение связи, навигация, метеопрогнозы и т.д.) создали огромную проблему. Вокруг Земли вращается ~17 тыс. одних только крупных объектов, а мелких – не счесть (~50 тыс. сантиметрового размера), причем со скоростью 8–10 км/с (скорость пули, например, ~1,5 км/с). На орбите также находится 1,5 тыс. цельных отработавших ступеней.

В 2007 г. китайские военные, испытывая космическое оружие, уничтожили собственный метеоспутник "Феньюнь-1С", расстреляв его ракетой "земля-космос" на высоте 800 км. Согласно эффекту домино

образовалось большое количество обломков, засоривших орбиту.

Из-за возможной встречи с КМ при помощи компьютеров проводятся 3–5 коррекций в неделю траектории полета МКС.

Так, недавно после 20-летней работы на орбите взорвался секретный метеоспутник США DMSP F-13, образовав около 40 обломков.

При пусках РН "Зенит" КБ "Южное" дважды сталкивалось со взрывами отработавших вторых ступеней РН, и им были приняты соответствующие меры (выбор "окна пуска", минимизация остатков компонентов топлива и др.). Более того, известен случай, когда после 16-летнего пребывания на орбите был зафиксирован факт взрыва отработавшей космической ступени РН "Циклон-3".

Непредвиденные разрушения взрывного характера отработавших ступеней и КА являются основным источником образования орбитального мусора. Пассивация служит одной из самых эффективных мер по борьбе с космическим мусором (количественно уменьшает его не менее чем в два раза) [1–8] наряду с другими (увод с орбиты, применение специальных устройств для торможения объекта, исключение "штатного" сброса различного мусора).

При ее реализации выполняется комплекс последовательных или совместных операций. Их смысл состоит в утилизации остаточной энергии, сохраняющейся в топ-

ливных баках в виде давления газа наддува, остатков компонентов топлива либо механизма их физико-химического взаимодействия.

За последние десятилетия по различным направлениям борьбы с космическим мусором появились десятки стандартов, руководств и методических указаний, разработанных на национальном, региональном и международном уровнях. По данной теме в настоящее время работают около 40 компаний и космических агентств под руководством таких ведущих международных организаций, как ECSS – Европейское сотрудничество в области космической стандартизации, ISO – Международная организация по стандартизации и IADC – Международный комитет по координации работ по борьбе с космическим мусором (при ООН).

Согласно ISO 24113:2011 [4] основные направления борьбы с КМ:

- в процессе выполнения штатных операций исключение преднамеренного сброса КМ на околоземную орбиту;
- исключение различного рода разрушений на околоземной орбите;
- после завершения своей миссии удаление космических аппаратов и отработавших орбитальных ступеней РН из защищенных орбитальных областей;
- осуществление необходимых действий для минимизации риска возможных столкновений с другими космическими объектами.

Основные требования, предъявляемые к системам пассивации, сводятся к следующему [8]:

1. Сброс газов и остатков компонентов топлива должен происходить в упорядоченной последовательности, исключая, например, возможность соударения с объектом или попадания их в зону действия лучей антенн радиосвязи.

2. При сбросе возникающие возмущения должны быть минимальными, не превышая допустимых значений.

3. Система должна иметь минимальную массу, высокий уровень надежности и быть простой в эксплуатации на всех этапах работы с изделием, обладая доступностью для каких-либо возможных конструктивных изменений и получения телеметрической информации о характере поведения ее параметров.

4. Единство комплектации системы для всех видов модификации РН и обеспечение ее работоспособности в течение всего гарантийного срока хранения и эксплуатации РН.

5. Минимальная стоимость проектно-конструкторской разработки системы и ее экспериментальной отработки.

В общем случае при работе системы пассивации происходят сложные гидродинамические процессы с фазовыми превращениями и возможными химическими взаимодействиями. Поэтому при ее создании решаются такие задачи [9]:

1. Исследование физической картины происходящих процессов в баках при сбросе давления, включающей теплофизику и кинетику кипения жидкого компонента; процессы взаимодействия в баке остатков компонентов топлива в различных их фазовых состояниях с учетом присутствия генераторных газов наддува; гидродинамику остатков жидких компонентов топлива в баках.

Необходимо отметить, что в технике процессы кипения играют значительную роль. Теплообмен в кипящих жидкостях является одним из самых важных и сложных вопросов. Несмотря на огромное количество работ, до настоящего времени подробное решение многих прикладных задач, связанных с кипением, отсутствует [10].

2. Определение изменения по времени давления в баках в зависимости от начальных условий (массы, температуры компонента и др.) с учетом поведения остатков жидких компонентов под действием малых и переменных перегрузок, их испарения в емкости и последующего замерзания.

3. Определение тяговых характеристик системы с учетом расположения жиклеров и сопел с косым срезом, расходных характеристик входных устройств сопел, временных параметров срабатывания пиротехнических узлов, разнотяговости сопел, а также особенностей их конструкторской отработки.

4. Решение вопросов экспериментальной отработки системы:

- определение условий моделирования процессов, объема и последовательности испытаний на моделях;

- определение параметров системы при модельных и натурных испытаниях изделия с оценкой энергетических характеристик (импульса и тяги) системы в зависимости от совокупности определяющих факторов.

5. Разработка перспективных направлений улучшения и повышения характеристик системы.

В настоящее время в литературе отсутствуют систематизированные материалы по проектированию, исследованию и экспериментальной отработке таких систем. В отдельных работах [9] предложены частные конструктивные решения и приведены общие сведения [11, 12].

Разработка подобных систем представляет собой новое направление в ракетно-космической технике. Их совершенствование еще далеко не завершено.

Физическую картину процессов при сбросе давления из баков можно разделить на ряд стадий [9, 10]:

1. Сброс газа наддува до момента достижения давления насыщенных паров жидкости P_s , соответствующего ее температуре. Когда давление в баке становится меньшим $P_s(t)$, жидкость в нем оказывается перегретой относительно нового значения давления. Это состояние крайне неустойчиво и легко нарушается с внезапным образованием двух фаз в виде насыщенного пара и кипящей жидкости. Продолжительность неустойчивого состояния зависит от многих факторов: степени чистоты жидкости, ко-

личества центров парообразования и степени перегрева [11, 12].

2. Перегрев жидкости, зарождение и развитие парообразования; возникновение и поддержание перепада давления за счет вскипания жидкости и выделение растворенного неконденсированного газа.

Процесс сводится к испарению жидкости с последующим истечением через патрубки сброса. В зависимости от темпа сброса давления из бака установлены следующие закономерности поведения жидких компонентов топлива:

Величина $\left(\frac{dP}{d\tau}\right), \frac{\text{атм}}{\text{мин}}$	Особенности поведения жидкости
$\leq 0,2-0,3$	Поверхностное стационарное испарение с выравниванием температуры по глубине за счет теплопроводности
0,3–3	Испарение с периодическим вскипанием и выравниванием профиля температуры
$\gg 3$	Интенсивное вскипание по всему объему емкости

При уменьшении давления меняется температура кипения и сам характер процесса. Наблюдается четкая граница, разделяющая слой, в котором пузырьки возникают и растут, и нижний спокойный, некипящий слой. Уменьшается и критический тепловой поток, резко падает количество активных центров, а размеры пузырьков намного увеличиваются. Рост пузырьков носит взрывной характер с интенсивным звуковым шумом. Температура поверхности жидкости испытывает значительные пульсации. Инерционность вскипания дегазированных компонентов составляет: для АТ – 0,4–0,5 с; для НДМГ – 0,6–0,8 с. Она характеризует способность жидкости пребывать в перегретом состоянии. Поведение кипящей жидкости при сбросе давления характеризуется образованием следующих областей в емкости:

- верхней (область пенообразования, вы-

сота которой непрерывно меняется даже при постоянном давлении в емкости);

- средней (слой интенсивного кипения);
- нижней (область образования большого количества отдельных пузырьков различного размера на внутренней поверхности емкости с последующим их ростом и отрывом от поверхности).

3. Самозамораживание и сублимация испаряющихся остатков топлива в полости дренируемого бака. По мере сброса в момент достижения давления тройной точки жидкости происходит спонтанное образование твердой фазы в баке. Эта спонтанность свидетельствует о выравнивании температурного поля жидкости по всему объему в результате бурного ее перемешивания. Лед образуется практически мгновенно за 10^{-2} – 10^{-3} с, представляя собой белое вещество пористой структуры с сильно выраженной адгезией со стенками емкости.

При истечении парожидкостной смеси из трубопровода на его срезе образуется бахрома, которая при больших скоростях истечения уменьшается и периодически срывается. Такой эффект наблюдался и при исследовании истечения жидкого азота в вакуум через жиклеры диаметром 4, 7 и 12 мм [10].

Оценка доли замерзшей массы самоиспаряющихся компонентов топлива по формуле

$$\varepsilon = \frac{m_{\text{л}}}{m} = \frac{3r - c_{\text{ж}} \Delta t}{3(r + \lambda) + 2c_{\text{ж}} \Delta t}$$

показала, что без подвода тепла может замерзнуть 50–70% массы остатка топлива, а с учетом подвода тепла от конструкции бака – 10–30%.

В формуле обозначены соответственно

- $m_{\text{л}}, m$ – массы льда и исходной жидкости;
- r, λ – удельные теплоты испарения (парообразования) и плавления;

$c_{\text{ж}}$ – удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении;

$\Delta t = t_n - t_3 + \Delta t_{\text{нр}}$ – перепад температур,

где t_n и t_3 – начальная температура жидкости и ее температура замерзания, $\Delta t_{\text{нр}} \approx 5^\circ\text{C}$ – температурный перегрев.

Отметим, что для исключения самозамораживания можно, например, использовать локальные термомосты (с подводом тепловой энергии от более нагретых элементов конструкции) или специальные покрытия (катализаторы), не допускающие намерзания льда, или же рационально подобрать геометрические размеры элементов конструкции. В случае применения самовоспламеняющихся компонентов топлива с целью получения дополнительного источника энергии можно организовать самоуправляемое дожигание их остатков в специальной камере или непосредственно в одном из баков. Такой рациональный вариант весьма перспективен и нашел практическое применение, например, в химических системах предварительного наддува топливных баков и при работе газореактивной системы разделения ступеней и системы отделения объекта.

Интересны вопросы гидродинамики перемещения жидких остатков в баках при сбросе давления. Показано [11, 12], что после отделения отработавшей ступени необходимо какое-то время для перехода жидкости из состояния, соответствующего действию поля тяготения, в состояние невесомости, составляющее 2–3 с при небольших степенях заполнения бака. Далее механизм движения жидкости в емкости определяется

критерием Бонда $Bo = \frac{n_x g D^2}{\sigma}$, где n_x – пе-

регрузка; D – диаметр бака; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Ниже показана эта зависимость режима движения жидкости в баке от критерия Бонда.

Значение критерия Бонда Во	0–3,37	3,37–10 ³⁺⁴	10 ³ –10 ⁴⁺⁵	>>10 ⁵
Режим движения жидкости в баке	Неподвижное состояние ($n_x \approx 10^{-6} - 10^{-7}$)	Стекание по стенкам емкости	Свободное падение жидкости, как твердого тела	Образование отдельных капель, шаров жидкости

Обработка экспериментальных данных, полученных при пусках ряда РН, показала, что остатки в баках в основном перемещаются как твердое тело.

Казалось бы, для пассивации необходимо просто вскрыть топливные баки и баллоны системы наддува. Однако при разработке таких систем возникают многие проблемы [9, 14, 15].

1. Нежелательные возмущения из-за крутящих моментов или паразитных приращений скорости, возникающих при сбросе остатков топлива и газа наддува. Поэтому рекомендуется.

2. Исключение возможных взрывов отработавшей ступени: ее топливных баков, двигательной установки, элементов питания, пироустройств и др. Обычно к концу миссии минимизируют остатки топлива, поскольку при аэродинамическом (солнечном) нагреве ступени они испаряются и повышают давление вплоть до разрушения конструкции бака.

3. Организация истечения самоиспаряющихся остатков жидких компонентов топлива и их паров в вакуум.

Как следует из данного краткого обзора, процесс пассивации отработавших ступеней РН представляет собой сложный комплекс ряда взаимосвязанных мероприятий и применения специальных устройств. В настоящее время это актуальное и новое направление, которое в силу необходимости все более широко применяется, требует дальнейшего более детального обобщения и развития [8].

Список использованной литературы

1. ESA, Requirements on Space Debris Mitigation for ESA Projects, ESA/ADMIN/IPOL(2008)2 Annex 1, 1 April 2008.
2. European Code of Conduct for Space Debris Mitigation, Issue 1.0, 28 June 2004.
3. IADC Space Debris Mitigation Guidelines, IADC-02-01, Revision 1, September 2007.
4. ISO 24113:2011, Space Systems – Space Debris Mitigation Requirements.
5. ISO 23339:2010, Space Systems – Unmanned Spacecraft – Estimating the Mass of Remaining Usable Propellant.
6. ISO 26872:2010, Space Systems – Disposal of Satellites Operating at Geosynchronous Altitude.
7. ISO 27852:2011, Space Systems – Estimation of Orbit Lifetime.
8. Льюис Х. и др. Потенциальные возможности и средства по борьбе с космическим мусором и уменьшению орбитального мусора/АС-12-А6.4.3, Неаполь, Италия 01.10.2012 г.
9. Мащенко А.Н., Логвиненко А.И. Борьба с засорением космического пространства методом пассивации ТС верхних ступеней РН//Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2007. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное".
10. 64 Куда С.А., Логвиненко А.И. и др. Исследование условий замерзания жидкого азота в магистралях при истечении в вакуум//Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2007. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное".
11. Конструкция управляемых баллистических ракет/ Под ред. А.М. Синюкова и Н.И. Морозова. – М.: Воениздат, 1969.
12. Колесников К.С., Козлов В.И., Кокушкин В.В. Динамика разделения ступеней ЛА. – М.: Машиностроение, 1977.

Статья поступила 13.08.2015