

А. В. Корольков, В. Б. Сапожников, Н. В. Ефремов
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал, МГТУ им. Н.Э.Баумана, ООО НТВЦ «ЭДУКОН»). **Динамика жидкости в фазоразделительном устройстве в период опорожнения топливного бака космического аппарата.**

Фазоразделительное устройство (ФУ) — внутрибаковое устройство капиллярного типа — предназначено для предотвращения попадания газа наддува в расходную магистраль двигателя установки космического аппарата [1]. ФУ представляет собой камеру со стенками (экранами) из комбинированного пористо-сетчатого материала (КПСМ)[2], обладающего сепаратными свойствами, находящуюся непосредственно на заборном устройстве. При штатной работе системы подачи жидкого топлива в двигательную установку ФУ заполнено жидкостью, а экраны пропускают внутрь ФУ жидкость и не пропускают газ. Для повышения надежности работы ФУ внутри бака установлены дополнительные элементы капиллярного типа — секторные элементы и V-образные транспортные желоба [3]. Эти устройства удерживают в себе определенный объем жидкости не зависимо от гравитационной обстановки на борту космического аппарата, обеспечивая контакт этого объема с поверхностью ФУ. При работе двигателей весь объем жидкого топлива находится в непосредственном контакте с ФУ (в рабочем состоянии). В этом случае штатная работа ФУ гарантирована. При выключенных двигателях в условиях невесомости жидкость может занимать произвольное положение внутри бака, в частности может не иметь контакта с поверхностью ФУ. При запуске двигателя в условиях невесомости в заборное устройство поступает жидкость непосредственно из ФУ. Секторные элементы и V-образные транспортные желоба обеспечивают подпитку ФУ жидкостью, не допуская попадания газа наддува внутрь ФУ. Создаваемое работающими двигателями ускорение за определенное время (время релаксации) возвращает весь объем жидкости в рабочее состояние. В соответствии с требованиями долгосрочной эксплуатации[4] система подачи жидкого топлива в двигательную установку должна обеспечить выработку практически всего объема жидкого топлива при выполнении операций в соответствии с циклограммой полета. Невырабатываемый остаток жидкого топлива не должен превышать 1% от начального объема.

В соответствии с циклограммой полета космического аппарата «Интергелиозонд» начальный объем жидкого топлива составляет $2/3$ объема бака. Наиболее критичным в смысле обеспечения непрерывного потока жидкого топлива в заборное устройство является заключительный этап полета — этап поддержания орбиты вокруг Солнца. На этом этапе предполагается многократно включать и выключать двигатели на различное время с целью выполнения коррекции орбиты. Пока вне ФУ имеется жидкое топливо, внутрибаковые капиллярные элементы обеспечивают штатную работу ФУ. При полном исчерпании жидкости вне ФУ внутрь ФУ попадает газ наддува, и сплошность потока жидкого топлива в расходную магистраль двигательной установки обеспечивает конструкция ФУ.

На рис. 1 показана принципиальная схема ФУ. Пространство между нижним экраном ФУ и стенкой бака представляет собой капилляр, удерживающий определенный объем жидкости в любой гравитационной обстановке. Верхний и нижний экраны

образуют основное пространство ФУ. Внутренний экран отделяет стакан от основного пространства ФУ. Верхний, нижний и внутренний экраны выполнены из КПСМ, обладающего сепарирующим свойством.

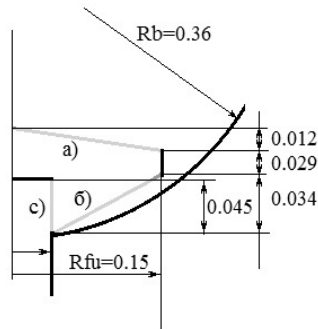


Рис. 1. Принципиальная схема ФУ. а), б), в) — верхний, нижний (внешние) и внутренний экраны, R_b — радиус сферического бака, R_{fu} — радиус ФУ. Размеры приведены для космического аппарата «Интергелиозонд»

Для каждого КПСМ экспериментально определена капиллярная удерживающая способность (КУС) или критическое давление P_k . Заданный расход топлива обеспечивается давлением наддува с учетом потери давления при прохождении жидкости сквозь экраны и сужения. Потеря давления на экранах зависит от скорости потока жидкости $\Delta p = \xi \cdot \rho \cdot u^2 / 2$, где ξ — коэффициент гидродинамического сопротивления, полученный для каждого типа КПСМ экспериментально, ρ — плотность жидкости, u — скорость потока жидкости. По мере осушения поверхности экрана (увеличения площади контакта с газом) площадь смоченной поверхности уменьшается, что при заданном расходе приводит к увеличению скорости жидкости сквозь экран, и увеличению потери давления. При превышении критического давления газ прорывается сквозь экран.

Следует заметить, что, в отличие от обычных сеток в качестве фазоразделителя, КПСМ обладает свойством саморегенерации — жидкость продолжает отбираться из внешней области по отношению к фазоразделительному экрану и после прорыва газа.

Характерные размеры элементов ФУ малы по сравнению с критическими длинами волн неустойчивости Релей-Тейлора, поэтому за счет капиллярных сил вся жидкость внутри ФУ будет находиться в контакте с фазоразделительными экранами независимо от того, работают двигатели или нет.

С целью определения динамики жидкого топлива в ФУ и подбора других конфигураций ФУ построена имитационная модель функционирования ФУ после прорыва газа. Результаты расчетных испытаний ФУ космического аппарата «Интергелиозонд» представлены на рис. 2.

Жидкое топливо вне ФУ при работе двигателей находится в рабочем состоянии (рис. 2 а), в невесомости контакт жидкости с поверхностью ФУ обеспечивают внутри-баковые капиллярные элементы. После отбора остатков жидкости из внутрибаковых капиллярных элементов отбор будет осуществляться из зазора между стенкой бака и ФУ (рис. 2 б). На рис. 2 в) показан момент прорыва газа в ФУ. Давление внутри ФУ выравнивается с давлением наддува, и капилляр, образованный стенкой бака и ФУ, заполняется жидкостью из ФУ (рис. 2 г). Через внутренний экран осуществляется отбор жидкости из основного пространства ФУ до момента прорыва газа в стакан (рис. 2 д). Жидкость в зазоре между стенкой бака и ФУ удерживается силой поверхностного натяжения. Объем этой жидкости является невыработываемым остатком (рис. 2 е, ж, з).

В соответствии с данными рис. 1, этот объем составляет менее 1% от начального объема жидкого топлива в баке, что удовлетворяет требованиям ТЗ.

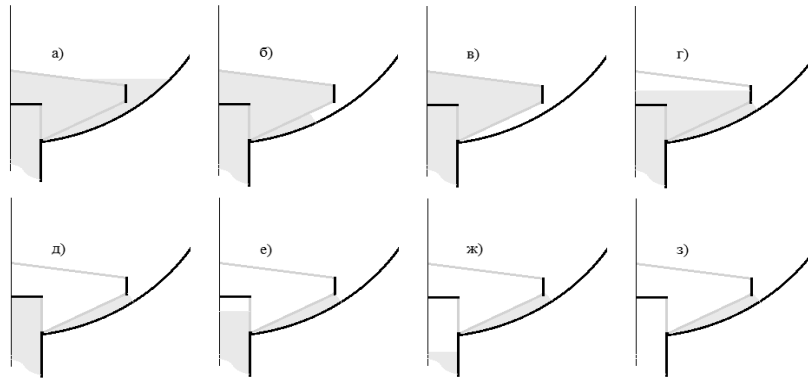


Рис. 2. Динамика жидкого топлива в ФУ после прорыва газа. а) — штатная работа ФУ совместно с внутрибаковыми капиллярными элементами, б) — отбор жидкости из зазора между стенкой бака и ФУ, в) — Момент прорыва газа в ФУ, г) — прорыв газа внутрь ФУ, заполнение зазора между стенкой бака и ФУ, д) — момент прорыва газа в стакан сквозь внутренний экран, е), ж), з) — отбор жидкости из стакана.

На рис. 3 представлена другая конфигурация внутреннего устройства ФУ.

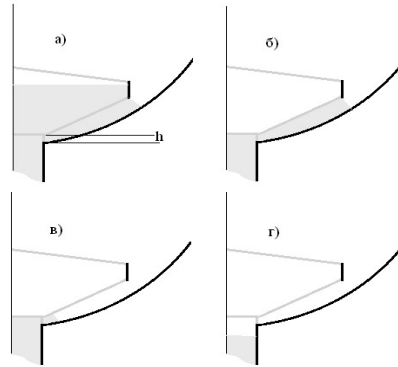


Рис. 3. Другая конфигурация внутреннего устройства ФУ. а) — прорыв газа внутрь ФУ, заполнение зазора между стенкой бака и ФУ, б) — момент прорыва газа в стакан сквозь внутренний экран, в) — отбор жидкости из зазора между стенкой бака и ФУ, г) — отбор жидкости из стакана.

В отличие от конфигурации внутреннего устройства ФУ космического аппарата «Интергелиозонд» в новой конфигурации внешние экраны ФУ подняты на высоту h относительно сливного отверстия в баке, верхняя стенка стакана заменена экраном из КПСМ и опущена до нижнего края нижнего экрана.

В новой конфигурации увеличен объем зазора между стенкой бака и ФУ (объем жидкости, находящийся в контакте с нижним экраном ФУ в любой гравитационной обстановке), появился контакт через экран между зазором и стаканом.

Режим работы ФУ при наличии жидкости вне объема ФУ в новой компоновке не изменился. После прорыва газа в ФУ и заполнения зазора между стенкой бака и ФУ (рис. 2 а) осуществляется отбор жидкости из ФУ. Жидкость в зазоре удерживается капиллярными силами. По исчерпанию жидкости внутри ФУ (рис. 2 б) отбирается жидкость из зазора, поскольку капиллярное давление на поверхности капилляра су-

щественно меньше КУС (рис. 3 в). После прорыва газа в стакан часть жидкости может пролиться в зазор, но, поскольку при этом уровень жидкости в зазоре окажется ниже нижнего экрана, капиллярный эффект не возникает, и вся жидкость благополучно будет отобрана в расходную магистраль (рис. 3 г).

Невырабатываемый остаток топлива в баке при этой конфигурации составляет объемы жидкости в смоченных КПСМ и других внутрибаковых конструкций.

При расчете величины параметра h используются свойства КПСМ, расход жидкости на заключительном этапе полета, геометрические данные. Для ФУ «Интергели-озонда» величина h должна составлять 3 мм. Несмотря на очевидное преимущество новой конфигурации ФУ, существуют проблемы в технологии его изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корольков А. В., Партола И., Сапожников В. Б.* Теоретические основы разработки и экспериментальной отработки капиллярных заборных устройств с минимальными остатками топлива. В сб.: Научно-технические разработки ОКБ-23 — КБ «Салют». М.: Воздушный транспорт, 2006, с. 313–319.
2. *Новиков Ю. М., Большаков В. А.* Инженерная школа МГТУ им. Н. Э. Баумана: Комбинированные пористые сетчатые металлы. Эффективные, безопасные и экологичные изделия на их основе. — Безопасность жизнедеятельности, 2005, № 11, с. 53–56.
3. *Корольков А. В., Королькова Л. В., Сапожников В. Б., Маслов В. А.* Оценка объема жидкости в телесных углах транспортных желобов топливного бака космического аппарата. — Лесной вестник, 2018, т. 22, № 2, с. 120–124.
4. *Александров А. А., Хартов В. В., Новиков Ю. М., Крылов В. И., Ягодников Д. А.* Современное состояние и перспективы разработки капиллярных топливозаборных устройств из комбинированных пористо-сетчатых материалов для космических аппаратов с длительным сроком активного существования. — Вестник Московского гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2015, № 6 (105), с. 130–142.