

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
В ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОМ
ЖИДКОСТНОМ РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ

С. М. Фролов, В. С. Аксенов, В. С. Иванов

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

В настоящее время возможности совершенствования существующих типов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) для космических транспортных систем практически полностью исчерпаны. Качественный скачок в развитии космического двигателестроения связывают с разработкой и внедрением принципиально новых типов ЖРД, работающих на импульсно-детонационном горении [1]. В таких импульсно-детонационных ракетных двигателях (ИДРД) топливные компоненты будут периодически подаваться в камеру сгорания и химически реагировать в периодически инициируемых детонационных волнах. Как известно, вследствие сильного ударного сжатия химическая реакция в детонационной волне протекает в режиме самовоспламенения при высоких избыточных давлениях и температурах. Следовательно, чтобы эффективно преобразовывать химическую энергию топлива в работу расширения, в таких двигателях нет необходимости поддерживать очень высокое давление в камере сгорания и использовать высоконапорные турбонасосные агрегаты.

В литературе имеются десятки публикаций по экспериментальным исследованиям рабочего процесса в ИДРД, предназначенных для использования в качестве основных силовых установок космических аппаратов (см. [1]). Другое привлекательное приложение для ИДРД — микро-ИДРД для коррекции положения и орбитальных перемещений искусственных спутников Земли. Ожидается, что благодаря высокой термодинамической эффективности цикла с де-

тонационным горением [2] и высокой повторяемости детонационных импульсов такие микро-ИДРД превзойдут существующие аналоги не только по конструктивным (технологичность изготовления, простота конструкции и др.) и функциональным (надежность, циклическая стабильность и др.) характеристикам, но и по удельным тяговым характеристикам (удельный импульс, удельная масса и др.). Если будущий облик маршевых ИДРД в литературе активно обсуждается, то облик микро-ИДРД до сих пор не определен.

Цель данной работы — формирование будущего облика микро-ИДРД для системы стабилизации космических аппаратов на основе экспериментальной реализации низкочастотного импульсно-детонационного цикла в капельных смесях жидкого углеводородного горючего с газообразным кислородом в коротких трубках малого диаметра.

В ходе выполнения работы нами (1) создан экспериментальный стенд с системой подачи горючего и окислителя, системой зажигания, системой электропитания, системой диагностики, цифровым контроллером, системой мониторинга горючих газов и системой аварийной безопасности; (2) разработано и испытано импульсное зажигающее устройство (ИЗУ), работающее в режиме однократного импульса и в частотном режиме с контролируемой частотой импульсов; (3) разработан и испытан низкочастотный демонстратор рабочего процесса микро-ИДРД (рис. 1).

Демонстратор состоял из ИЗУ и присоединенной к нему детонационной трубки. Корпус ИЗУ был выполнен из латуни. Газообразный кислород подавался в рубашку охлаждения с внутренними ребрами. Каналы теплообменника были выполнены таким образом, чтобы высокоскоростной поток кислорода пересекал струю жидкого горючего (н-гексана), подаваемого с помощью топливного инжектора (стандартный инжектор для автомобиля ВАЗ-2110), и направлял горючее в сопловое отверстие, соединяющее систему подачи компонентов смеси с камерой сгорания ИЗУ. Камера сгорания ИЗУ имела сложную форму с расширяющимися и сужающимися участками. В стенках камеры сгорания были предусмотрены отверстия для установки стандартных автомобильных свечей зажигания или заглушек. Детонационная трубка диаметром 15 мм и длиной 500 мм, выполненная из стали, присоединялась к камере сгорания ИЗУ с помощью резьбового соединения.

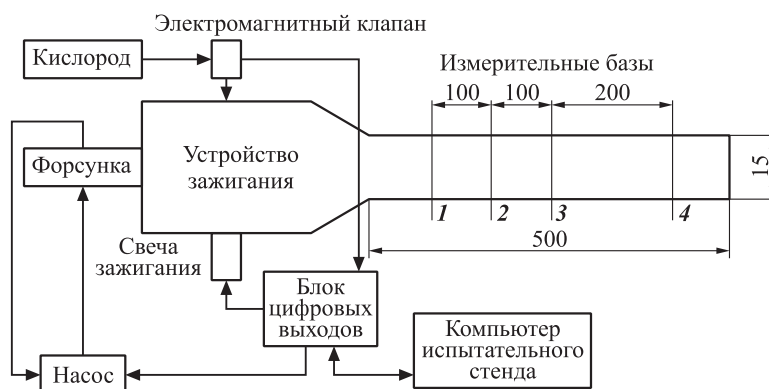


Рис. 1 Схема демонстратора рабочего процесса микро-ИДРД: 1–4 — ионизационные зонды. Размеры указаны в миллиметрах

Вдоль детонационной трубки с шагом 100 мм были проделаны резьбовые отверстия для ионизационных зондов. В огневых испытаниях использовалось 4 ионизационных зонда, обозначенных на рис. 1 цифрами 1–4. Зонд представлял собой изолированный стальной стержень, укрепленный в резьбовой втулке. При проведении измерений стержень углублялся в трубку не менее чем на треть ее внутреннего диаметра. На стержень подавалось постоянное напряжение от +100 до +200 В. При наличии в среде отрицательных зарядов в электрической цепи зонда возникал ток, который регистрировался персональным компьютером с помощью аналогово-цифрового преобразователя USB-3000 с периодом опроса 0,3 мкс. Постоянная времени измерительного тракта зонда существенно зависела от проводимости среды. Типовые значения постоянной времени при детонации и горении составляли не более 3 мкс и ~ 1 мс соответственно.

Работа всех систем демонстратора микро-ИДРД, включая аварийную отсечку подачи компонентов горючей смеси, управлялась цифровым контроллером. Во время огневых испытаний топливный насос работал непрерывно. В некоторый заранее заданный момент времени цифровой контроллер подавал сигнал на электромагнитный клапан инжектора, и топливо начинало поступать в камеру сгорания ИЗУ. Далее, в момент времени t_2 цифровой контроллер подавал сигнал на питание катушки зажигания, а в момент вре-

Таблица 1 Циклограмма работы демонстратора с частотой 10 Гц

| Параметр | Значение, мс | Описание |
|----------|--------------|--------------------------------------|
| t_1 | 0 | Начало цикла, начало подачи топлива |
| t_2 | 41 | Подача тока на катушку зажигания |
| t_3 | 50 | Окончание впрыска топлива |
| t_4 | 51 | Отключение питания свечи зажигания |
| t_5 | 100 | Окончание цикла, начало нового цикла |

мени t_3 — сигнал на отсечку подачи топлива. В момент времени t_4 питание свечи зажигания отключалось. Подача топлива через инжектор возобновлялась в момент времени t_5 . Кислород подавался в камеру сгорания ИЗУ непрерывно. Основными параметрами настройки работы ИЗУ были: продолжительность подачи топлива (интервал времени $\Delta t_{1-3} = t_3 - t_1$), опережение зажигания (интервал времени $\Delta t_{2-3} = t_3 - t_2$), продолжительность искрового разряда (интервал времени $\Delta t_{2-4} = t_4 - t_2$), продолжительность продувки ИЗУ кислородом (интервал времени $\Delta t_{4-5} = t_5 - t_4$), а также давление подачи кислорода.

Программа огневых испытаний демонстратора микро-ИДРД включала испытания в режиме одиночного импульса и в частотном режиме. В процессе испытаний изменялись параметры настройки работы ИЗУ, проводилась киносъемка выхлопного факела, а также снимались регистрограммы ионизационных зондов. В результате испытаний найдены условия (по давлению подачи кислорода и цикловой продолжительности разных стадий рабочего процесса), при которых в демонстраторе микро-ИДРД происходил переход горения в детонацию (ПГД) как в режиме однократного импульса, так и в частотном режиме.

В качестве примера в табл. 1 представлены значения основных параметров циклограммы при работе демонстратора с частотой 10 Гц в режиме ПГД с давлением подачи кислорода 5,5 атм. В этом примере горючее в ИЗУ и в детонационную трубку подавалось в течение 50 мс, что составляло ровно половину рабочего цикла демонстратора.

На рис. 2 показана фотография выхлопного факела в одном из рабочих циклов. Видимая длина факела равна $\sim 200\text{--}300$ мм, т. е.

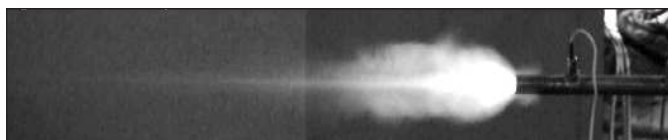


Рис. 2 Фотография выхлопного факела микро-ИДРД

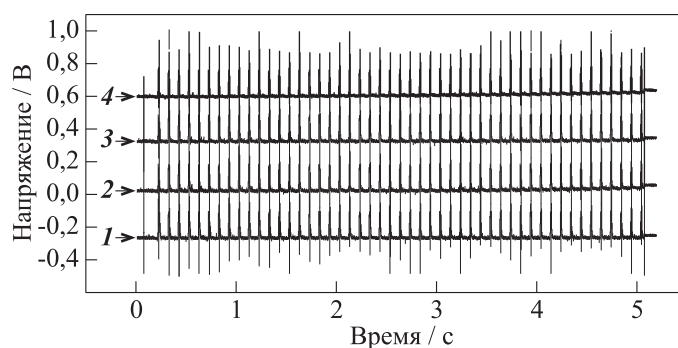


Рис. 3 Записи напряжения на ионизационных зондах 1–4 при работе демонстратора микро-ИДРД в течение 5 с (50 импульсов с частотой 10 Гц)

~ 15–20 калибрам детонационной трубки. Форма факела хорошо повторяется от импульса к импульсу.

На рис. 3 представлены записи напряжения на ионизационных зондах 1–4 при работе демонстратора в течение 5 с (50 импульсов с частотой 10 Гц). Увеличив временное разрешение записи на рис. 3, можно рассчитать скорость распространения волны горения на измерительных базах между зондами по формуле: $D = \Delta X / \Delta t$, где ΔX — расстояние между соседними зондами, а Δt — интервал времени между приходом волны горения в место расположения двух соседних зондов. Анализ показывает, что во всех 50 циклах скорость волны горения на измерительных базах постоянна и равна $D \approx 2060 \pm 100$ м/с. Это значение соответствует термодинамической скорости детонации н-гексано-кислородной смеси с составом, приблизительно соответствующим коэффициенту избытка кислорода 1,3. Таким образом, разработанный демонстратор обеспечи-

вает хорошую повторяемость формы и длительности импульсов, что свидетельствует о надежном периодическом ПГД в детонационной трубке.

Важно отметить, что разработанное ИЗУ обеспечивает очень быстрый ПГД: детонация регистрируется уже на первой измерительной базе, т.е. на расстояниях не более 150 мм от выходного сечения ИЗУ. Подчеркнем, что в схеме демонстратора ускорители пламени в виде спирали Щелкина или набора кольцевых вставок не применялись. Полученный результат будет использован в дальнейшем для повышения рабочей частоты демонстратора.

Таким образом, нами разработан и испытан низкочастотный демонстратор рабочего процесса микро-ИДРД на жидком горючем, формирующий будущий облик ракетного двигателя нового типа для системы стабилизации космических аппаратов. В результате испытаний найдены условия, при которых в демонстраторе происходил надежный ПГД как в режиме однократного импульса, так и в частотном режиме. Поскольку ПГД происходил на очень коротких расстояниях (не более 10 калибров детонационной трубки), рабочую частоту демонстратора можно существенно увеличить.

Работа выполнена по Государственному контракту № 019-600.2009 «Разработка технологий изготовления пульсирующих реактивных детонационных микродвигателей на жидких топливах с добавками наночастиц высокоэнергетических компонент для универсальной системы стабилизации космических аппаратов» в рамках Научно-технической программы Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» на 2009–2012 годы («Нанотехнология-СТ»).

Литература

1. Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006.
2. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. Вып. 17. С. 1453–1461.