

УДК 534.222.2

РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С НЕПРЕРЫВНОЙ ПЛЁНОЧНОЙ ДЕТОНАЦИЕЙ ЖИДКОГО ГОРЮЧЕГО

© 2018 г. С. М. Фролов^{1,2,3,*}, И. О. Шамшин^{1,2}, В. С. Аксенов^{1,2}, И. А. Садыков^{1,2},
П. А. Гусев^{1,4}, В. А. Зеленский⁵, Е. В. Евстратов⁵,
член–корреспондент РАН М. И. Алымов⁶

Поступило 29.01.2018 г.

Впервые экспериментально доказана возможность организации непрерывно–детонационного горения плёнки жидкого горючего в кольцевой камере сгорания демонстрационного образца жидкостно–детонационного ракетного двигателя. В огневых испытаниях зарегистрированы околопредельный режим продольно–пульсирующей “плёночной” детонации и режимы непрерывной спиновой “плёночной” детонации с одной и двумя детонационными волнами, циркулирующими в кольцевом зазоре камеры сгорания.

DOI:

Гетерогенная система газ–плёнка имеет ряд важных преимуществ для использования в жидкостных ракетных двигателях нового типа — детонационных ракетных двигателях (ДРД) с непрерывно–детонационными камерами сгорания (КС) [1]. Во-первых, систему газ–плёнка можно дополнительно использовать для активной тепловой защиты стенок ДРД при подаче плёнки на теплонапряженные участки КС. Во-вторых, в такой системе детонация способна распространяться практически при любой толщине жидкой плёнки [2, 3], что снижает требования к точности дозирования горючего и повышает надёжность рабочего процесса. В-третьих, в стратифицированной системе газ–плёнка, которая характеризуется относительно малой площадью межфазной поверхности раздела (по сравнению с системой газ–капли), предварительное испарение жидкости перед

лидирующей ударной волной детонационного фронта незначительно, что препятствует различным нарушениям рабочего процесса (проскокам пламени и т.д.). К недостаткам системы газ–плёнка можно было бы отнести отмеченную в литературе необходимость использования мощных источников инициирования плёночной детонации, однако в наших недавних работах [1, 4, 5] экспериментально зарегистрирован переход горения в детонацию в системах “газ (кислород) — плёнка жидкого горючего (н–гептан [1, 4], н–декан [5])” при очень слабом источнике зажигания, который генерирует слабую первичную ударную волну с числом Маха 1,03–1,05.

Цель данной работы — экспериментальное доказательство возможности организации непрерывно–детонационного горения плёнки жидкого горючего в кольцевой КС демонстрационного образца ДРД.

На рисунке 1 показана принципиальная схема демонстрационного образца ДРД с КС в виде кольцевого зазора между центральным телом цилиндрической–конической формы и соосной внешней цилиндрической стенкой. Эта схема отличается от схем ДРД, в которых газообразное или жидкое горючее подаётся в КС через распределённые топливные форсунки в виде газовых или капельных струй [6–8]. Здесь жидкое горючее подаётся в КС через внешнюю стенку, выполненную в виде пористой кольцевой вставки конечной длины, под давлением вытесняющего газа (азота) и образует на поверхности стенки тонкую жидкую плёнку.

¹ Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской Академии наук, Москва

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³ Институт системных исследований Российской Академии наук, Москва

⁴ Объединённый институт высоких температур Российской Академии наук, Москва

⁵ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской Академии наук, Москва

⁶ Институт структурной макрокинетики им. Г.А. Мерзжанова Российской Академии наук, Черноголовка Московской обл.

*E-mail: smfrol@chph.ras.ru; sergei@frolovs.ru

Окислитель (газообразный кислород) подается в КС через кольцевой щелевой зазор в осевом направлении, способствуя равномерному растеканию плёнки по стенке. Иницирование пленочной детонации производится с помощью ударной волны, перепускаемой в кольцевой зазор КС, например, через сопло ДРД. Ударная волна, распространяясь над жидкой плёнкой, обеспечивает быстрое смесеобразование (благодаря аэродинамическому дроблению плёнки, испарению образованных микрокапель и турбулентно-молекулярному смешению паров горючего с окислителем), последующее объёмное сгорание полученной смеси (благодаря самовоспламенению ударно сжатой двухфазной среды) и формирование самоподдерживающейся детонационной волны (ДВ), которая способна циркулировать в кольцевой КС до тех пор, пока перед фронтом волны сохраняются условия, необходимые для её существования.

Кольцевая КС демонстрационного образца ДРД (рис. 1) состоит из четырёх элементов: центрального тела 1 диаметром 90 мм и длиной цилиндрического участка 90 мм с конусным насадком длиной 101 мм, выполненными из меди; пористой кольцевой вставки 2 внутренним диаметром 98 мм, длиной 30 мм и толщиной 9 мм, изготовленной из пористого материала; прижимной непроницаемой кольцевой вставки 3 внутренним диаметром 98 мм, длиной 70 мм и толщиной 11 мм, выполненной из меди; огневого днища 4 в виде ножа — тонкого стального диска с заострённой кромкой, перекрывающего часть кольцевого сечения на входе в КС, оставляя щелевой кольцевой зазор размером 1,2 мм. Все элементы кольцевой КС монтируются в цилиндрическом корпусе с одним торцевым

фланцем из нержавеющей стали. В корпусе предусмотрены отверстия для подачи жидкого горючего (н-пентана), а во фланце — газообразного окислителя (кислорода). Горючее выбрано по соображениям высокой летучести паров (температура кипения н-пентана при атмосферном давлении 36°C); в последующих исследованиях оно будет заменено на менее летучие жидкие горючие. В ряде испытаний к открытому концу КС присоединялось суживающееся сопло 5 длиной 34 мм и углом сужения 35°.

Основной элемент КС — пористая кольцевая вставка. Вставка изготавливается по технологии порошковой металлургии из крупнозернистого никелевого порошка марки ПНК (ГОСТ 9722-79), состоящего из частиц размером от 70 до 100 мкм. Формование изделия проводится в эластичной оснастке, повторяющей форму готового изделия, в условиях холодного изостатического прессования при давлении 200 МПа на гидростате СИР 62330. Для создания в спечённом материале требуемой проницаемости используется порообразователь — бикарбонат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (в количестве 10% от объёма), который улетучивается при достаточно низкой температуре, формируя сквозные каналы. Достижение необходимой прочности материала с сохранением требуемой проницаемости проводится путём подбора условий спекания. Рациональными оказались температура спекания 900°C в течение 2 ч в атмосфере водорода.

Проницаемость пористой вставки предварительно измеряется с помощью специальной оснастки, позволяющей построить калибровочные зависимости расхода жидкого горючего от давления вытеснительного газа.

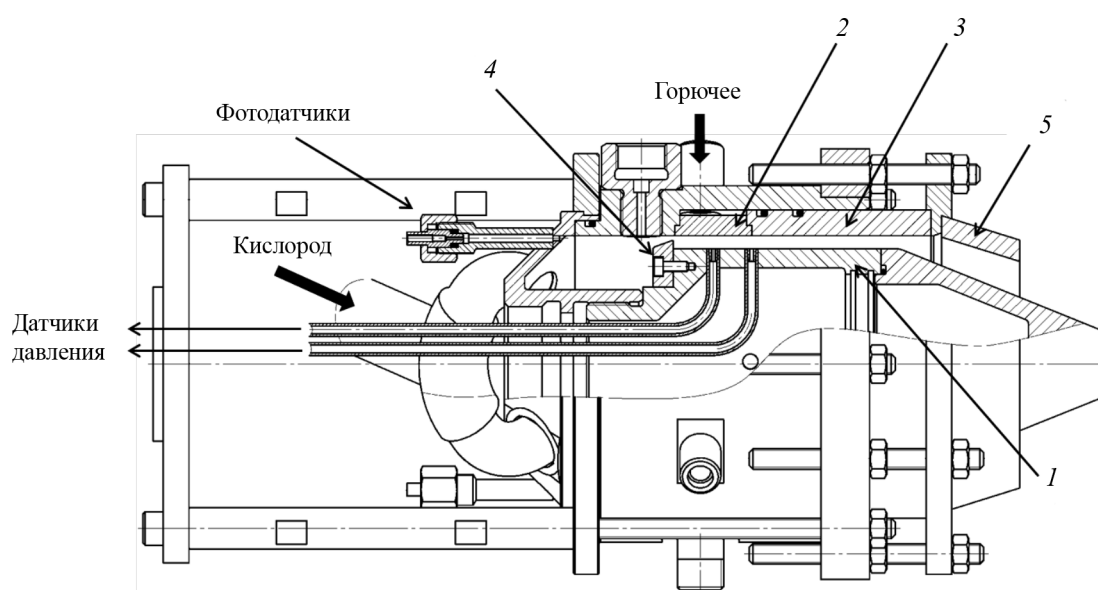


Рис. 1. Принципиальная схема ДРД.

Система диагностики рабочего процесса в КС включает (рис. 1) два фотодатчика с полосой пропускания $F_{3dB} > 2$ МГц (на основе фотодиода BPW34 и операционного усилителя AD8066), размещённых в торцевом фланце в середине кольцевого зазора КС, а также датчики давления, присоединённые к трубкам—волноводам, введенным в центральное тело: низкочастотный датчик статического давления (Курант—ДА 2,5 МПа), измеряющий среднее статическое давление в КС на расстоянии 15 мм вниз по течению от огневого днища, и три высокочастотных датчика давления ДД1, ДД2 и ДД3 (Kistler 211В3), измеряющие пульсации давления в трёх точках, расположенных на угловом расстоянии 120° друг от друга в одном поперечном сечении КС на расстоянии 30 мм от огневого днища. Температура центрального тела и пористой вставки измеряется термопарами (ТХА (К)). Расход кислорода рассчитывается по скорости спада давления в ресивере кислорода. Расход жидкого горючего измеряется турбинным тахометрическим расходомером.

Погрешности измерений: частота рабочего процесса (с помощью датчиков пульсаций давления) не более 3%; среднее статическое давление в КС не более 1%; температура стенок не более 10%; расходы топливных компонентов не более 10%.

Типичное огневое испытание ДРД продолжается 1 с. Кроме самого рабочего процесса с горением топливной смеси, это время включает время открытия и закрытия быстросрабатывающих клапанов подачи горючего и окислителя. Все испытания проведены при температуре окружающей среды $-3...+3$ °С.

Важнейший результат проведённых исследований — экспериментальное доказательство возможности организации непрерывно—детонационного горения плёнки жидкого горючего в кольцевой КС демонстрационного образца ДРД. В огневых испытаниях зарегистрированы околопредельный режим продольно-пульсирующей “плёночной” детонации (ППД) и режимы непрерывной спиновой “плёночной” детонации (НСД) с одной и двумя плёночными ДВ, циркулирующими в кольцевом зазоре КС.

На рис. 2 представлены первичные записи двух фотодатчиков (кривые 1 и 2, правая ось), датчика статического давления в КС (кривая 3, левая ось) и трех датчиков пульсаций давления (кривые 4, 5 и 6, левая ось) в одном из огневых испытаний с расходами топливных компонентов 160 г/с (кислород) и 40 г/с (н—пентан), соответствующими суммарному коэффициенту избытка горючего $\sim 0,8$. В интервале времени от 700 до 1100 мс здесь зарегистрированы приблизительно постоянная интенсивность свечения и постоянное значение абсолютного среднего статического давления в КС

(0,22 МПа). Температура неохлаждаемого центрального тела за время испытания становилась значительно более высокой (около 100 °С), чем температура прижимной непроницаемой кольцевой вставки (около 50 °С), несмотря на то, что суммарная масса центрального тела и конусного насадка (2,7 кг) была больше массы прижимной кольцевой вставки (2,1 кг). Температура пористой вставки, охлаждаемой жидким горючим, не превысила 10 °С.

Фурье—анализ записей датчиков пульсаций давления обнаруживает ярко выделенную частоту рабочего процесса, равную 2,85 кГц (рис. 3), т.е. характерное время квазистационарного рабочего процесса в КС составляет ~ 350 мкс. Оценки показывают, что за это время вытеснительная система подачи жидкого горючего в КС обеспечивает образование жидкой пленки горючего толщиной около 5 мкм на поверхности пористой вставки. Анализ фаз пульсаций давления показывает, что в данном огневом испытании реализован околопредельный

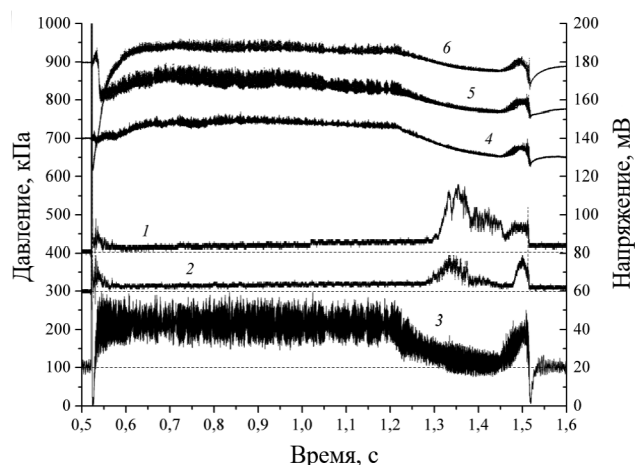


Рис. 3. Фурье—анализ фрагмента записей датчиков пульсаций давления.

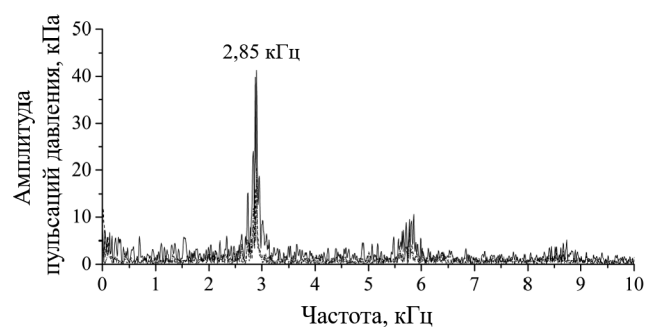


Рис. 2. Записи фотодатчиков (1, 2), датчика статического давления в КС (3) и датчиков пульсаций давления (4, 5, 6) в одном из огневых испытаний.

режим ППД, подобный режимам, наблюдавшимся ранее в [8–10] при работе с газообразными компонентами. Действительно, на рис. 4 показан фрагмент записей трёх датчиков пульсаций давления продолжительностью 2 мс в самом начале рассматриваемого интервала времени 700–1100 мс. На записях видны регулярные пульсации давления с крутыми фронтами, причём фазы пульсаций давления на всех трёх датчиках практически (с точностью до ~ 100 мкс) совпадают, т.е. волны давления приходят на эти датчики почти одновременно. Такая ситуация возможна, когда в кольцевом зазоре периодически (с частотой $\sim 2,85$ кГц) зарождается ДВ, которая распространяется вверх по потоку с большой осевой и небольшой тангенциальной составляющими скорости.

Косвенным подтверждением этому можно считать результаты измерений в [8–10], где изучена пространственно–временная волновая динамика зарождения, распространения и затухания ППД и получены записи давления, аналогичные показанным на рис. 4. Учитывая, что максимальная скорость заполнения кольцевой КС кислородом приблизительно равна скорости звука (~ 300 м/с), а минимальная (на пределе распространения) скорость детонации в системе газ–плёнка составляет ~ 1000 м/с [1–5], место зарождения ППД должно находиться на расстоянии $(1000-300) \cdot 0,00035 = 0,25$ м от огневого днища. Можно предположить, что детонация периодически зарождается в окрестности выходного сечения КС, как в экспериментах [8–10]: детонационный взрыв происходит либо при очаговом самовоспламенении свежей топливной смеси на развитой контактной границе с горячими продуктами предыдущей ДВ, либо при ударном сжатии порции свежей топливной смеси в конечном скачке уплотнения, проникающем внутрь КС при затухании предыдущей ДВ. После очагового зарождения ДВ распространяется по направлению к огневому днищу, охватывая весь объём

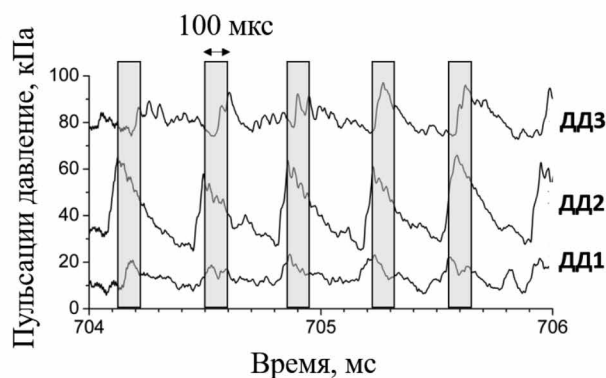


Рис. 4. Записи датчиков пульсаций давления.

кольцевого зазора. В этом случае расстояние, пройденное волной, оказывается сопоставимым с полученной выше оценкой.

Кроме околопредельного режима ППД, в ряде огневых испытаний регистрировались режимы НСД с одной и двумя ДВ, циркулирующими в кольцевом зазоре КС. Так, в одном из испытаний с присоединённым соплом при расходах топливных компонентов 150 г/с (кислород) и 80 г/с (н-пентан), соответствующих суммарному коэффициенту избытка горючего $\sim 2,0$, абсолютное среднее статическое давление в КС составило 0,25 МПа, а выделенная частота рабочего процесса, полученная с помощью Фурье–анализа записей датчиков пульсаций давления, оказалась равной $\sim 4,7$ кГц. Анализ фаз пульсаций давления показал, что в данном испытании зарегистрирован рабочий процесс с двумя ДВ, непрерывно вращающимися в кольцевом зазоре с видимой скоростью ~ 730 м/с. Если учесть скорость заполнения КС свежей смесью, то истинная нормальная скорость ДВ будет несколько выше (~ 1000 м/с), так как фронт ДВ наклонён к оси КС. Такие низкие скорости распространения фронта реакции возможны лишь в том случае, если воспламенение смеси не определяется температурой за лидирующей УВ: она слишком мала для самовоспламенения паров горючего. Согласно [8], в этих условиях стационарное распространение ДВ в кольцевом зазоре может быть обеспечено только воспламенением топливной смеси за УВ, отражённой от внешней “поджимающей” стенки, с последующим энерговыделением в турбулентном пламени. Подчеркнём, что в кольцевой КС отражение ударной волны от внешней “поджимающей” стенки — неотъемлемая особенность процесса непрерывно–детонационного горения [11, 12]. Интенсивность же турбулентности в зоне рециркуляции над огневым днищем очень высокая [11].

Таким образом, нами впервые экспериментально доказана возможность организации непрерывно–детонационного горения плёнки жидкого горючего в кольцевой КС демонстрационного образца жидкостного ДРД нового типа. В таком ДРД плёнка жидкого горючего используется как для обеспечения устойчивого рабочего процесса, так и для активной тепловой защиты стенок КС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15–08–00782) и за счет субсидии, выделенной ИХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 44.8 “Фундаментальные исследования процессов превращения энергоёмких материалов и разработка научных основ управления этими процессам” (номер госрегистрации 0082–2016–0011) в 2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Шамшин И. О. // ДАН. 2017. Т. 474. № 4. С. 448–453.
2. Комов В. Ф., Трошин Я. К. // ДАН. 1967. Т. 175. № 1. С. 109–112.
3. Ragland K. W., Nicholls J. A. // AIAA J. 1969. V. 7. № 5. P. 859–863
4. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Шамшин И. О. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 6. С. 34–44.
5. Шамшин И. О., Аксёнов В. С., Фролов С. М. // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 4. С. 37–45.
6. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
7. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О., Яковлев Н. Н., Костенко И. И. // ДАН. 2018. Т. 478. № 4. С.
8. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Shamshin I. O. // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. № 26. P. 16808–16820.
9. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Shamshin I. O. // Int. J. Hydrogen Energy. 2015. V. 40. P. 1616–1623.
10. Anand V, St George A, Driscoll R, Gutmark E. // Int. J. Hydrogen Energy. 2015. V. 41. № 2. P. 1281–1292.
11. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 2. С. 56–65.
12. Дубровский А. В., Иванов В. С., Фролов С. М. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 2. С. 65–81.