

4. Bates J. Ray. Climate stability and sensitivity in some simple conceptual models.- Climate Dynamics, vol. 38, Issue 3-4, pp 455-473.
5. Climate change and aviation. Ed. S. Gossling and P. London, Earthscan, 2009. - 386 p.
6. Sidorenkov N. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co.KGAA, Weinheim, 2009.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ МЕТАНО-КИСЛОРОДНОГО ЖРД**

В.С. Иванов, ИХФ РАН, Москва, smfrol@chph.ras.ru

С.М. Фролов, ИХФ РАН, МИФИ, Москва

В.С. Аксенов, ИХФ РАН, МИФИ, Москва

И.О. Шамшин, ИХФ РАН, МИФИ, Москва

В настоящее время большое внимание уделяют разработке жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), в которых в качестве топлива применяется сжиженный природный газ. Удельный импульс тяги в пустоте для пары «жидкий метан – кислород» (388 с) превосходит удельный импульс пары «керосин – кислород» (374 с) более чем на 3%. Дополнительного повышения удельного импульса можно добиться, используя более энергоэффективный термодинамический цикл. В 1940 г. Я. Б. Зельдовичем показано, что двигатели, использующие быстрое (детонационное) сгорание топлива, должны быть более эффективными, чем двигатели, использующие медленное (дефлаграционное) горение. В 1959 г. Б. В. Войцеховский предложил оригинальную схему организации непрерывного детонационного горения в кольцевой камере сгорания. Именно эту схему в последнее время считают наиболее перспективной для дальнейшего совершенствования ЖРД.

В ИХФ РАН создан стенд для исследования непрерывно-детонационного горения различных топлив. В [1] в серии экспериментов с водородно-кислородными смесями впервые доказана энергоэффективность детонационного цикла сжигания топлива на образцах кольцевых камер сгорания диаметром 50 и 100 мм с кольцевым зазором 5 мм. В камере сгорания диаметром 100 мм проведены эксперименты с метанокислородными смесями с расходом до 0.5 кг/с и с различной конфигурацией выходного сопла (рис. 1).

В первой серии огневых испытаний экспериментально получен устойчивый рабочий процесс и определен состав смеси с максимальными удельными тяговыми характеристиками. На рис. 2 показан результат обработки записей ионизационных зондов, расположенных в детонационной камере сгорания, методом Фурье анализа. Данная методика позволяет выделить базовую частоту циркуляции детонационных волн в камере сгорания, определить их количество и скорость вращения и проследить за динамикой процесса в течение всего испытания. Кривая на рис. 2 соответствует режиму работы камеры сгорания с двумя детонационными волнами, вращающимися в кольцевом зазоре со скоростью ~ 2350 м/с.

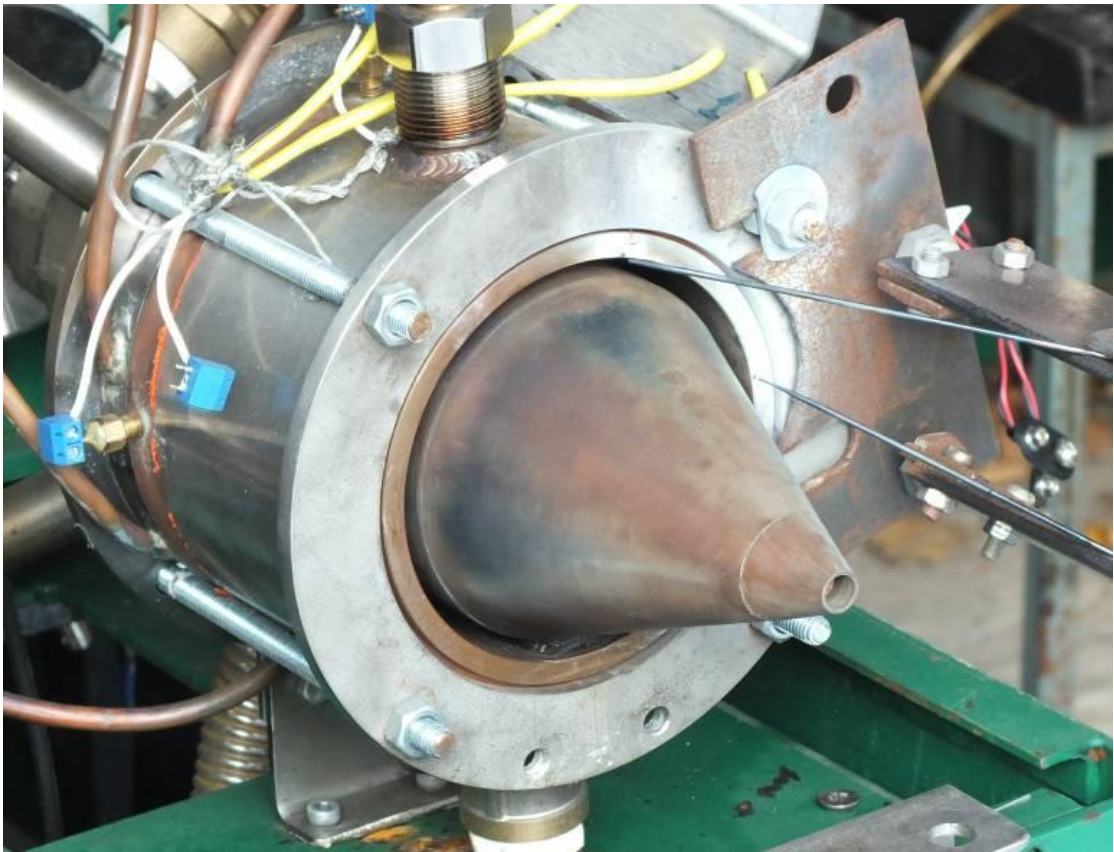


Рис. 1 – Экспериментальный образец камеры сгорания с непрерывной детонацией

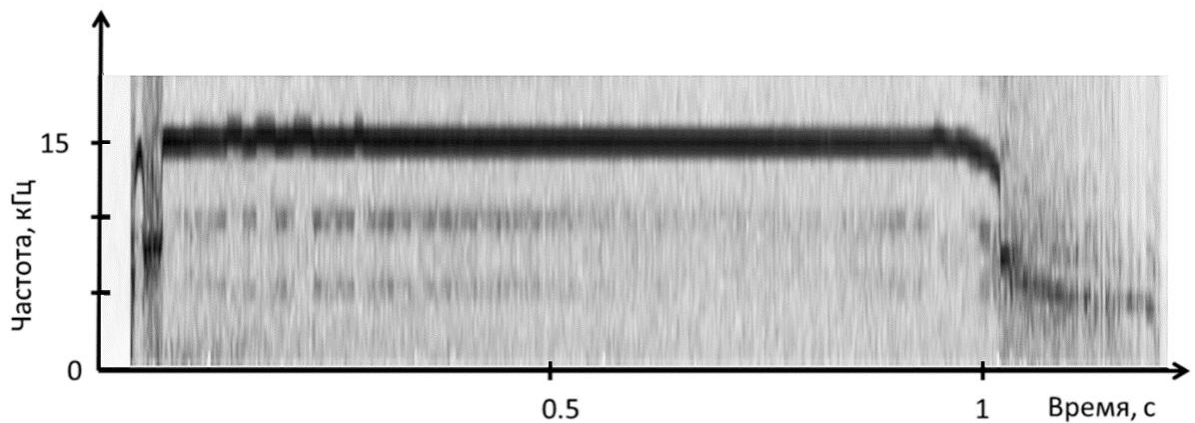


Рис. 2 – Фурье анализ записи сигнала ионизационного зонда при работе на метанокислородной смеси в режиме с двумя детонационными волнами

Таблица 1. Результаты испытаний при работе на метанокислородной смеси

№	Конфигурация	Расход кислорода, кг/с	Расход метана, кг/с	Состав, Ф	Давление в камере, кПа	Тяга, кГс	Уд. импульс, с
1	К1	0.35	0.08	0.95	97	12.7	29
2	К2	0.23	0.06	1.0	400	29.2	102
3	К3	0.24	0.07	1.2	440	40.4	125
4	К4	0.38	0.12	1.3	800	73.6	147

Во второй серии испытаний изменяли конфигурацию сопла. Применялись варианты сопел без сужения сечения на выходе камеры сгорания (К1), с пересжатием выходного сечения кольцевого зазора на 50% (К2), а также с пересжатием выходного сечения кольцевого зазора на 50% и последующим профилированным сопловым насадком (К3 и К4). На камерах с сопловыми насадками экспериментально получен удельный импульс до 150 с при среднем давлении в камере 8 атм.

В табл. 1 приведены результаты некоторых экспериментов с указанием расходов топливных компонентов, коэффициента избытка горючего в смеси, давления в камере, тяги и удельного импульса. Дальнейшая работа направлена на повышение рабочего давления в камере с тем, чтобы выйти на высокий удельный импульс, сопоставимый с ЖРД-аналогами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.609.21.0002 (идентификатор RFMEFI60914X0002).

### Список литературы

1. Фролов С. М., Аксенов В. С., Гусев П. А., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И.О. Экспериментальное доказательство энергоэффективности термодинамического цикла Зельдовича // Доклады академии наук, 2014. Т. 459. № 6. С. 711–716.

## ДЕТАЛЬНЫЕ И РЕДУЦИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ЗА СИЛЬНЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

И.Н. Кадочников, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва,  
fondreykus@gmail.com

А.М. Старик, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, star@ciam.ru

Последние десятилетия огромный интерес вызывают задачи моделирования термически неравновесных процессов в реагирующем газе, возникающих при нарушении термодинамического равновесия между поступательными, колебательными и электронными степенями свободы молекул. Такие процессы имеют место в ударных и детонационных волнах, в электрических разрядах, при сверхзвуковом расширении высокотемпературного газа, в средних и верхних слоях атмосферы, в лазерной физике, в фотохимии и плазмохимии.

Для описания термически-неравновесных процессов в высокотемпературных потоках газа существуют две наиболее используемые модели: модовая модель и более детальная уровневая модель. В уровневой модели рассматривается динамика заселённости каждого отдельного электронно-колебательного состояния молекулы [1], в то время как в модовой модели предполагается, что внутри каждой колебательной моды реализуется больцмановское распределение по энергетическим уровням со своей локальной колебательной температурой, что позволяет существенно уменьшить число параметров модели [2].

Основной проблемой таких редуцированных моделей является их точность. Было показано, что результаты существующих модовых моделей при описании эволюции концентраций компонентов смеси и газодинамических параметров потока за фронтом ударной волны могут существенно отличаться от результатов, полученных с