

УДК 621.454.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА «МЕТАН-КИСЛОРОД» В РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Чубенко Т. А., Максимов А. Д., Зубанов В. М.

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва, г. Самара

На данный момент метан является перспективным горючим, промышленность по его добыче обладает широкой сырьевой базой, природный газ на 80% состоит из метана, остальные составляющие - схожие по составу газы. Также метан был обнаружен в атмосфере планет-гигантов и Марса, что позволяет использовать многоразовые ракетные двигатели, горючим в которых выступает метан. Преимуществами метана являются его малая токсичность, низкие температура кипения и суточные потери по массе, хорошие охлаждающие свойства. Метан взаимодействует с конструкционными материалами не вызывая коррозии, полученный на его основе генераторный газ не содержит конденсированную фазу. Разработками двигателей, с использованием метана в качестве горючего, занимаются такие предприятия как НПО «Энергомаш», АО КБХА и другие. В то же время, доводка таких двигателей является очень ресурсоемкой задачей.

Для уменьшения ресурсоемкости доводки в современное время большое внимание уделяется моделированию рабочих процессов с помощью вычислительной гидрогазодинамики (CFD), что позволяет избежать заведомо плохие варианты [1]. В упомянутой работе использовались компоненты «кислород-водород», механизм взаимодействия которых адекватно согласуется с экспериментальными данными. В случае использования компонентов «кислород-метан» механизм взаимодействия компонентов может включать в себя 200-300 реакций и более [2].

Данная работа посвящена исследованию моделей горения метана, содержащихся в библиотеках ПО ANSYS CFX [3], применительно к ракетному двигателю. В качестве предмета исследования был выбран спроектированный двигатель по методике [4] с использованием программы СПК TERRA [5], с которой проводилось сравнение результатов моделирования. Рассмотренные механизмы реакций приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Механизмы реакций «метан-кислород» из библиотеки ANSYS CFX

Механизм	Реакции	Примечание
WD1	$\text{CH}_4 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-
WD2	$\text{CH}_4 + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{CO} + 0.5\text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{CO}_2$	две прямых реакции, частица M = H ₂ O
WGS	$\text{CH}_4 + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$ $\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ $\text{CO} + 0.5\text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{CO}_2$ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$	три прямых реакций, одна обратная реакция, частица M = H ₂ O

Полученные в результате моделирования результаты были сравнены с термодинамическим расчётом по СПК TERRA для среднего значения коэффициента окислителя ядра. Сравнение проводилось по массовым долям компонентов, чья массовая доля по СПК TERRA была более 10%, в критическом сечении и в сечении на срезе сопла. Массовая доля компонентов из результатов СПК TERRA была пересчитана

с учётом только тех компонентов, которые участвовали в рассматриваемом механизме (таблица 2).

Таблица 2. Сравнение результатов моделирования и СПК TERRA по массовым долям компонентов

Механизм		Критическое сечение			Сечение на срезе сопла		
		CO ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	H ₂ O	CO
D1	CFD	0.3502	0.5379	-	0.3504	0.5376	-
	Terra, пересчёт	0.3799	0.5845	-	0.4830	0.5170	-
	Отклонение от Terra, %	7.8	8.0	-	28	4.0	-
D2	CFD	0.4481	0.3990	0.1529	0.4487	0.3992	0.1521
	Terra, пересчёт	0.2881	0.4433	0.2416	0.4147	0.4439	0.1414
	Отклонение от Terra, %	55	10	37	8.2	10	7.6
GS	CFD	0.4018	0.4122	0.1744	0.3949	0.4154	0.1784
	Terra, пересчёт	0.2858	0.4398	0.2397	0.4112	0.4402	0.1402
	Отклонение от Terra, %	41	6.3	27	4.0	5.6	27

Из таблицы 2 видно, что все модели горения дают большую погрешность по массовым долям компонентов, массовая доля которых более 10%. Из всех рассмотренных механизмов реакции наиболее предпочтительным является использование механизма реакции WD1, который обеспечивает более точное прогнозирование массовых долей CO₂ и H₂O с точностью до 8% в камере сгорания и критике, хотя завышает массовую долю CO₂ в выходном сечении сопла. Механизмы WD2 и WGS, учитывающие компонент CO, дают завышенное значение массовых долей CO₂ и CO в критическом сечении. В тоже время, механизм WD2 обеспечивает погрешность определения массовых долей основных компонентов сгорания метана и кислорода менее 10%. Использование многоступенчатого механизма реакции WGS, учитывающего в своем механизме компоненты CO и H₂ только увеличило это расхождение.

Библиографический список

1. Zubanov V, Egorychev V and Shabliy L 2015 Design of rocket engine for spacecraft using CFD-modeling *Procedia engineering* 104 pp 29–35 doi: 10.1016/j.proeng.2015.04.093.
2. Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и новые принципы организации горения / Под ред. А.М. Старика. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. — 864 с.: ил.
3. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, 2011, ANSYS Inc.
4. Егорычев, В. С. Термодинамический расчет и проектирование камер ЖРД с СПК TERRA: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013.-108 с.: ил.
5. Трусов, Б. Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Международный симпозиум «Горение и плазмохимия». 24 – 26 августа 2005. Алматы, Казахстан. – Алматы: Казак университети, 2005. – С. 52 – 57.