

## ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТВС В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОПЛОВЫХ КАНАЛАХ

Г.Я. Герасимов, М.А. Зубин, Ю.В. Туник

*НИИ механики МГУ, Москва*

[tunik@imec.msu.ru](mailto:tunik@imec.msu.ru)

Изучается возможность стационарного детонационного сжигания топливно-воздушных смесей, поступающих в осесимметричное конвергентно-дивергентное сопло с высокой сверхзвуковой скоростью. Исследования, в основном, проводятся численно на базе двумерных уравнений движения Эйлера для осесимметричного течения воспламеняющегося многокомпонентного газа с использованием детальных моделей химической кинетики. Термодинамические параметры газовых компонент и смеси в целом рассчитываются по приведенной энергии Гиббса. На рассмотрение выносятся следующие вопросы.

- **Обзор основных схем детонационного сжигания топлива в ГПВРД.**
- **Схема детонационного сжигания водородовоздушных смесей в осесимметричном сопле Лавалья.**
- **Запуск сопла в сверхзвуковом потоке: расчет и эксперимент.**

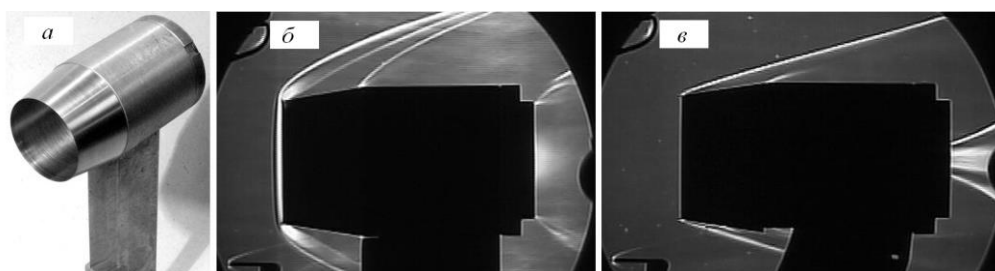


Рис.1. Запуск модели (а) при числе Маха набегающего потока  $M_0 = 6$ : успешный (б) и неудачный (в).

- **Инициирование и стабилизация детонационного горения водорода в сопловом канале.** Управляющие параметры. Роль центрального тела. Генерация тяги.

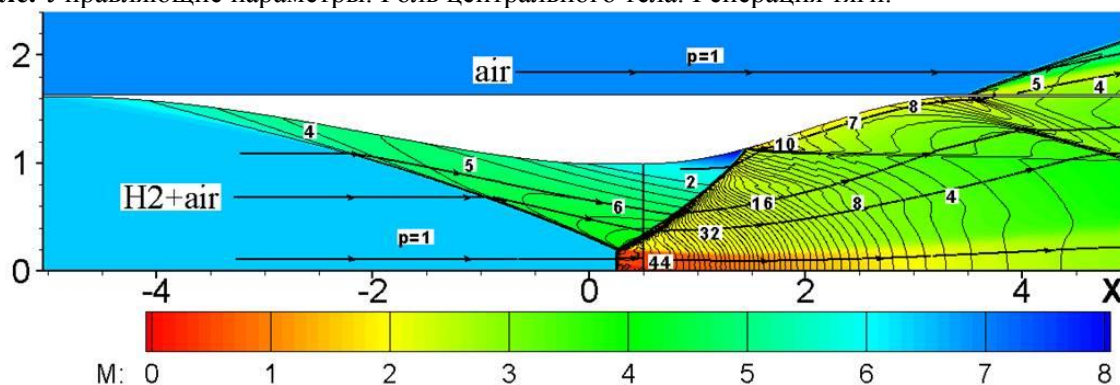


Рис.2. Стационарное детонационное горение в обедненной смеси при  $M_0 = 7$  и  $r_0 = 10$  см в условиях наземной атмосферы.

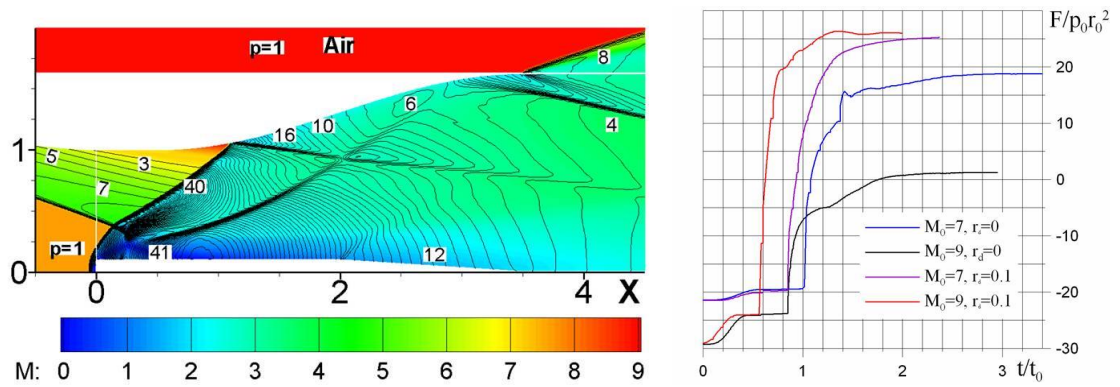


Рис.3. Стационарное детонационное горение стехиометрической смеси при  $M_0 = 9$  в нормальных атмосферных условиях.

Рис. 4. Тяга в сопловом канале при наличии и отсутствии центрального тела

- **Детонационное горение в условиях разреженной атмосферы.** Универсальное сопло для высот до 16 км. Зависимость эффективности детонационного сжигания водорода от высоты. Проблемы стабилизации детонационного горения водорода на высотах более 16 км. Сопла для высоты от 20 до 24 км.

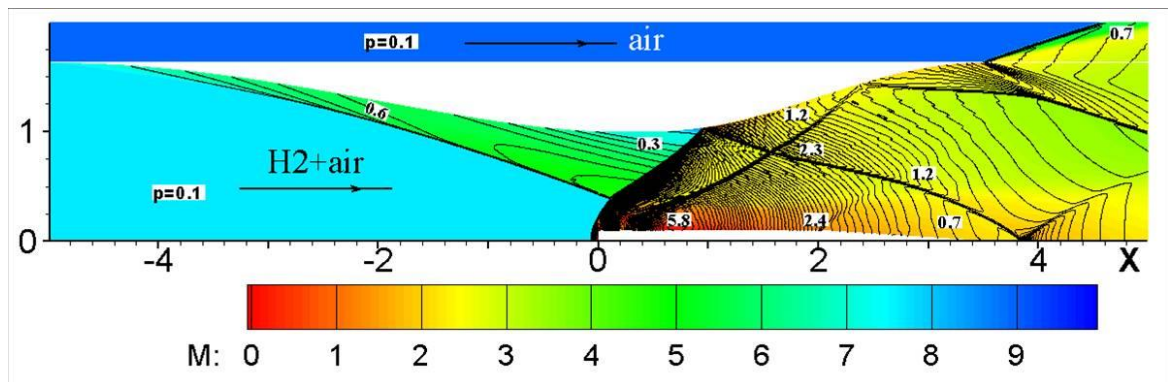


Рис.5. Стационарное детонационное горение стехиометрической смеси на высоте 16 км при  $M_0 = 9$ : изобары на фоне числа Маха в потоке. Тяга  $F/p_{Ar_0^2} = 4.8$ . ( $F_{H=16} = 0.48 \text{ т} \sim F_{H=0} = 4.8 \text{ т}$  при  $r_0 = 10 \text{ см}$ ),

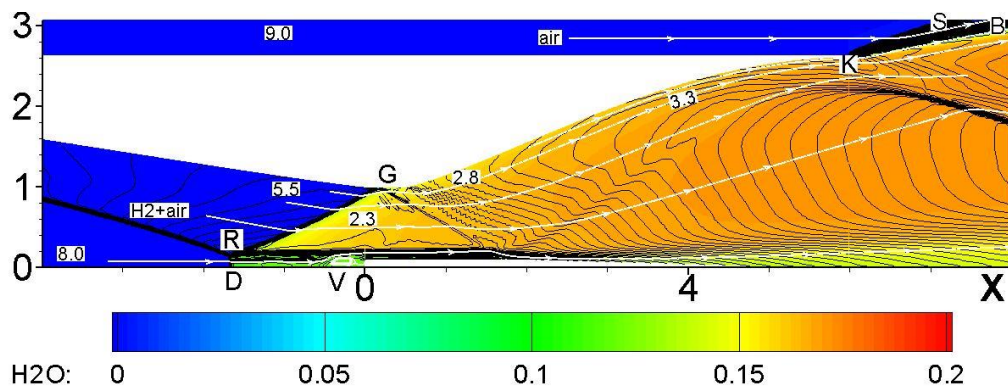


Рис.6. Стационарное детонационное горение обедненной смеси на высоте 24 км при  $M_0 = 9$ : число Маха на фоне массовой доли паров воды. Тяга  $F/p_{Ar_0^2} \approx 4.8$ . ( $F_{H=24} = 0.48 \text{ т} \sim F_{H=0} = 16.3 \text{ т}$  при  $r_0 = 10 \text{ см}$ ),

- **Детонационное горение керосина в осесимметричном сопловом канале.** Модель химической кинетики воспламенения и горения паров керосина. Критические параметры канала для инициирования детонационного горения. Геометрия сопла и центрального тела, обеспечивающая инициирование и стабилизацию детонационного горения паров керосина в условиях наземной атмосферы.

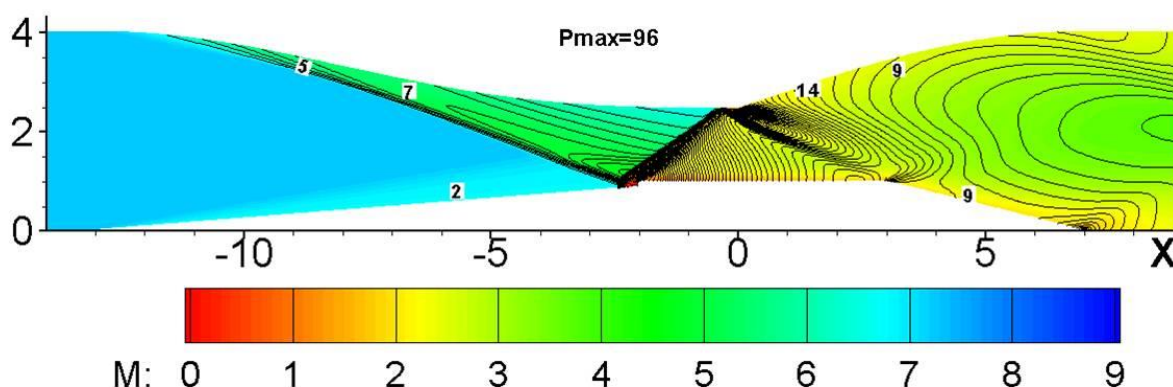


Рис. 7. Стационарное горение керосина в сопле с центральным телом «игла-цилиндр-конус» при  $M_0 = 7$  и  $2r_0 = 25$  см: изобары на фоне числа Маха в потоке.

- **Заключение**

1. В рамках принятых моделей газодинамики и кинетики горения показана возможность стабилизации детонационного горения водородовоздушных смесей, поступающих в осесимметричный сопловый канал универсальной геометрии в условиях атмосферы на высотах до 16 км при числе Маха набегающего потока от 7 до 9. Эффективность тепловыделения растет с высотой.
2. На высотах от 20 до 24 км при числе Маха набегающего потока  $M_0 = 9$  стабильное детонационное горение водорода в воздухе обеспечивает одно и то же сопло с большей длиной и расширением диффузора, чем для высот до 16 км. При  $M_0 = 7$  стабилизация детонационного горения на разных высотах обеспечивается в соплах разной геометрии. Вопрос о конфигурации универсального сопла остается открытым.
3. Численно показана возможность инициирования и стабилизации детонационного горения паров керосина с воздухом в осесимметричных сопловых каналах при числе Маха набегающего потока  $M_0$  порядка 7 и нормальном атмосферном давлении.
4. Центральное тело является эффективным инструментом управления детонационным горением топливно-воздушных смесей, поступающих с высокой сверхзвуковой скоростью в сопло Лавала.