

## Секция «Математика и механика»

### Моделирование двигателей с вращающейся детонационной волной

*Михальченко Елена Викторовна*

*Аспирант*

*МГУ - Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

*Механико-математический факультет, Москва, Россия*

*E-mail: Vi-Velena@rambler.ru*

Основной формой химического преобразования энергии для ракетных двигателей является горения топлива с воздухом и кислорода соответственно. Несмотря на подход, основанный на горении, появились предложения использовать быстрое высвобождение энергии от взрывов для передвижения или в качестве источника питания. Первые в данной области работы были направлены на фундаментальные исследования, экспериментальные наблюдения детонационных явлений и переход горения в детонацию.

Повышенный интерес к детонационным двигателям, а именно к двигателям с пульсирующей детонацией начался с 1990 года. В итоге 31 января 2008 года был совершен демонстрационный полет на самолете LongEZ с двигателем такого типа, модификации которого продолжают и по сей день. В итоге исследования привели к идеям о двигателях с вращающейся детонационной волной.

В настоящее время двигатели с вращающейся детонационной волной, также известные как двигатели с непрерывной детонацией, привлекают к себе большое внимание в мире. Такие двигатели имеют огромный потенциал, так как обладают очень простой конструкцией и высокой термодинамической эффективностью, а также высокой скоростью преобразования энергии, которая может быть даже более высокой, чем у импульсных детонационных двигателей.

Двигатель с вращающейся детонационной волной, как и следует из названия, использует одну или несколько детонационных волн, вращающихся вокруг кольцевых камер для преобразования энергии.

Одной из наиболее удачных конфигураций является двигатель с вращающейся детонационной волной в котором установлено множество топливно-окислительных форсунок, впрыскивающих топливно-воздушную смесь в область непосредственно перед детонационной волной по определенному закону с заданным давлением. Реагенты подаются по отдельности или предварительно смешиваются в кольцевой камере сгорания. Детонационная волна или, возможно, несколько детонационных волн вращаются в кольцевом пространстве только на выходе из массива инжектора, потребляемые реагенты подаются непрерывно. После прохождения детонационной волны высокое давление восстанавливается до входного, позволяя реагентам снова попадать в кольцевую камеру, благодаря чему химические реакции поддерживают детонационную волну. Далее детонационная волна вырождается во взрывную волну. Продукты с высокой энтальпией ускоряются через сопло. Из-за высокой скорости вращения волны вокруг кольца частота двигателя находится в диапазоне 1-10кГц. Моделирование таких процессов является чрезвычайно сложной задачей. Будут рассмотрены газодинамические процессы, происходящие в двигателе. Для решения таких задач необходимо использовать разностные схемы, которые сочетают в себе повышенную разрешающую способность в областях малых возмущений и монотонность в областях сильных разрывов. Такими

схемами являются схемы типа TVD, ENO, WENO, PPM и другие. В данной работе газодинамическая часть моделирования двигателя проводится с помощью схемы PPM. Газодинамические задачи такого типа очень ресурсоемкие и для их решения необходимо много времени. Для сокращения временных затрат используют современные методы распараллеливания, такие как OpenMP, MPI, OpenCL и CUDA.

### **Литература**

1. 1. S.K.Godunov, A.V.Zabrodin, and G.P.Prokorov, U.S.S.R. Computational Math. And Math. Phys. 1(1961), 1187.
2. 2. B. Van Leer, J. Comput. Phys. 32 (1979), 101
3. 3. P. COLELLA, A direct Eulerian MUSCL scheme for gas dynamics, SIAM J. Sci. Statist. Comput., in press
4. 4. R. LISKA AND B. WENDROF, COMPARISON OF SEVERAL DIFFERENCE SCHEMES ON 1D AND 2D TEST PROBLEMS FOR THE EULER EQUATIONS, SIAM J. SCI. COMPUT, Vol. 25, No. 3, pp. 995-1017
5. 5. Н.Н.Смирнов, В.Ф.Никитин. Влияние геометрии канала и температуры смеси на переход горения в детонацию в газах. ФГВ, 2004, № 2, с. 68-83
7. 6. U. Maas, J. Warnatz, Ignition Processes in Hydrogen-Oxygen Mixtures. Combustion and Flame, 74, 1 (1988), pp. 53-69.
8. 7. B. Rybakin. Modeling of III-D Problems of Gas Dynamics on Multiprocessing Computers and GPU. Elsevier, Computers & Fluids, DOI information: 10.1016/j.compfluid.2012.01.016, 31-JAN-2012.
9. 8. Б.П. Рыбакин, Л.И. Стамов. Использование многопроцессорных вычислительных систем и графических ускорителей для моделирования задач газодинамики // Материалы международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: экзафлопсное будущее», г. Новороссийск, 19-24 сентября 2011 г., стр. 84-89
10. 9. Frank K. Lu, Eric M. Braun, Luca Massa and Donald R. Wilson, Rotating Detonation Wave Propulsion: Experimental Challenges, Modeling, and Engine Concepts (Invited), 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 31 July - 03 August 2011, San Diego, California

### **Иллюстрации**

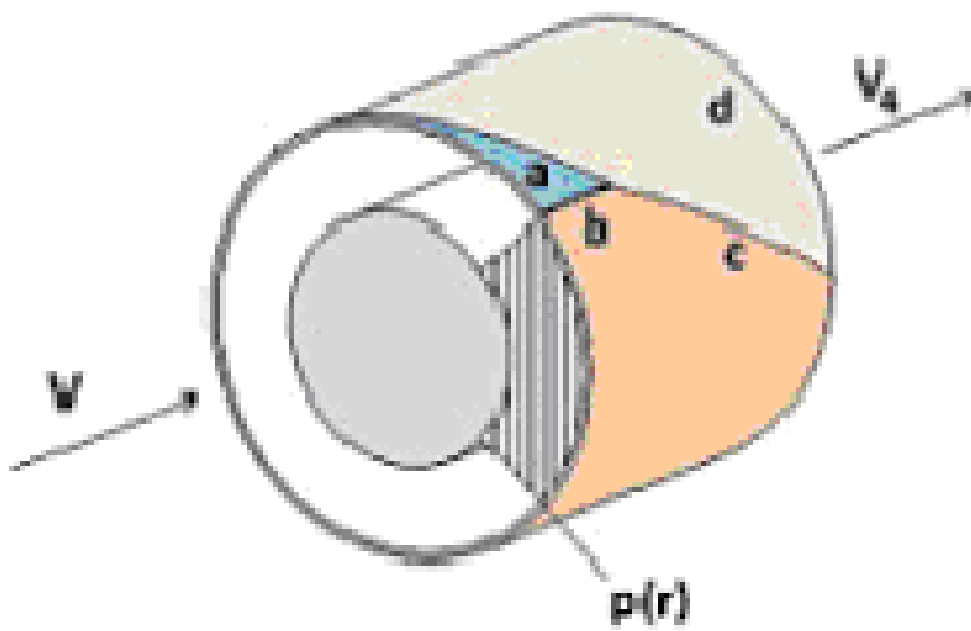


Рис. 1: Схема RDE:  $V$  – скорость набегающего потока;  $V_4$  – скорость потока на выходе из сопла;  $a$  – свежая ТВС,  $b$  – фронт детонационной волны;  $c$  – присоединенный косой скачок уплотнения;  $d$  – продукты сгорания;  $p(r)$  – распределение давления на стенке канала.