

ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИЙ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ В ТРУБЕ

А.Ж. БИБОСИНОВ, А. КАЛТАЕВ

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
e-mail: bibossinov@yahoo.com, Aidarkhan.Kaltayev@kaznu.kz

The focus of this study is the role of the turbulence and pressure waves in the acceleration of stoichiometric hydrogen-oxygen flame propagating in a tube and how it affects to the transition processes. The predictions are based on numerical solutions of two-dimensional, non-steady set of the conservation equations for individual species, mass, total energy and applied to the analysis of hydrogen-oxygen gaseous mixture combustion in a tube ignited on closed end. The numerical procedure for solving the set of equations is based on a two-step, time splitting technique for the different physical processes. In the first step, the shock wave propagation is found by solving Euler equations using an explicit Total Variation Diminishing (TVD) scheme. In the second step, the diffusion processes and the kinetic terms are solved fully explicitly.

Введение

Целью данной работы является численное изучение процесса перехода обычного горения в детонацию для дальнейших оптимизаций работы и конфигураций пульсирующих детонационных двигателей. На данном этапе исследовательских работ, создан программный комплекс для задачи о детонационном горении водорода в пульсирующих детонационных двигателях в двумерной постановке. Получены и проанализированы результаты поджога и дальнейшего распространения горения по водородно-кислородной смеси для различных постановок начальных условий.

1. Основные уравнения и методы решения

Рассматривается труба, заполненная предварительно смешанной водородно-кислородной смесью. После поджигания некоторого участка водород начинает сгорать и превращаться в пары воды. В начальный период водород горит в дефлаграционном режиме, после чего при определенных условиях переходит в детонационный режим.

Химически реагирующее течение, включающее в себя явление переноса как вязкость, теплопроводность, диффузию и горение описывается полной системой уравнений Навье-Стокса.

Для многокомпонентной смеси коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии определяются от свойств компонент посредством усреднения. Для определения коэффициента вязкости смеси используется формула Вильке. Для индивидуальной компоненты коэффициенты переноса определяются из кинетической теории газов. Кинетика окисления моделирована с использованием семи-стадийной модели Спарка

В данной работе используется метод расщепления по времени по разным физическим процессам. Поэтому, система уравнений Навье-Стокса решается в два этапа. На первом этапе решается конвективная часть системы уравнений Навье-Стокса, на втором - вязкая часть с химическими превращениями.

На первом этапе с использованием явной TVD-схемы второго порядка точности по пространству решается уравнение Эйлера, рассчитывается газодинамический перенос и распространение искомых величин.

Метод TVD представляет собой попытку поставить на более строгий математический фундамент монотонные методы с коррекцией потоков, применяемые для решения систем гиперболических уравнений.

На втором этапе диффузионные и кинетические члены интегрируются неявно с использованием схемы Кранка-Никольсона.

2. Результаты моделирования горения водородно-кислородной смеси в закрытой трубе

Для тестирования численных алгоритмов и кинетики горения водорода рассматривалась следующая постановка задачи: оба конца трубы закрыты, источник поджога подводится к левому концу на оси трубы.

На рисунке 1 показан результат распространения волн давления на оси трубы. Изолинией показано расположение фронта пламени. На рисунках 2а-2е показано поле температур в разные моменты времени (а) 7.5 микросек, б) 12.5 микросек, в) 62.5 микросек, г) 137.5 микросек, д) 250.5 микросек, е) 400.5 микросек). Изолиниями показана структура поле давления. В начале зажигания от точки поджога исходит ударная волна. В дальнейшем она отражается от стенок трубы, и возвращаясь, меняет структуру фронта пламени. Ясно видно ускорение фронта пламени. На распространение пламени вдоль трубы влияет отраженная от правого конца ударная волна. Проходя по створевшей смеси скорость волны давления, увеличивается, воздействуя тем самым на скорость пламени.

По ходу распространения волн давления и горения структура их полей приобретает ячеистый характер, что объясняется экспериментальными исследованиями [1].

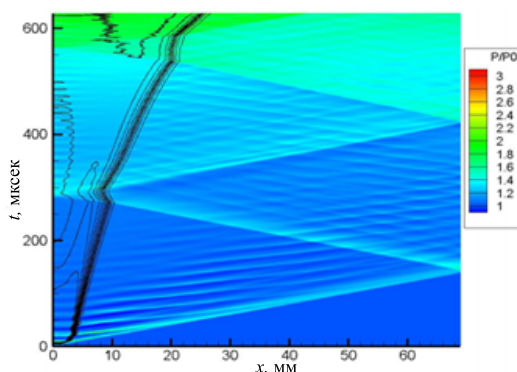


Рис. 1. Распространение волны горения по времени. Влияния начальной ударной и отраженной от конца волны на фронт пламени. Волна давления, проходя по створевшей смеси, изменяет структуру фронта пламени

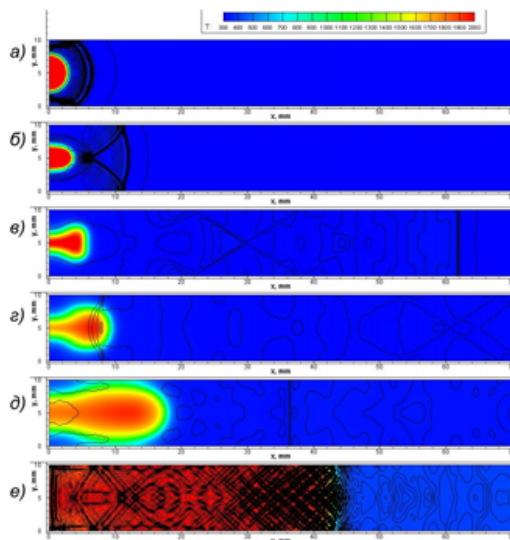


Рис. 2. Распространение волны в закрытой трубе (10x70мм). а) 7.5 микросек, б) 12.5 микросек, в) 62.5 микросек, г) 137.5 микросек, д) 250.5 микросек, е) 400.5 микросек. Изолиниями показаны структуры волн давления

3. Результаты моделирования горения водородно-кислородной смеси в открытой трубе

Для открытой трубы рассматривались два случая поджога водородно-кислородной смеси. В первом случае - источник зажигания на левом конце на оси трубы, на втором - на нижней стенке трубы.

На рисунках 3 проиллюстрированы процессы поджога в двух случаях и дальнейшее распространение волн давления и горения. Результаты приведены в одинаковые моменты времени для двух случаев. Для второго случая видно уменьшение очага сгорания. Причиной этому может быть влияние отраженной от стенок трубы волны давления. Дальнейший ход распространения горения в двух отдельных случаях показаны на рисунках 4, 5. Как видно в первом случае фронт пламени ускоряется быстрее, чем во втором. Причиной этого является начальное условие поджигания.

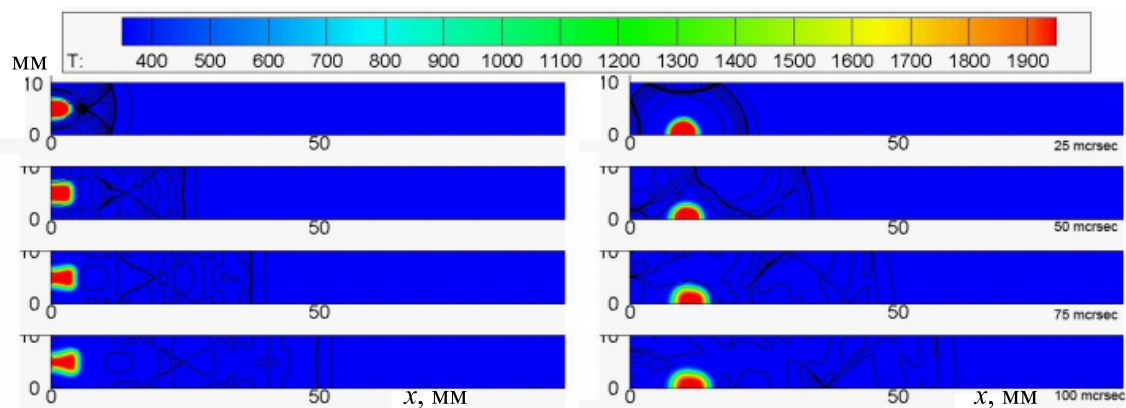


Рис. 3. Поджог водородно-кислородной смеси внешним источником. На левом рисунке - источник зажигания на левом конце на оси трубы, на правом - на нижней стенке трубы

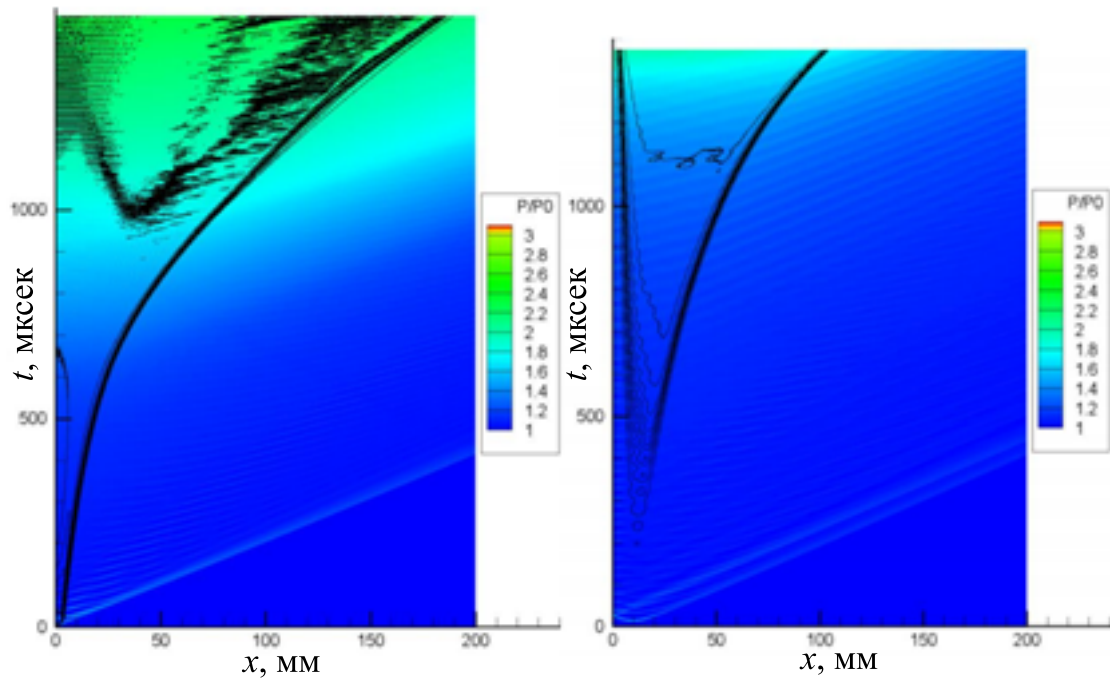


Рис. 4. Распространение волны горения по времени. На левом рисунке - источник зажигания на левом конце на оси трубы, на правом - на нижней стенке трубы

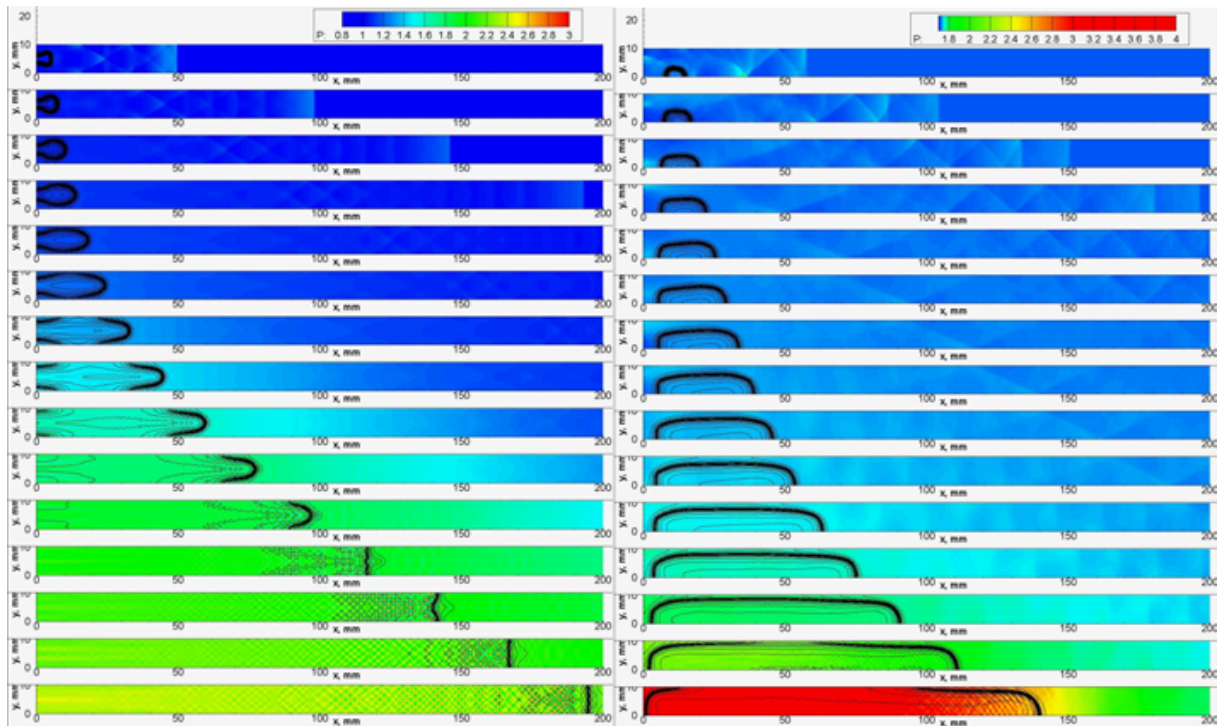


Рис. 5. Распространение волны горения. Начальный рисунок - 25 микросекунд, интервал времени между результатами 100 микросек

Заключение

Получены и проанализированы результаты поджога и дальнейшего распространения горения по водородно-кислородной смеси для разных постановок начальных условий. Для тестирования численных алгоритмов и кинетики горения водорода рассматривалась следующая постановка задачи: оба конца трубы закрыты, источник поджога подводится к левому концу на оси трубы. Показан результат распространения волн давления на оси трубы и поле температур в разные моменты времени. При этом, ясно видно ускорение фронта пламени. На распространение пламени вдоль трубы влияет отраженная от правого конца ударная волна. Проходя по сгоревшей смеси скорость волны давления, увеличивается, воздействуя тем самым на скорость пламени.

Для открытой трубы рассматривались два случая поджога водородно-кислородной смеси. В первом случае - источник зажигания на левом конце на оси трубы, на втором - на нижней стенке трубы. Проанализированы процессы поджога в двух случаях и дальнейшее распространение волн давления и горения. По ходу развития пламени для второго случая видно уменьшение очага сгорания. Причиной этому может быть влияние отраженной от стенок трубы волны давления. Как видно в первом случае фронт пламени ускоряется быстрее, чем во втором. Причиной этого является начальное условие поджигания.

Как показывают итоги работы данное направление исследований в газовой динамике и в теории горения являются очень важными для дальнейшего развития теории тепловых машин и в современных технологиях в общем.

Список литературы

- [1] URTEW P.A., OPPENHEIM A.K. Experimental observation of the transition to detonation in an explosive gas // Proc. Roy. Soc. A, volume 295 (1966)
- [2] KALTAYEV A., LEBLANC AND FUJIWARA T. Influence of Turbulence on the Deflagration to Detonation Transition in a Tube // 17th International Coll. on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Heidelberg, Germany, July 25-30, 1999
- [3] КАЛТАЕВ А., АБИШЕВА Б. Влияние степени шероховатости стенки на переход обычного горения в детонацию в трубе // Вестник КазНУ, серия математика, механика, информатика. N2 (25), 2001, сс.93-97