

## ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ ВОДОРОД-КИСЛОРОД И ВОДОРОД-ВОЗДУХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА OPENFOAM

А.И. Рыбников, Е.В. Симонов, А.М. Гурин, А.В. Трилис, А.Н. Самсонов

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия*

В настоящее время активно ведутся экспериментальные и численные исследования непрерывной спиновой детонации (НСД) по схеме, предложенной в 60-х годах Б.В. Войцеховским [1, 2]. Детонационные режимы с НСД подробно исследованы в кольцевых камерах сгорания (КС) типа жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) [3] и проточных вариантах [4] для ряда топливно-кислородных и топливно-воздушных смесей. В данном докладе в трехмерной нестационарной постановке сформулирована замкнутая математическая модель НСД для смесей водород-кислород и водород-воздух. С использованием пакета Openfoam создан универсальный расчетный алгоритм, позволяющий проводить трехмерное моделирование НСД указанных смесей в широком диапазоне исходных параметров для различных типов и размеров КС. Численно исследована динамика процесса сжигания смесей водород-окислитель в поперечных детонационных волнах (ПДВ) в двух кольцевых КС типа ЖРД для двух видов окислителя (кислород, воздух). Проведена верификация построенной математической модели и расчетного алгоритма путем сравнения полученных результатов с реальными экспериментальными данными [3, 4], а также с квазитрехмерными численными расчетами [3, 5].

**Математическая постановка задачи.** В рамках настоящей модели, идеально перемешанная смесь водород-окислитель поступает с удельным расходом  $g_{in}$  в КС через систему микросопел Лавала, равномерно распределенных по торцу КС. Камера сгорания представляет собой пространство, ограниченное двумя цилиндрами с кольцевым зазором шириной  $\Delta$ . Длина камеры  $L_{ch}$ , внешний диаметр  $D_{ch}$ . Смесь сжигается, и происходит выброс продуктов детонации в пространство с противодавлением  $P_{backpressure}$  с удельным расходом  $g_{out}$ . Газодинамическое течение реагирующей смеси водород-окислитель в области решения описывалось трехмерной системой уравнений нестационарной газовой динамики с двухстадийной моделью энерговыделения с использованием химической кинетики Николаева [6]. В начальный момент времени в небольшой части КС выделялась энергия, необходимая для инициирования детонации. В расчетах применялся конечно-разностный алгоритм на основе схемы Годунова с использованием пакета Openfoam.

**Результаты расчетов.** Область решения покрывалась равномерной неподвижной расчетной сеткой. Расчеты проводились для стехиометрических смесей водород-кислород и водород-воздух. Для случая, когда в качестве окислителя брался кислород, геометрические параметры КС взяты из работы [3] ( $D_{ch} = 4$  см,  $\Delta = 0.5$  см,  $L_{ch} = 4$  см), для воздуха – из работы [4] ( $D_{ch} = 30.6$  см,  $\Delta = 2.3$  см,  $L_{ch} = 66.5$  см). Расход на вход в камеру сгорания задавался в соответствии с экспериментами [3, 4]:  $g_{in} \approx 46$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $g_{in} \approx 75$  кг/(с·м<sup>2</sup>) для расчетов с кислородом или воздухом соответственно. На выходе из КС задавалось противодавление  $P_{backpressure} = 0.2$  атм для кислорода и 1 атм для воздуха (1 атм =  $1,013 \cdot 10^5$  Па).

**Смесь водород-кислород.** Расчеты инициирования и распространения ПДВ для стехиометрической смеси водород-кислород показали, что для  $g_{in} \approx 46$  кг/(с·м<sup>2</sup>) к моменту времени  $t \approx 8.2$  мс после инициирования НСД с одной ПДВ стабилизируется и выхо-

дит на самоподдерживающийся режим со скоростью  $D \approx 2.07$  км/с и высотой фронта  $\approx 3.2$  см. На рис.1 приведено трехмерное распределение температуры (К) в камере (а), а также (б) горизонтальный (на расстоянии 1 см от торца) и (в) вертикальный (на расстоянии 1 см за ПДВ) срез температур в КС. Видно, что ПДВ движется по кольцевому пространству камеры слева-направо, занимая большую часть КС по высоте. Вниз влево от ПДВ отходит косая ударная волна (шлейф). Из рис.1, б, в отчетливо видна зависимость решения от радиуса: поступающая смесь натекает неравномерно, быстрее заполняя пространство ближе к внешнему диаметру камеры, чем к внутреннему. Непосредственно за ПДВ (рис.1, в) втекание смеси прекращается, в то время как на расстоянии в пол периметра камеры высота слоя свежей смеси составляет около половины высоты камеры.

С целью поиска минимального удельного расхода  $g_{min}$  существования НСД проведены расчеты с уменьшением удельного расхода подачи смеси  $g_{in}$ . Показано, что при уменьшении расхода ниже отметки  $g_{in} \approx 40$  кг/(с·м<sup>2</sup>) происходит срыв ПДВ, и вместо НСД в КС начинает распространяться обычное горение. Это означает, что решение с одной ПДВ, полученное при  $g_{in} \approx 46$  кг/(с·м<sup>2</sup>), является физически допустимым, т.к. по расходу находится в окрестности  $g_{min}$ .

**Смесь водород-воздух.** Аналогично расчетам из предыдущей части доклада, проводилось моделирование НСД смеси водород-воздух. Инициирование проводилось при повышенных удельных расходах, с последующим уменьшением до расхода, которому соответствует одна волна в эксперименте [4]. На рисунке 2. показаны графики зависимости удельных расходов  $g_{in}$  и  $g_{out}$  от времени, начиная с момента  $t \approx 10$  мс. Видно уменьшение расхода  $g_{out}$  на выходе из КС до  $g_{in} \approx 75$  кг/(с·м<sup>2</sup>), что говорит о выходе ПДВ на квазистационарный режим. Значение скорости детонации  $D \approx 1.57$  км/с. Высота фронта  $\approx 14$  см. Структура ПДВ для смеси водород-воздух и неоднородность натекания свежей смеси вдоль радиуса аналогична смеси водород-кислород.

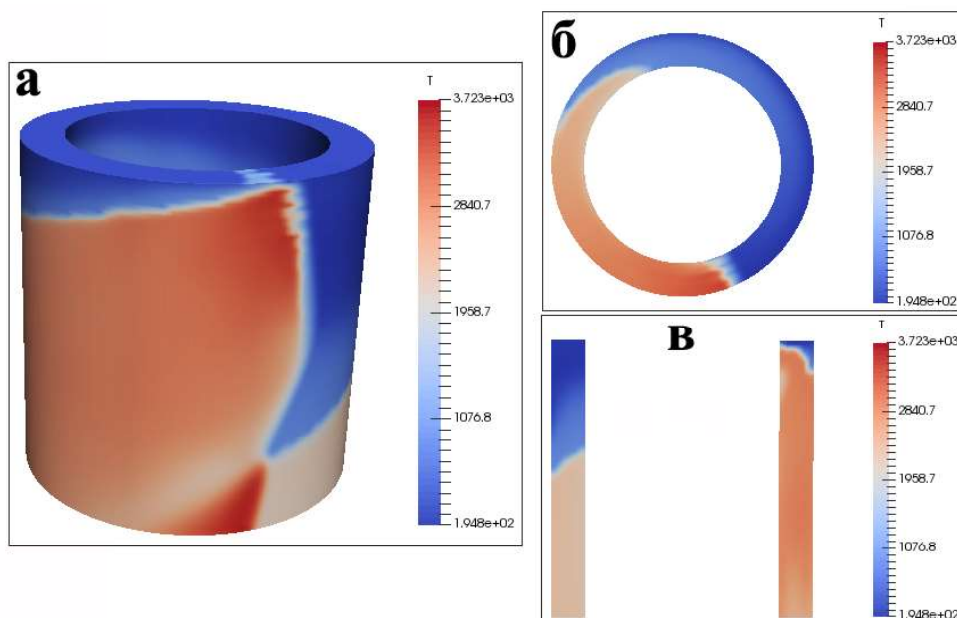


Рис. 1. Расчетное распределение температуры в КС для  $g_{in} \approx 46$  кг/(с·м<sup>2</sup>) на момент времени  $t \approx 8.2$  мс: а – трехмерное распределение, б – горизонтальный срез на 1 см от торца, в – вертикальный срез на 1 см за ПДВ.

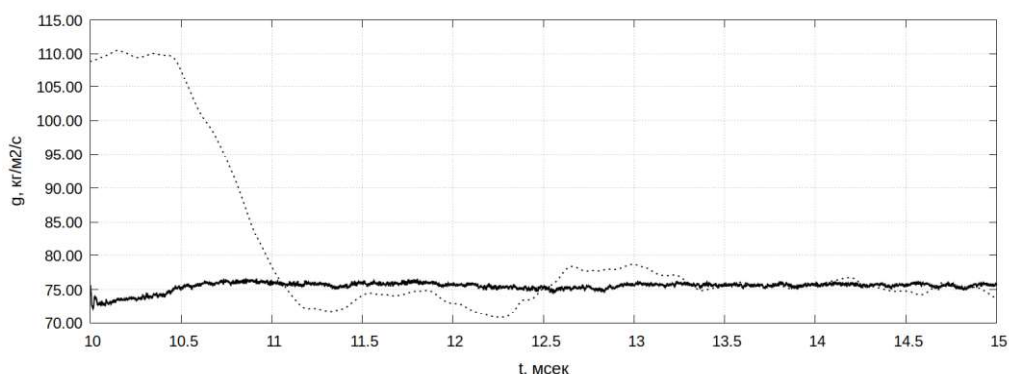


Рис. 2. Усредненный удельный расход на входе в камеру сгорания ( $g_{in}$ , сплошная линия) и на выходе ( $g_{out}$ , точечная линия) от времени.

**Анализ результатов.** Результаты расчетов смеси водород-кислород показывают хорошее соответствие с экспериментами по скорости ПДВ и удовлетворительное по высоте фронта и числу волн (в эксперименте при данном расходе смеси реализовывался двухволновой режим с высотой фронта, меньшей в 2-3 раза). Для смеси водород-воздух получено удовлетворительное соответствие по скорости ПДВ (расчетная скорость выше экспериментальной на 25%) и высоте фронта (на 40% меньше экспериментальной). Трехмерные эффекты сильно влияют на натекание свежей смеси, что провоцирует формирование сложной формы контактной границы между продуктами и холодной смесью. Недостаток смеси может способствовать уменьшению энерговыделения на фронте, что приводит к уменьшению скорости ПДВ по сравнению с квазитрехмерным расчетом [5]. Таким образом, построенная математическая модель и алгоритм решения трехмерной задачи позволяют описывать НСД в камерах типа ЖРД и анализировать трехмерные эффекты, не наблюдаемые в двумерных расчетах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-41-543009.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Войцеховский Б.В.** Стационарная детонация // Докл. АН СССР. 1959. Т. 129, № 6. С. 1254 – 1256.
2. **Быковский Ф.А., Ждан С.А.** Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 2013.
3. **Быковский Ф. А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.** Исследование непрерывной спиновой детонации водородокислородных смесей. 1. Камеры кольцевой цилиндрической геометрии. // Физика горения и взрыва. 2008, Т. 44, № 2, С. 32 – 45.
4. **Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф.** Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. 2006, Т. 42, № 4, С. 107 – 115.
5. **Zhdan S.A., Rybnikov A.I., Simonov E.V.** Calculation of continuous spin detonation in a hydrogen-air mixture in an annular combustor. 2018. AIP Conference Proceedings. 2027. 030007. DOI: 10.1063/1.5065101.
6. **Николаев Ю.А., Зак Д.В.** Согласование моделей химических реакций в газах со вторым началом термодинамики. // Физика горения и взрыва. 1988. т. 24, № 4, с.87-90.