

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С РЕАГИРУЮЩИМ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТАЛЬНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

И.А. Бедарев¹, В.М. Темербеков^{1,2}, А.В. Федоров^{1,2,3}

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1*

² *Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20*

³ *Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

Моделирование волновых процессов в химически активных средах важно как с научной, так и с технологической точек зрения. Одним из таких процессов является взаимодействие детонационной волны с реагирующим сверхзвуковым потоком, а возможным применением такого взаимодействия является инициирование воспламенения и увеличение эффективности сгорания топлива в сверхзвуковом потоке. Энергетическое воздействие может существенно интенсифицировать горение в сверхзвуковой камере сгорания, однако вместе с этим для эффективного горения должна быть обеспечена стабилизация пламени и его распространение по всему объему камеры сгорания для достижения полноты сгорания топлива.

Цель работы состоит в численном исследовании взаимодействия детонационной волны со сверхзвуковым реагирующим потоком для воспламенения и стабилизации горения в сверхзвуковом модельном канале после однократного инициирующего воздействия на предварительно перемешанную смесь [1]. Двумерная модельная камера сгорания представляет собой плоский канал высотой $H = 100$ мм, на стенках которого установлены стабилизаторы в виде обратного уступа с относительной высотой $h/H=0.25$ и закрытой каверны длиной $L/h=4.5$. Таким образом, были исследованы три конфигурации канала: канал с уступом, симметричный канал с уступом и канал с каверной.

Для упрощения расчетов, задача была разделена на три этапа. На первом этапе моделировалось течение в канале, представляющим собой камеру сгорания. Для этого в его входном сечении подается предварительно перемешанная водородо – воздушная стехиометрическая смесь с параметрами: число Маха $M = 4$, статическое давление $P_{st} = 50$ кПа и полная температура $T_0 = 1500 \div 2400$ К. Предварительные расчеты показали, что при этих температурах самовоспламенения смеси не происходило. Этот результат подтвержден экспериментально. Поэтому для обеспечения воспламенения использовалось искусственное инициирование горения. На втором этапе проводился расчет распространения детонационной волны в детонационной трубке. В дальнейшем эта детонационная волна задавалась вблизи от выхода из трубки в канал с каверной или уступом с установившимся сверхзвуковым течением в качестве начальных данных для расчетов на третьем этапе. На этом этапе детонационная волна после выхода из детонационной трубки распространялась в поперечном к основному сверхзвуковому потоку направлении, обеспечивая воспламенение смеси в канале. В этой задаче исследование вопросов связанных со смешением водородо-воздушной смеси не рассматривались.

Разработана математическая модель взаимодействия детонационной волны со сверхзвуковым потоком и создана математическая технология для ее реализации. Математическая модель включает в себя осредненные по Фавру уравнения Навье-Стокса для

многокомпонентной газовой смеси с учетом химических реакций, дополненные SST модификацией $k-\omega$ модели турбулентности. Для описания химической кинетики использованы две верифицированные в работе [2] по времени задержки воспламенения и скорости детонации кинетические схемы горения водорода в воздухе: брутто-схема с одной реакцией и детальная схема с 38 реакциями для 8 компонент. Расчеты нестационарных турбулентных течений выполнены в программном комплексе ANSYS Fluent. Для аппроксимации по времени использовалась неявная схема второго порядка, а для аппроксимации по пространству – схема расщепления вектора потоков AUSM второго порядка точности.

В результате проведенных исследований было установлено, что с помощью воздействия детонационной волны можно обеспечить воспламенение предварительно перемешанной смеси при таких температурах. Применение детонационной волны для инициирования горения в каналах с уступом не приводит к стабилизации пламени. Если в качестве стабилизатора использовалась каверна, воздействие детонационной волны сопровождается устойчивой стабилизацией горения при несимметричной схеме стабилизации. Применение симметричной схемы стабилизации усиливает эффективность процесса тепловыделения.

Также было проведено сравнение детальной и приведенной кинетических схем химических реакций, показана применимость упрощенного подхода в контексте данной задачи, не смотря на преимущества детальной кинетической схемы.

В результате показано, что детонационная волна может быть эффективным средством инициирования горения и для обеспечения стабилизации пламени в канале с каверной достаточно однократного воздействия. Выявлено, что для рассмотренных условий каверна является предпочтительным средством для стабилизации пламени при искусственном воспламенении.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-19-00010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бедарев И.А., Темербеков В.М., Федоров А.В., Рылова К.В.** Численное моделирование инициирования воспламенения в камере сгорания гиперзвукового воздушно-реактивного двигателя детонационной волной // Сибирский физический журнал. 2016. Т. 11. № 4. С. 33-44.
2. **Бедарев И.А., Федоров А.В., Рылова К.В.** Применение детальных и приведенных кинетических схем для описания детонации водородо-воздушных смесей с разбавителем // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 5. С. 22-33.