

УДК 534.222.2;541.126

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ВОЛНЫ ДЕТОНАЦИИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ  
ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ**

© 2011 г.

*Т.А. Журавская*

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

zhuravskaya@imec.msu.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

Численно изучены особенности распространения детонационной волны в плоском сверхзвуковом потоке стехиометрической водородовоздушной смеси с целью определения условий, обеспечивающих стабилизацию детонации. Установлена возможность стабилизации детонационной волны в сверхзвуковом потоке горючей газовой смеси с помощью слабых электрических разрядов. Исследовано влияние мощности, времени срабатывания и локализации разрядов на процесс стабилизации волны. Рассмотрена возможность стабилизации детонации в канале с переменной площадью поперечного сечения.

*Ключевые слова:* сверхзвуковой поток, горючая газовая смесь, электрический разряд, распространение детонации, стабилизация детонации в потоке.

**Постановка задачи**

В связи с желанием использовать преимущества детонационного горения перед нормальным пламенем в реактивных двигателях и генераторах мощных импульсов давления огромный интерес вызывает детальное исследование инициирования и особенностей распространения волн детонации в сверхзвуковом потоке горючей газовой смеси. Так, инициирование детонации электрическим разрядом в плоском канале с параллельными стенками, заполненном движущейся со сверхзвуковой скоростью стехиометрической водородовоздушной смесью, исследовано в работах [1–3]. Установлена возможность снижения энергозатрат на формирование детонации благодаря использованию модели разряда с неоднородным по пространству энергоподводом. В данной работе представлены результаты численного исследования возможности стабилизации сформированной ячеистой детонационной волны в плоском сверхзвуковом потоке стехиометрической водородовоздушной смеси.

Так, в случае когда скорость потока горючей газовой смеси в плоском канале с параллельными стенками превышает скорость самоподдерживающейся детонации, изучена возможность стабилизации движущейся против потока детонационной волны с помощью слабых электрических разрядов. Кроме того, рас-

смотрена возможность стабилизации детонации в плоском канале с переменной площадью поперечного сечения.

Для инициирования детонационной волны использовался продолжительный по времени электрический разряд в форме тонкого слоя, плотность энергоподвода которого зависит от поперечной координаты по гауссовскому закону. Подвод энергии моделировался соответствующим увеличением энергии горючей газовой смеси в области разряда.

Решение уравнений газовой динамики совместно с уравнениями химической кинетики (Maas, Warnatz [4]), учитывающей основные особенности окисления водорода, было проведено конечно-разностным методом, основанным на схеме С.К. Годунова.

**Результаты расчетов**

В результате подвода разрядом сверхкритического количества энергии в сверхзвуковом потоке стехиометрической водородовоздушной смеси в плоском канале с параллельными стенками формируются две детонационные волны: одна распространяется по потоку, а вторая – против. В случае, когда скорость потока превышает скорость самоподдерживающейся волны детонации, движущаяся против потока волна при отсутствии дополнительных возмущений сносится потоком. В результате проведен-

ных расчетов в ряде случаев установлена возможность стабилизации указанной волны с помощью слабых дополнительных электрических разрядов в форме тонкого слоя с однородной плотностью энергоподвода, усиливающих движущуюся против потока детонационную волну и тем самым препятствующих ее сносу. Как и основной, энергоподвод дополнительными разрядами моделировался соответствующим увеличением энергии горючей газовой смеси в области разрядов.

Так, в потоке с числом Маха  $M = 4.8$  волна против потока, инициируемая разрядом продолжительности  $\tau = 0.3$  мкс, подводимым сверхкритическую энергию  $E_0 = 0.87E_*$  (где  $E_*$  – критическая энергия инициирования детонации в рассматриваемом потоке мгновенным разрядом, имеющим форму тонкого слоя, с однородной по пространству плотностью энергоподвода), в случае отсутствия дополнительных разрядов достаточно быстро сносится течением, что хорошо иллюстрирует рис. 1а. Однако дополнительные разряды, подводящие энергию  $E_{add} = E_0/20$  в узком слое около  $x_{add} = 32.55$  ( $x_{add}$  – координата нижней границы области дополнительных разрядов), стабилизируют волну детонации около области дополнительного энергоподвода (рис. 1б).

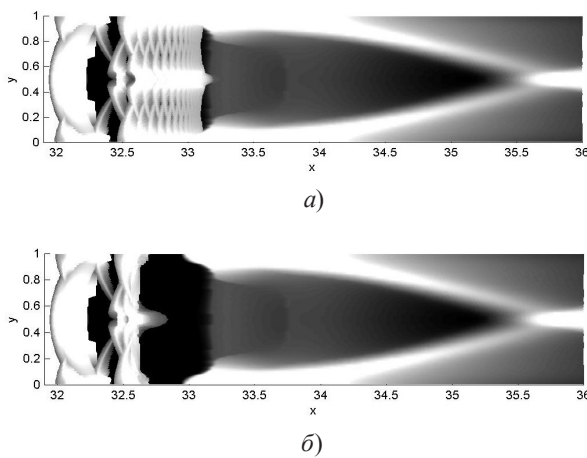


Рис. 1

После энергоподвода дополнительным разрядом распространяющаяся против потока детонационная волна усиливается, фронт волны постепенно перемещается в область выше по течению от области подвода энергии дополнительными разрядами. Однако со временем волна ослабевает, и ее фронт снова сносится ниже  $x_{add}$ , что приводит к срабатыванию следующего дополнительного разряда, в свою очередь усиливающего волну, и т.д.

Рассмотрено влияние положения области подвода энергии дополнительными разрядами, времени срабатывания разрядов и количества подводимой ими энергии на стабилизацию детонационной волны. Так, при уменьшении энергии дополнительных разрядов в описанном случае до значения  $E_{add} = E_0/30$  дополнительный энергоподвод уже не стабилизирует детонационную волну, а изменение локализации области дополнительных разрядов ( $x_{add} = 32.65$ ) при прочих равных условиях ( $E_{add} = E_0/20$ ) приводит к изменению положения, около которого стабилизируется детонация.

Результаты, изложенные в работе, получены автором совместно с В.А. Левиным.

*Работа поддержана РФФИ (гранты № 11-08-00288а, 11-01-00068а), Министерством образования и науки РФ (грант для государственной поддержки ведущих научных школ РФ: НШ-8424.1010.1).*

#### Список литературы

1. Левин В.А., Марков В.В., Журавская Т.А., Осинкин С.Ф. // Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С.М. Фролова. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. С. 235–256.
2. Левин В.А., Марков В.В., Журавская Т.А., Осинкин С.Ф. // Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва: Тез. докл. Всерос. конф. Новосибирск, 17–22 сентября 2007 г. С. 115–116.
3. Levin V.A., Markov V.V., Zhuravskaya T.A., Osinkin S.F. // Proc. of the 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), July 23–27, 2007. Poitiers, France. No 9. 4 p. (CD).
4. Maas U., Warnatz J. // Combustion and Flame. 1988. Vol. 74. P. 53–69.

## STABILIZATION OF DETONATION WAVE IN SUPERSONIC FLOW OF COMBUSTIBLE GAS MIXTURE

*T.A. Zhuravskaya*

Propagation of a formed detonation wave in a plane supersonic flow of stoichiometrical hydrogen-air mixture is numerically studied with the purpose of determination of conditions providing the stabilization of a detonation wave in the gas flow. The possibility of detonation wave stabilization in the supersonic flow of combustible gas mixture by means of weak electrical discharges is shown. The influence of the energy of the discharges, their actuation time and their location is investigated. The possibility of stabilization of the detonation wave in the plane channel with variable cross-section area is also considered.

*Keywords:* supersonic flow, combustible gas mixture, electrical discharge, detonation propagation, stabilization of detonation in the flow.