

УДК 533.6

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

© 2011 г.

В.Ю. Гидаспов, Н.С. Северина

Московский авиационный институт

gidaspov@k806.mainet.msk.su

Поступила в редакцию 15.06.2011

Приводятся результаты численного моделирования, выполненного в «стационарной» и «нестационарной» постановках, экспериментальных исследований в ударных трубах, проведенных В.А. Павловым (НИИ механики МГУ), по измерению задержек времени воспламенения в пересжатых детонационных волнах в сильно разбавленных аргоном водородо-кислородных горючих смесях.

Ключевые слова: детонация, ударная труба, задержка воспламенения, разбавленная аргоном водородо-кислородная горючая смесь.

Экспериментальные исследования проводились В.А. Павловым в ударной трубе (УТ) с внутренним диаметром 57 мм, состоящей из камеры низкого давления (КНД) длиной 1 м и камеры высокого давления (КВД) длиной 4.5 м, разделенных диафрагмой. КНД наполнялась исследуемым газом, а КВД – толкающим газом. При разрыве диафрагмы в КНД распространялась ударная волна (УВ), сжимающая и нагревающая исследуемый газ. В экспериментах измерялись скорость УВ – $D_{УВ}$ и задержка воспламенения в горючей смеси за УВ – $\tau_{\text{лаб}}$, причем наблюдаемая в измерительных секциях скорость УВ с погрешностью эксперимента была постоянной [1].

Рассмотрим качественную картину течения, возникающую в ударной трубе, на примере численного моделирования эксперимента №32 [1] в «нестационарной» постановке. Расчеты проводились по методике, приведенной в [2]. КВД была заполнена гелием под давлением $p_{\text{КВД}} = 390474$ Па; КНД – смесью, состоящей из 4% водорода, 4% кислорода и 92% аргона при давлении $p = 12159$ Па и температуре $T = 298.15$ К.

На рис. 1 представлена временная развертка процесса при численном моделировании эксперимента в «нестационарной» постановке: УВ – жирная сплошная линия; КР – крупная пунктирная линия; ВВР – мелкие пунктирные линии; траектории газа – тонкие сплошные линии. В начальный момент времени мембрана, разделяющая КНД и КВД, разрывается и образуется УВ, которая распространяется по КНД, контактный разрыв (КР), отделяющий инертный газ от горючей смеси и веер волн разрежения (ВВР), распространяющийся в инертном газе. Температура за головной УВ составляет 1302 К, что превосходит температуру само-

воспламенения горючей смеси. При $t \approx 0.00045$ с смесь воспламеняется на КР, образуется волна горения, которая при $t \approx 0.00095$ с догоняет головную УВ. Происходит распад разрыва, в результате которого образуется нестационарная пересжатая детонационная волна (ДВ), распространяющаяся по горючей смеси. По мере своего продвижения по УТ, пересжатая ДВ ослабевает и к моменту времени $t \approx 0.00025$ с выходит на режим распространения, близкий к стационарному. Таким образом, временную развертку течения условно можно разделить на три области: 1) от начального распада разрыва до образования нестационарной пересжатой ДВ; 2) нестационарная пересжатая ДВ; 3) стационарная пересжатая ДВ.

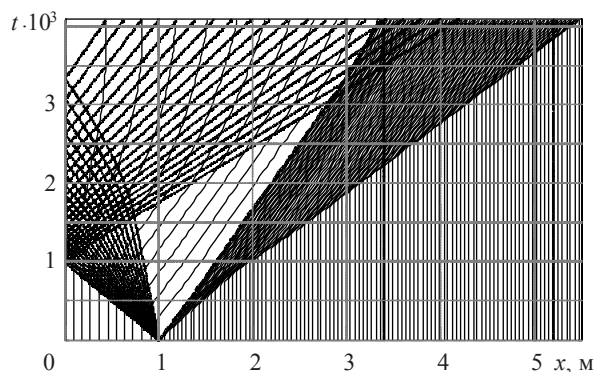


Рис. 1

Для моделирования химических превращений в горючей смеси использовались 10 компонентов: H_2 , OH , H_2O , O_2 , H_2O_2 , HO_2 , H , O , O_3 , Ar и 45 обратимых реакций [3].

Описанные в [1] эксперименты имели своей целью определение времени задержки воспламенения. Данные измерения имеет смысл проводить только в области 3), т.е. когда имеется сформиро-

вавшаяся стационарная пересжатая ДВ. Приведем результаты численного моделирования экспериментов в предположении, что по УТ распространяется стационарная пересжатая ДВ со скоростью, наблюдаемой в экспериментах. Времена задержки воспламенения вычислялись по трем критериям: τ_1 – по началу роста температуры за УВ, τ_2 – по точке перегиба графика температуры, τ_3 – по пику концентрации ОН за УВ. Всего был промоделирован 151 эксперимент. На рис. 2 приведены рассчитанные и экспериментальные зависимости времен задержек воспламенения от температуры для одной из 9 рассмотренных горючих смесей $3\%(1\text{O}_2 + 2\text{H}_2) + 97\%\text{Ar}$ (\blacklozenge – $\tau_{\text{лаб}}$, $P_0 = 0.06$ атм, $+$ – τ_1 , $P_0 = 0.06$ атм, $-$ τ_2 , $P_0 = 0.06$ атм, \times – τ_3 , $P_0 = 0.06$ атм, \blacktriangledown – $\tau_{\text{лаб}}$, $P_0 = 0.12$ атм, \ast – τ_1 , $P_0 = 0.12$ атм, \circ – τ_2 , $P_0 = 0.12$ атм, \bullet – τ_3 , $P_0 = 0.12$ атм). Наблюдается хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных при $T > 950$ К. Наилучшее совпадение дают первый и третий критерий воспламенения, причем в большинстве рассмотренных случаев экспериментальные точки лежат между рассчитанными по данным критериям.

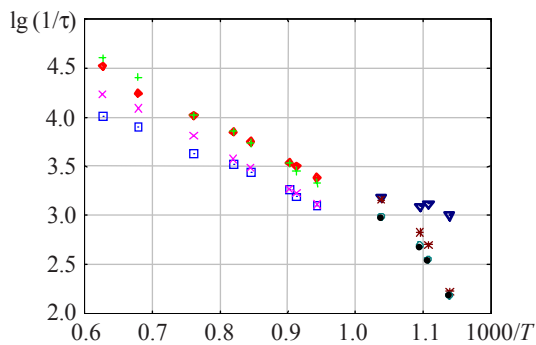


Рис. 2

Было проведено моделирование экспериментов в «нестационарной» постановке (см. рис. 1), которое, в частности, позволяет определять время образования стационарной пересжатой ДВ и применимость используемого в расчетах кинетического механизма для описания процесса детонации в УТ. Неизвестное начальное давление в КВД было получено из решения задачи о распаде разрыва в равновесно-реагирующем газе [4] при заданных параметрах в КНД и измеренной в эксперименте скорости стационарной пересжатой ДВ. При этом предполагалось, что газовая смесь между УВ и КР находится в состоянии термодинамического

равновесия. Рассчитанное в результате численного решения нестационарных уравнений газовой динамики при таком способе задания начальных данных значение скорости стационарной пересжатой ДВ (рис. 3, кривые 2, 6) с высокой точностью соответствует наблюдаемой в эксперименте №32. Также при численном моделировании варьировалось начальное давление в КНД.

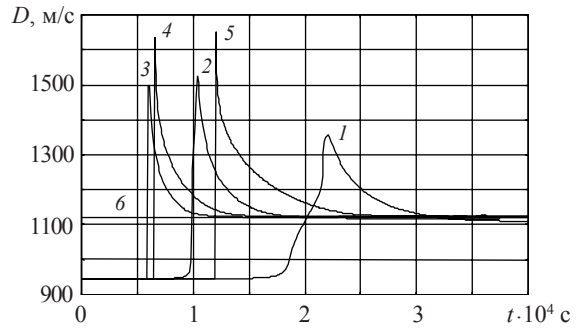


Рис. 3

На рисунке представлена зависимость скорости УВ от времени при различных начальных давлениях в КНД: 1 – 6079.5 Па, 2 – 12159 Па, 3 – 24318 Па, 4 – 36477 Па, 5 – 42556.5 Па, 6 – скорость пересжатой ДВ (распад разрыва, для случая когда смесь газов между УВ и КР находится в состоянии термодинамического равновесия), $p_{\text{КВД}}/p_{\text{КНН}} = 32.9$. Получено, что скорость стационарной пересжатой ДВ и ряд параметров в ней не зависят от механизма химических реакций и стремятся к соответствующим равновесным значениям, найденным в результате решения задачи о распаде разрыва в равновесно-реагирующем газе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №09-01-00564.

Список литературы

1. Павлов В.А. <http://www.chemphys.edu.ru/> 2009. Т. 8.
2. Гидаспов В.Ю., Пирумов У.Г., Северина Н.С. Математическое моделирование квазиодномерных нестационарных течений реагирующего газа с произвольным числом взаимодействующих разрывов // Вестник МАИ. М.: Изд-во МАИ, 2008. Т. 15, №5. С. 83–94.
3. Ибрагимов Л.Б., Смехов Г.Д., Шаталов О.П. <http://www.chemphys.edu.ru/>. 2009. Т. 8.
4. Гидаспов В.Ю. Вычислительный алгоритм решения задачи о распаде произвольного разрыва в равновесно-реагирующем газе // Математическое моделирование. 2006. Т. 18, №8. С. 64–76.

NUMERICAL RESEARCH OF GAS DETONATION IN A SHOCK TUBE*V.Yu. Gidasпов, N.S. Severina*

The results of the numerical modeling using «stationary» and «non-stationary» formulations, experimental researches in the shock tubes conducted by V.A. Pavlov (scientific research institute of Mechanics of the Moscow State University), on measurement of time delays of ignition in recompressed detonation waves in hydrogen-oxygen mixes strongly diluted with argon are presented.

Keywords: detonation, shock tube, delay of ignition, diluted with argon a hydrogen-oxygen gas mixture.