

УСЛОВИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

С. В. Хомик, С. П. Медведев, А. Н. Поленов, Б. Е. Гельфанд

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, khomik@polymer.chph.ras.ru

На основе экспериментов по фокусировке ударных волн в водородовоздушных смесях и имеющих в литературе данных построена зависимость критического числа Маха ударной волны, при котором происходит инициирование детонации в области вершины вогнутого отражателя, от размеров отражателя и реакционной способности смеси. Исследовано влияние формы и размеров отражателя на значение этого числа Маха.

Ключевые слова: фокусировка ударных волн, инициирование, детонация газовой смеси.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие ударной волны с вогнутой поверхностью приводит к возникновению локальных зон с повышенной температурой и давлением. Если поверхность при этом имеет тот или иной вид симметрии, это явление принято называть фокусировкой ударной волны на двух- или трехмерном отражателе. В инертных газовых средах такие процессы изучены достаточно подробно (см. обзоры [1, 2]). В реакционноспособной газовой смеси фокусировка ударных волн может приводить к инициированию различных режимов взрывных превращений [3–5]. Инициирование детонации в горючей смеси при взаимодействии ударной волны с вогнутым отражателем возможно не только в окрестности вершины отражателя [3, 4], но и вне его полости [5]. Подобные течения с различными в разных точках пространства значениями температуры и давления горючей среды реализуются, в частности, в камерах сгорания различных устройств и при развитии аварийных ситуаций.

Детонация газовых смесей может инициироваться как непосредственно при выделении (с достаточной скоростью) необходимого количества энергии в ограниченной области пространства, так и в ходе последовательного прохождения различных стадий взрывного превращения, например при переходе горения в детонацию. Известен также механизм возникновения детонации в пространстве с неоднородным распределением температуры [6, 7]. В слу-

чае фокусировки ударных волн в горючей газовой среде детонация зарождается в области с неоднородными значениями не только температуры, но и давления. Кроме того, неизвестны количество выделившейся энергии и время ее выделения. Все это затрудняет расчет условий инициирования детонации при фокусировке. Отсутствуют даже простые количественные оценки критических условий инициирования. Поэтому представляется оправданным поиск связи между параметрами исходной газовой смеси и геометрией отражателя с интенсивностью ударной волны, при которой возможно возникновение детонации в вершине отражателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Из анализа имеющихся в литературе данных следует, что различные режимы взрывного превращения в двухмерных отражателях исследованы полнее и для более широкого диапазона форм отражателей и содержания горючего в смеси, чем в случае трехмерных отражателей [5, 8–10]. Трехмерный отражатель максимального размера, для которого имеются надежные данные по инициированию в нем детонации водородовоздушных смесей, использовался в [11]. Этот отражатель представлял собой конус с углом у вершины 70° и диаметром 350 мм. Для пополнения существующих данных [5, 8–10] проведены специальные эксперименты с трехмерными отражателями.

Эксперименты проводились в ударной трубе диаметром 54 мм. Исследовался процесс фокусировки ударных волн в водородовоздушных смесях с объемным содержанием водорода

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04-03-39003-ГФЕН2004-а).

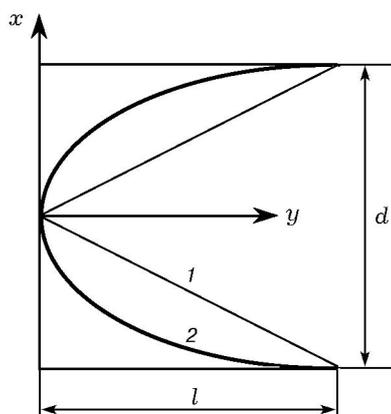


Рис. 1. Схемы и характерные размеры конического (1) и параболического (2) отражателей

15 ÷ 60 % на трехгранном пирамидальном отражателе с углом у вершины 90° , коническом отражателе с углом 37° и параболических отражателях, образующая которых соответствует формулам $y = 0.037x^2$ и $y = 0.11x^2$. Для выявления роли масштабного эффекта в этой же трубе проведены опыты с коническим отражателем с углом 70° , полностью идентичным использованному в [11]. Схематичное изображение конического и параболического отражателей представлено на рис. 1 (d — поперечный размер отражателя, равный в случае осесимметричного отражателя его диаметру, l — расстояние от вершины отражателя до его основания, x и y — оси координат, направленные соответственно перпендикулярно оси отражателя и вдоль нее). По времени прихода ударной волны на датчики давления измеряли скорость v и определяли число Маха $M = vc^{-1}$, где c — скорость звука в несжатом газе. Датчики располагались на расстояниях 24 и 119 мм от края отражателя. Схема экспериментальной установки и методика измерений подробно описаны в [10]. Для анализа полученных результатов использованы данные высокоскоростной съемки процессов внутри двухмерного отражателя.

Появление детонации фиксировалось при выполнении условия $W \geq D - u$ (здесь W — регистрируемая скорость идущего от отражателя ударно-волнового комплекса, D — расчетная скорость детонации, соответствующая давлению и температуре смеси за падающей ударной волной, u — скорость течения за этой волной).

Результаты измерения скорости W идуще-

го от отражателя ударно-волнового комплекса для конуса с углом у вершины 70° в смеси 15 % водорода с 85 % воздуха приведены на рис. 2. На рисунке представлены также расчетные значения скорости отраженной от плоской поверхности ударной волны W_r и расчетная зависимость $D - u$. Как показано на рис. 2, в зависимости от числа Маха падающей ударной волны реализуются три различные области значений скорости волнового комплекса, распространяющегося от отражателя. Детальное рассмотрение особенностей взрывных режимов в областях 1, 2 и определение критического для воспламенения числа Маха не проводились. Как видно из рисунка, значения W увеличиваются по мере роста числа Маха. В области 2 увеличение числа Маха падающей ударной волны приводит к скачкообразному изменению разности между W и W_r . При $M \geq 2.42$ скорость отраженного ударно-волнового комплекса становится сравнимой с разностью $D - u$ (область 3). Это означает, что в полости отражателя появилась детонационная волна. Из приведенных в [5] результатов визуализации взаимодействия ударных волн с двухмерными отражателями следует, что за счет системы вторичных волн поле давления и температуры смеси в полости отражателя неоднородно и, как правило, значения этих величин выше, чем за падающей ударной волной. Кроме

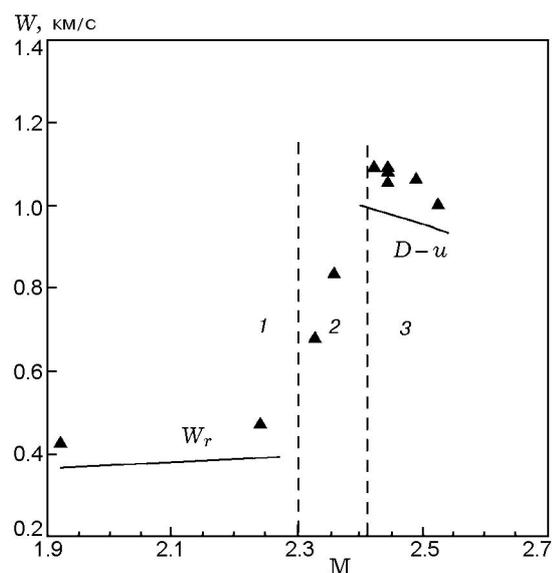


Рис. 2. Зависимость скорости отраженного от конической полости ударно-волнового комплекса от числа Маха падающей ударной волны в смеси 15 % H_2 + 85 % воздуха

этого, фронт детонационной волны в отражателе практически перпендикулярен его стенкам и при выходе из него происходит дополнительное отражение от стенок трубы. Только на некотором расстоянии от отражателя детонационная волна становится плоской. Поэтому в месте измерения, расположенном вне полости отражателя, регистрируемая скорость распространения детонации несколько превышает разность $D - u$. За критическое для инициирования детонации в вершине отражателя число Маха M_{cr} принималось его значение на границе областей 2 и 3. Для случая, приведенного на рис. 2, это значение соответствует $M_{cr} = 2.42$. Таким образом, геометрически подобное уменьшение всех размеров отражателя примерно в 6.5 раз приводит к увеличению необходимого для инициирования детонации числа Маха с $M_{cr} = 1.93$, как в [11], до $M_{cr} = 2.42$.

Ранее показано [8, 9], что при изменении концентрации горючего в смеси меняется и число M_{cr} . Проведенные эксперименты с водородовоздушными смесями в ударной трубе диаметром 54 мм и данные работы [9] позволяют построить зависимость M_{cr} от размера λ детонационной ячейки смеси, характеризующего ее реакционную способность. Такая зависимость представлена на рис. 3. Линия 1 соответствует осесимметричным отражателям различной формы с отношением $l/d = 0.5$, линия 2 — отражателям с $l/d = 1.5$. Линии 1 и 2 показывают границы области инициирования детонации в объеме у вершины отражателя. Из рис. 3 видно, что уменьшение реакционной способности смеси, выражающееся в росте размера ячейки, приводит к увеличению значения M_{cr} . Форма поверхности отражателя при постоянных диаметре и длине практически не влияет на значение M_{cr} . Можно отметить также уменьшение M_{cr} с ростом глубины отражателя l при постоянном поперечном размере d .

В литературе отсутствуют данные о значениях λ в том диапазоне составов смеси и начальных давлений, при которых проводились эксперименты. Поэтому использовались значения λ , рассчитанные по изложенному в [12] методу. Ранее отмечалось, что детонация после своего зарождения распространяется по смеси, параметры которой неоднородны и локально отличны от параметров за проходящей ударной волной. Учитывая это, в работе используется размер ячейки, соответствующий пара-

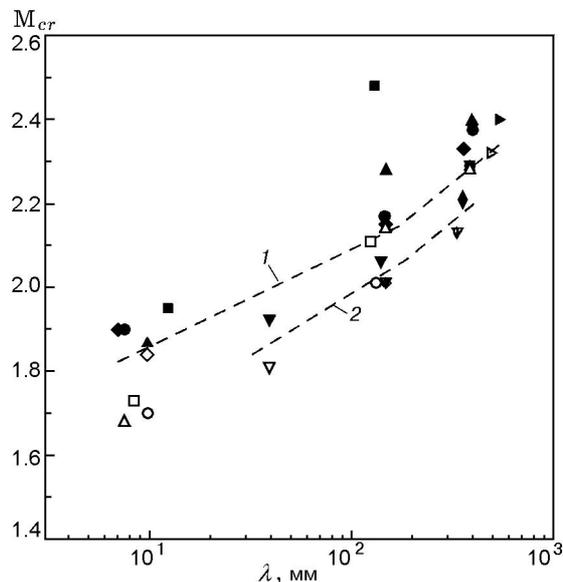


Рис. 3. Зависимость критического значения числа Маха от размера детонационной ячейки для отражателей с поперечным размером $d = 54$ мм:

линия 1 — $l/d = 0.5$, 2 — $l/d = 1.5$; темные значки соответствуют детонации, светлые — отсутствию детонации: \blacklozenge — конус с углом у вершины 90° , $l/d = 0.5$, $l = 27$ мм [9], \bullet — трехгранная пирамида с углом у вершины 90° , $l/d = 0.5$, \blacksquare — полусфера, $l/d = 0.5$ [9], \blacktriangle — параболоид, $l/d = 0.5$, \blacklozenge — параболоид, $l/d = 1.5$, $l = 81$ мм, \blacktriangledown — конус с углом 37° , $l/d = 1.5$, \blacktriangleright — конус с углом 70° , $l/d = 0.5$

метрам исходной смеси перед падающей ударной волной.

Можно предположить, что зависимость M_{cr} от геометрических размеров отражателя и реакционной способности смеси должна включать характерные размеры отражателя d и l и размер детонационной ячейки λ . Давление и температура за фронтом ударной волны являются функцией квадрата ее числа Маха. Поэтому представляется обоснованным искать корреляцию для M_{cr}^2 .

На рис. 4,а представлены значения M_{cr}^2 при инициировании детонации в вершине трехмерных отражателей (темные символы) в зависимости от безразмерного параметра $d^2 l / \lambda^3$, а также числа Маха падающей ударной волны, при которых не отмечалось инициирование детонации (светлые символы). Используются данные, полученные в настоящей работе и приведенные в [9]. В числителе использованного безразмерного параметра указана величина,

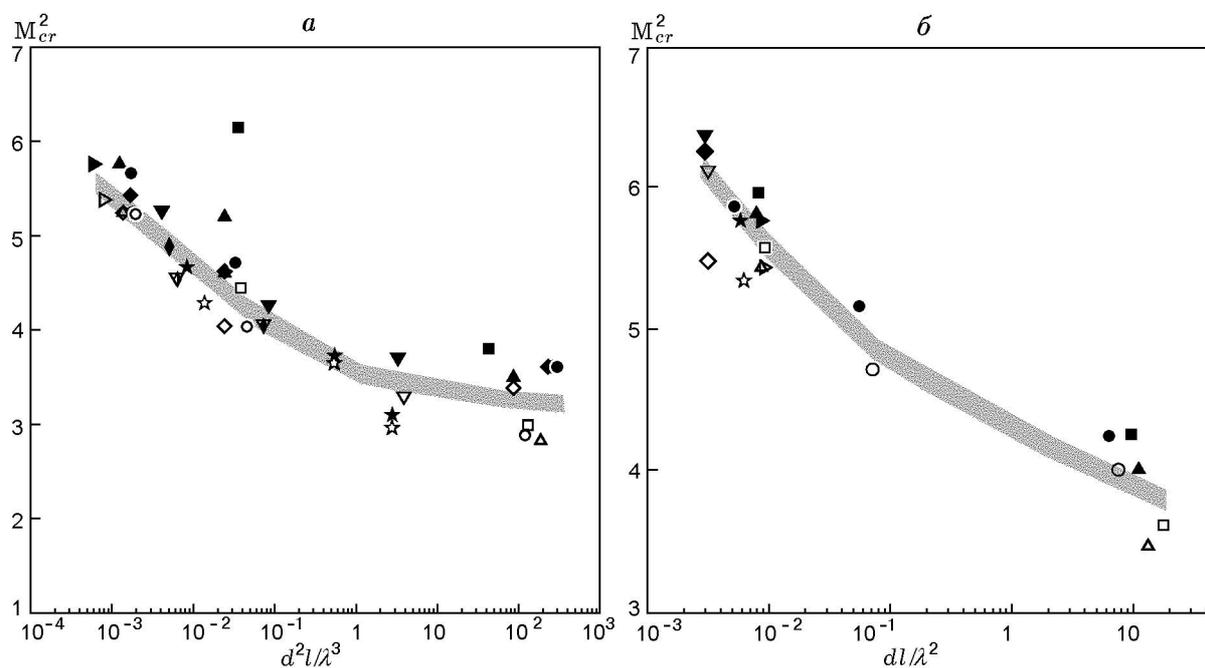


Рис. 4. Параметрическое представление областей возбуждения детонации на вогнутых отражателях: темные значки — детонация в вершине отражателей, светлые — отсутствие детонации; *a* — трехмерные отражатели, $d = 54$ мм: \blacklozenge — конус с углом у вершины 90° , $l/d = 0.5$, $l = 27$ мм [9], \bullet — трехгранная пирамида с углом у вершины 90° , $l/d = 0.5$, \blacksquare — полусфера, $l/d = 0.5$ [9], \blacktriangle — параболоид, $l/d = 0.5$, \blacklozenge — параболоид, $l/d = 1.5$, $l = 81$ мм, \blacktriangledown — конус с углом 37° , $l/d = 1.5$, $l = 81$ мм, \blacktriangleright — конус с углом 70° , $l/d = 0.5$; \star — конус с углом 70° , $d = 350$ мм, $l = 230$ мм [11]; *б* — двухмерные отражатели: \bullet — полуцилиндр, $d = 34$ мм, $l = 17$ мм [9], \blacktriangle — полуцилиндр, $d = 50$ мм, $l = 25$ мм [9], \blacklozenge — полуцилиндр, $d = 54$ мм, $l = 27$ мм [10], \blacksquare — клиновидный 90° , $d = 50$ мм, $l = 25$ мм [8], \blacktriangledown — клиновидный 90° , $d = 54$ мм, $l = 27$ мм [10], \star — клиновидный 53° , $d = 54$ мм, $l = 54$ мм [10], \blacktriangleright — параболический, $l/d = 1.5$, $d = 54$ мм, $l = 81$ мм [10]

пропорциональна объему отражателя, в знаменателе — размер ячейки в третьей степени, рассчитанный для давления и температуры исходной смеси перед проходящей ударной волной.

Как показано на рис. 4, *a*, существует граница, разделяющая области значений параметров, при которых возможна либо отсутствует детонация в вершине отражателя. Из графика следует, что при увеличении размеров отражателя или повышении реакционной способности смеси наблюдается уменьшение значений M_{cr}^2 .

В настоящее время отсутствуют данные об инициировании детонации в двухмерных отражателях с существенно отличающимися размерами d и l . Варьировался только размер l — от $l/d = 0.5$ до $l/d = 1.5$ при $d \approx 50$ мм [8–10]. На рис. 4, *б* представлены значения M_{cr}^2 при инициировании детонации в вершине использованных двухмерных отражателей в зависимости от безразмерного параметра dl/λ^2 (как и ранее, здесь d — максимальный поперечный

размер двухмерного отражателя, l — расстояние от его вершины до основания). Из рис. 4, *б* следует, что зависимость M_{cr}^2 от размеров отражателя и реакционной способности смеси подобна приведенной на рис. 4, *a*. Это дает основания предположить, что и для двухмерных отражателей критическое для инициирования детонации число Маха убывает с увеличением размеров отражателя.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для объяснения полученных результатов рассмотрим представленные на рис. 5 фотографии, на которых показаны близкие стадии процесса отражения в инертной ($15\% \text{H}_2 + 85\% \text{N}_2$) и горючей ($15\% \text{H}_2 + 85\% \text{воздуха}$) смесях на отражателе в виде клина с углом у вершины 53° . Видно, что в момент времени $t = 0$, условно принятый за начальный, отличий практически нет. Течение в области А у вершины отражателя в этот момент времени существенно

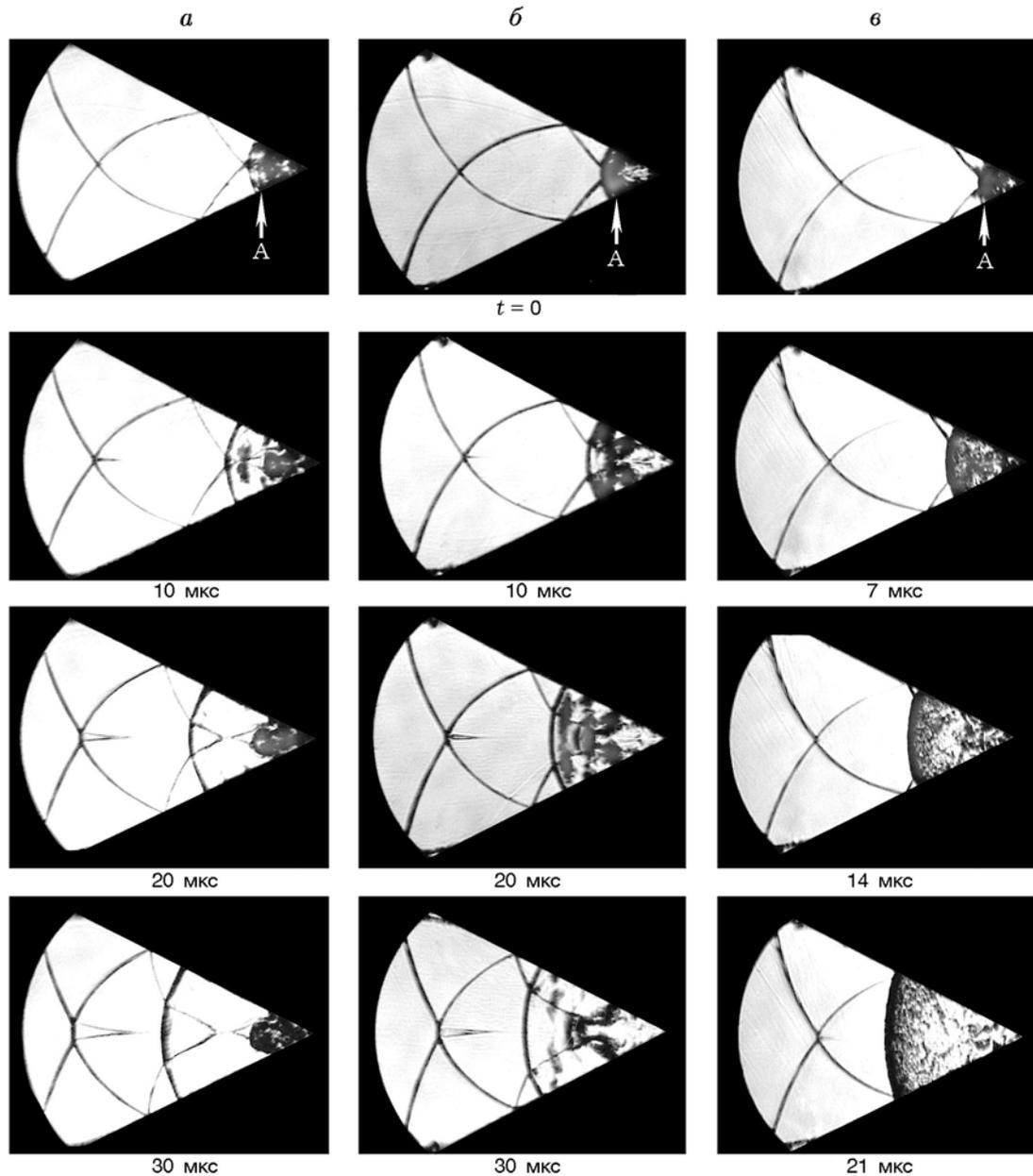


Рис. 5. Результаты высокоскоростного фотографирования ударно-волновых и взрывных процессов внутри клиновидного отражателя с углом 53° :

a — 15 % H_2 + 85 % N_2 , $M = 2.5$; *б* — 15 % H_2 + 85 % воздуха, $M = 2.36$, *в* — 15 % H_2 + 85 % воздуха, $M = 2.4$

неоднородное, с большими градиентами всех газодинамических параметров. В момент времени $t = 20$ мкс (см. рис. 5, *б*) внутри полости отражателя наблюдается реагирование смеси на ударных скачках за распространяющейся наружу отраженной ударной волной. В близкий к этому момент $t = 21$ мкс (см. рис. 5, *в*) видна идущая из полости отражателя детонационная волна. В инертной смеси в момент вре-

мени $t = 20$ мкс наблюдаются система скачков за отраженной волной и вихрь в вершине отражателя. В случае, представленном на рис. 5, *в*, на скачках внутри области *A* реализуются более высокие значения температуры и давления, чем в случае 5, *б*, поскольку больше значения числа Маха падающей ударной волны. Можно предположить, что в случае, показанном на рис. 5, *в*, в области *A* скорость выделения энер-

гии достаточна для поддержания интенсивности распространяющегося от вершины отражателя ударно-волнового комплекса на уровне, равном или выше скорости детонации Чепмена — Жуге, а в случае *5, б* — нет.

Рассмотрим, что происходит при падении ударной волны с числом Маха M_{cr} на отражатели различных размеров. Предположим, что отражатели геометрически подобны. Увеличение размера отражателя приведет к увеличению абсолютных размеров области *A* при сохранении ее относительных размеров и к практически полному воспроизводству всех газодинамических параметров внутри нее. Можно также предположить, что основное количество энергии в этой области выделяется на системе скачков или в их окрестности. При увеличении размера отражателя количество выделившейся энергии растёт пропорционально площади скачков, т. е. пропорционально площади поперечного сечения, время же энерговыделения пропорционально линейному размеру. Поэтому темп энерговыделения в большем отражателе будет больше. В силу этого в большем отражателе относительный объём области *A*, достаточный для инициирования детонации в смеси неизменного состава, может быть меньше, чем в меньшем отражателе. Такое условие выполняется при уменьшении числа Маха падающей ударной волны. Это означает, что число M_{cr} должно уменьшаться при увеличении размеров отражателя, что и показали эксперименты.

ВЫВОДЫ

На основе экспериментальных данных установлена зависимость критического числа Маха подходящей к вогнутому отражателю ударной волны, при котором происходит инициирование детонации в области около вершины отражателя, от размеров отражателя и реакционной способности смеси. Обнаружено, что значение этого числа Маха уменьшается при увеличении размера отражателя и повышении реакционной способности смеси. При неизменной длине отражателя форма его вогнутой поверхности слабо влияет на критическое число Маха.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Grönig H.** Past, present and future of shock focusing research // Proc. of the Intern. Workshop on Shock Wave Focusing, Senday, Japan, 1989. P. 1–37.
2. **Milton B. E.** The focusing of shock waves in two-dimensional and axi-symmetric ducts // Ibid. P. 155–191.
3. **Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Заманский В. М. и др.** Воспламенение горючих газовых смесей в условиях фокусировки отраженных ударных волн // Хим. физика. 1988. Т. 7, № 10. С. 1387–1391.
4. **Chan C. K., Lau D., Thibault P. A., Penrose J. D.** Ignition and detonation initiation by shock focusing // Current Topics in Shock Waves (AIP Conf. Proc.) / Y. Kim (Ed.). 1989. P. 161–166.
5. **Gelfand B. E., Khomik S. V., Bartenev A. M., et al.** Detonation and deflagration initiation at the focusing of shock waves in combustible gaseous mixture // Shock Waves. 2000. V. 10, N 3. P. 197–204.
6. **Зельдович Я. Б., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М., Сивашинский Г. И.** О возникновении детонации в неравномерно нагретом газе // ПМТФ. 1970. № 2. С. 76–84.
7. **Bartenev A. M., Gelfand B. E.** Spontaneous initiation of detonations // Prog. Energy Combust. Sci. 2000. V. 26, N 1. P. 29–55.
8. **Гельфанд Б. Е., Хомик С. В., Медведев С. П.** Самовоспламенение гомогенных газовых смесей вблизи неплоских поверхностей // Докл. АН. 1998. Т. 359, № 4. С. 490–494.
9. **Gelfand B. E., Khomik S. V., Medvedev S. P., et al.** Selfignition of combustible mixtures behind shock waves reflected at the non-flat surfaces at high initial pressure // Book of Abstr. 20th ISSW, Pasadena, 1995. P. 251.
10. **Бартенев А. М., Гельфанд Б. Е., Грениг Г. и др.** Горение газовых смесей в пространстве с неоднородными полями давления и температуры // Изв. АН. Механика жидкости и газа. 1999. № 2. С. 120–126.
11. **Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety, SOAR Repot, 2000, NEA/CSNI/R(2000)7.**
12. **Gavrikov A. I., Efimenko A. A., Dorofeev S. B.** A model for detonation cell size prediction from chemical kinetics // Combust. Flame. 2000. V. 120, N 1. P. 19–33.

Поступила в редакцию 25/VII 2006 г.