

Рис. 2. Влияние формы фронта детонационной волны (а) на кинетику разложения ТГ 40/60 (б).

1 —  $\bar{x} = 0,24 \bar{r}^2$ ; 2 —  $\bar{x} = 0,32 \bar{r}^2$ ;  
3 — окружность; 4 —  $\bar{x} = 0,48 \bar{r}^2$ ;  
5 —  $\bar{x} = 0,59 \bar{r}^2$ .

Кривизну линий тока необходимо учитывать также при определении кинетики разложения ВВ лагранжеевым или динамическим методом в случае искривления фронта инициирующей ударной волны. В [7] кинетика разложения ТНТ находилась из анализа массовых скоростей в реагирующем ВВ динамическим методом и учитывалась только кривизна фронта инициирующей УВ. Неучет кривизны линий тока привел к немонотонной кинетике разложения ВВ (в области больших давлений скорость разложения падает) и к неоднозначной зависимости ее от давления ударного сжатия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлюк К. М., Трофимов В. С. О возможном газодинамическом пределе распространения детонации // ФГВ.— 1977.— 13, № 4.— С. 606—613.
2. Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С. Структура течения за ударным фронтом неидеальной детонационной волны и пределы детонации КВВ // Первый Всесоюз. симп. по макрокинетике и химической газодинамике.— Черноголовка, 1984.— Т. 1, Ч. 1.
3. Chaisse F., Servas J. M., Avelle J. et al. A theoretical analysis of the shape of steady axisymmetrical reactive shock front in cylindrical charges of high explosive: Prepr. The 8th Symp. (Int.) on Detonation, Albuquerque, New Mexico, 1985.— P. 539—547.
4. Михайлюк К. М. Косвенный метод оценки скорости тепловыделения при детонации // Детонация.— Черноголовка, 1981.— С. 9—12.
5. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации.— М.: Мир, 1985.— 384 с.
6. Dobratz V. M. Properties of chemical explosives and explosive simulants.— Livermore, Univ. California, 1974.
7. Трофимов В. С., Трофимова Г. П. О возможности разложения литого ТНТ в ударном скачке // ФГВ.— 1980.— 16, № 2.— С. 92—99.

г. Москва

Поступила в редакцию 18/II 1992

УДК 534.292.2

Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, С. Г. Цариченко, А. Ю. Каплин

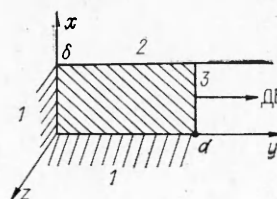
### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВОМ СЛОЕ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ

Теоретически исследовано влияние пространственных характеристик источника возбуждения детонационной волны на критическую энергию инициирования  $W_{кр}$ . Найдено, что при температуре возбуждаемого газа  $T < 12 T_0$  ( $T_0$  — температура окружающей среды), величина  $W_{кр}$  с уменьшением  $T$  резко возрастает. При этом также существенно возрастает и минимально необходимый пространственный размер источника инициирования. Найдено, что температура, ниже которой резко возрастает  $W_{кр}$ , приблизительно совпадает с температурой в точке Чепмена — Жуге для одномерной детонационной волны в стехиометрической водородно-кислородной смеси.

Изучение инициирования газовой детонации представляет как теоретический интерес в связи с дальнейшим развитием представлений о механизме возникновения детонационных волн (ДВ), так и в связи с

Рис. 1. Расчетная схема прямого инициирования ДВ в газовом слое, граничащем с твердой нетеплопроводной стенкой.

1 — стенка; 2 — воздух; 3 — гремучий газ.



практическими проблемами обеспечения взрывобезопасности технологических процессов, в которых образуются горючие газы и пары. В случае прямого инициирования ДВ основным параметром является критическая энергия  $E_{кр}$ , величина которой, как показано в ряде работ (см., например, [1—3]), определяется составом смеси, ее давлением и температурой, а также временными характеристиками источника. В то же время роль пространственных характеристик источника инициирования исследована недостаточно. В связи с этим настоящая работа посвящена теоретическому изучению этого вопроса.

В исследованиях численно моделировали газодинамические и химические процессы, протекающие при инициировании и распространении ДВ в газовом слое, граничащим с твердой нетеплопроводной стенкой. Методика расчетов подробно рассмотрена в [4, 5]. Использовали двумерные (в силу расчетов для газового слоя) уравнения газодинамики в лагранжевом описании, дополненные уравнением химической кинетики в аррениусовском виде. Эффективная энергия активации  $E$  и предэкспоненциальный фактор  $A$  подобраны в [5] так, что правильно описывают известную из эксперимента зависимость периода индукции самовоспламенения гремучей смеси от температуры [6]. Величина эффективной удельной теплоты сгорания гремучей смеси  $Q$  найдена в работе [5] таким образом, чтобы расчетное значение скорости ДВ при больших толщинах газового слоя  $\delta$  было близко к скорости Чепмена — Жуге. В результате получено  $E = 84$  кДж/моль,  $A = 3 \cdot 10^{11}$  см<sup>3</sup>/(г · с) и  $Q = 3,5$  кДж/г.

Иницирование ДВ описывали в виде мгновенного выделения энергии  $W$  в пространственной области, имеющей толщину  $\delta = 9$  см (по оси  $x$ ), продольный размер  $d$  (по оси  $y$ ) и бесконечную протяженность по оси  $z$  (рис. 1). При этом варьировали температуру газа в возбуждаемой пространственной области  $T$  и пространственный размер  $d$ . Начальную скорость движения газа принимали равной нулю во всех точках пространства. В зависимости от величин  $T$  и  $d$  наблюдали как выход ДВ на стационарный режим, так и ее затухание, что регистрировалось по временной зависимости скорости ДВ.

Начальная температура невозбуждаемого газа  $T_0 = 300$  К и давление  $p_0 = 100$  кПа. Показатель адиабаты непрореагировавшего газа и продуктов сгорания был равен 1,4. Сделанные приближения оправданы качественным характером поставленной задачи исследования — определить изменение критической энергии инициирования детонации  $W_{кр}$  в зависимости от параметров  $T$  и  $d$ .

Результаты определения зависимости  $W_{кр}(T)$  представлены на рис. 2 ( $W_{кр}$  имеет размерность Дж/см в силу того, что пространственный размер области возбуждаемого газа в направлении оси  $z$  не ограничен). Наблюдается резкий рост энергии с уменьшением  $T$  при  $T/T_0 < 12$ . При  $T/T_0 = 10$   $W_{кр} > 100$  Дж/см. Прогрессирующий рост энергии с уменьшением температуры при  $T/T_0 < 12$  говорит о том, что для инициирования ДВ необходимо существенно увеличить пространственные размеры области возбуждающегося газа. Так, при  $T/T_0 = 11$  и 15 соответствующая  $W_{кр}$  величина  $d = 0,8$  и  $\sim 0,15$  см соответственно. Это говорит о важности не только временных и энергетических, но и пространственных характеристик источника прямого инициирования газовой детонации.

Температура, начиная с которой происходит резкий рост  $W_{кр}$  при уменьшении  $T$ , близка к температуре в точке Чепмена — Жуге для одномерной ДВ (3680 К для смеси  $2H_2 + O_2$  [7]). В этом отношении на-

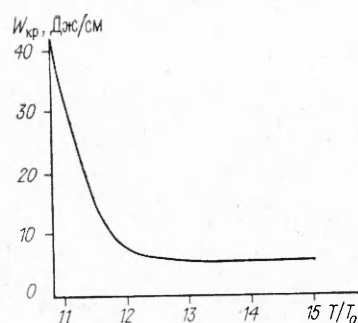


Рис. 2. Зависимость  $W_{кр}$  от безразмерной температуры  $T/T_0$  возбуждаемого газа.

блюдается аналогия с зажиганием горючих смесей слабым источником, для которого нужно создать в объеме  $\approx l^3$  ( $l$  — тепловая толщина фронта ламинарного пламени) температуру не ниже адиабатической температуры горения [8]. Физическая природа данного явления, а также влияние других параметров, важных для инициирования ДВ (толщина газового слоя, доля энергии источника, перешедшей в кинетическую энергию газа) требует дальнейшего исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ульяновский В. Ю. Замкнутая модель прямого инициирования газовой детонации с учетом неустойчивости // ФГВ.— 1980.— 16, № 5.— С. 101—113.
2. Atkinson R., Bull D. C., Shuff P. J. Initiation of spherical detonation in hydrogen — air // Combust. Flame.— 1980.— 39, N 3.— P. 287—300.
3. Lee J. H. S. Initiation of gaseous detonation // Annual Review Phys. Chem.— 1977.— 28.— P. 75—104.
4. Иванов М. Ф., Фортов В. Е., Борисов А. А. Численное моделирование развития детонации в газовых объемах конечной толщины // ФГВ.— 1981—17, № 3.— С. 108—116.
5. Шебеко Ю. Н., Корольченко А. Я., Еременко О. Я. Расчет критической толщины газового слоя по отношению к распространению детонационной волны // Там же.— 1987.— 23, № 6.— С. 89—91.
6. Димитров В. И. Простая кинетика.— Новосибирск: Наука, 1982.— 381 с.
7. Николаев Ю. А., Тончиан М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // ФГВ.— 1977.— 13, № 3.— С. 393—404.
8. Вильямс Ф. А. Теория горения.— М.: Наука, 1971.— 615 с.

г. Балашиха

Поступила в редакцию 9/XII 1991

УДК 662.4 : 621 — 64

С. П. Алексеенко, Д. И. Мацуков, В. Н. Яхимович

### ДЕТОНАЦИОННАЯ ЯЧЕЙКА В НЕОГРАНИЧЕННОМ БЕНЗИНОВОЗДУШНОМ АЭРОЗОЛЕ

Проведена прямая регистрация детонационной ячейки в бензиновоздушном аэрозоле, созданном взрывным способом в неограниченном объеме. Получено, что значения критической энергии инициирования детонации в аэрозоле, рассчитанные по известной формуле, находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами. Зарегистрированные нерегулярные колебания размеров ячейки объяснены неоднородностью концентрации топлива.

Проблема прямого инициирования гетерогенной детонации ударной волной (УВ), имея очевидное научное значение, приобретает исключительную важность при решении прикладных задач взрывобезопасности. Зависимость исследуемого явления от многих факторов различной природы ставит эту проблему в разряд наиболее сложных как с точки зрения теоретического описания, так и экспериментального подтверждения выдвинутых гипотез. Значительные трудности и разногласия возникают уже на стадии построения качественной физической модели процесса,