

РАСЧЕТ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ И РАСПАДА КАПЕЛЬ ГОРЮЧЕГО

С. А. Ждан

Вопрос о возможности гетерогенной детонации в двухфазных смесях, состоящих из газообразного окислителя и распыленного жидкого топлива, имеющего небольшую объемную концентрацию, теоретически исследовался в [1, 2]. Изучению характера изменения термо- и газодинамических параметров в двухфазной смеси в зоне реакции детонационной волны для различных механизмов перехода жидкой фазы в газовую в стационарном случае посвящены работы [3, 4]. Авторами работы [4] проанализировано влияние процессов дробления и деформации капель горючего на протяженность зоны реакции при гетерогенной детонации. Задача о сильной сферической ударной волне (УВ), распространяющейся по двухфазной смеси воздуха и полидисперсного распыла горючего с радиусами капель ≤ 100 мкм, численно решалась в [5], где предполагалось, что массовыделение конденсированной фазы осуществляется по механизму срыва поверхностного слоя горючего с капель высокоскоростным потоком газа.

В настоящей работе в рамках модели [4, 6], учитывающей деформацию и распад капель горючего, численно решена задача о гетерогенной детонации, образующейся в результате сильного взрыва в горючей двухфазной смеси, для монодисперсных распылов горючего с радиусами капель > 100 мкм.

Постановка задачи. Допустим, что в двухфазной среде, состоящей из газовой фазы — воздуха, который находится в состоянии покоя при постоянных давлении p_0 и плотности ρ_0 , и к-фазы, представляющей равномерно распределенный монодисперсный распыл жидкого горючего с радиусами капель x_0 и объемной концентрацией α_0 , произошло мгновенное выделение энергии E_0 в точке, на оси или плоскости симметрии. В результате взрыва возникает сильная УВ, за которой вследствие инерции к-фазы образуется газодинамическая релаксационная зона конечных размеров. В ней под действием высокоскоростного газового потока капли деформируются и дробятся на более мелкие, одновременно с их поверхности срываются быстро испаряющиеся микрокапли горючего. Испарившееся горючее перемешивается с воздухом и вступает в химические реакции с выделением тепла. Выделение энергии замедляет процесс затухания УВ, и при достаточном тепловыделении реализуется выход на режим самоподдерживающейся гетерогенной детонации.

Предположения о деформации и дроблении капель к-фазы за фронтом УВ, следуя работам [4, 6], заключаются в следующем: 1) капли начинают деформироваться в эллипсоиды вращения с малыми полуосями b , параллельными направлению потока г-фазы; 2) критическая стадия деформации наступает, когда длина большой полуоси эллипсоида $\bar{a} = 3x_0$; 3) до момента достижения критической стадии убывание массы капель происходит за счет срыва поверхностного слоя жидкости [7].

Для численного решения задачи использовалась система дифференциальных уравнений, описывающая поведение двухфазной многоскоростной сплошной среды с учетом массообмена и химических реакций [8, 9]. Поскольку в двухфазной среде воздух — распыл жидкого горючего при стехиометрическом соотношении окислитель — горючее, объемная концентрация к-фазы составляет примерно 10^{-4} , система исходных уравнений разделяется на две подсистемы, связанные между собой только через правые части [10].

Предполагая, что газовая фаза — идеальный газ, столкновений между каплями, теплообмена между фазами и конденсации на каплях не происходит, скорость испарения и перемешивания микрокапель к-фазы много больше скорости массовыделения, химические реакции происходят мгновенно и только в газовой фазе, к-фаза несжимаема, внутренняя энергия капель горючего постоянна, получим первую подсистему, описывающую поведение г-фазы:

$$\begin{aligned} \partial \rho / \partial \tau + u \cdot \partial \rho / \partial \lambda + \rho \cdot \partial u / \partial \lambda + \nu \rho u / \lambda &= \alpha_0 \alpha \rho_2 M, \\ \partial u / \partial \tau + u \cdot \partial u / \partial \lambda + 1 / \rho \cdot \partial p / \partial \lambda &= \alpha_0 \alpha \rho_2 / \rho \cdot [M(u_2 - u) - R], \\ \partial p / \partial \tau + u \cdot \partial p / \partial \lambda + \gamma_2 p \cdot \partial u / \partial \lambda + \nu \gamma_2 p u / \lambda &= \\ = (\gamma_2 - 1) \alpha_0 \alpha \rho_2 \{M[Q + e_2 + (u - u_2)^2 / 2 + R(u - u_2)]\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} \text{при } \lambda = 0 \quad u &= 0, \\ \text{при } \lambda = \lambda_\Phi \quad u &= (p - 1) / d, \end{aligned} \quad (2)$$

$$d^2 = \frac{(\gamma_1 - 1)(p - 1)[(\gamma_2 + 1)p + \gamma_2 - 1]}{2[(\gamma_1 - 1)p - \gamma_2 + 1]}, \quad \rho = \left(\frac{\gamma_2 + 1}{\gamma_2 - 1} p + 1 \right) / \left(\frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1} + p \right). \quad (3)$$

Здесь $\tau = t / \tau_0$ — время; $\lambda = r / r_0$ — пространственная переменная; γ_1 и γ_2 — показатели адиабаты соответственно перед и за УВ; $\rho = \rho_1 / \rho_0$, $p = p_1 / p_0$, $u = u_1 / u_0$ — плотность, давление и скорость г-фазы; $\alpha = \alpha / \alpha_0$, $\rho_2 = \rho_2^0 / \rho_0$, $u_2 = u_2^0 / u_0$, $e_2 = e_2^0 / u_0^2$ — объемная концентрация, плотность, скорость, внутренняя энергия капель к-фазы; $Q = \bar{Q} / u_0^2$ — тепловой эффект химических реакций; $d = D / u_0$ — скорость УВ; $\lambda_\Phi = r_\Phi / r_0$ — положение фронта УВ; M — скорость массовыделения единицы массы к-фазы; R — массовая сила, действующая со стороны г-фазы на единицу массы к-фазы за счет сил трения (все переменные имеют безразмерный вид); $\nu = 0, 1, 2$ — соответственно для плоского, цилиндрического и сферического случаев симметрии. Между характерными величинами существует связь:

$$\tau_0 u_0 / r_0 = 1, \quad \rho_0^2 / \rho_0 u_0^2 = 1.$$

Привлекая уравнение деформации капли [11, 4] и предполагая, что только наветренная сторона капли смещается на расстояние \bar{s} [6], запишем обезразмеренную подсистему для к-фазы в области между фронтом УВ и поверхностью критической деформации:

$$\begin{aligned} \partial \alpha / \partial \tau + u_2 \cdot \partial \alpha / \partial \lambda + \alpha \cdot \partial u_2 / \partial \lambda + \nu \alpha u_2 / \lambda &= -\alpha M, \\ \partial u_2 / \partial \tau + u_2 \cdot \partial u_2 / \partial \lambda &= R, \quad \partial v / \partial \tau + u_2 \partial v / \partial \lambda = -v M, \\ \partial \varphi / \partial \tau + u_2 \cdot \partial \varphi / \partial \lambda &= 3r_0 \rho (u - u_2)^2 / 8x_0 \rho_2 (1 - 0,5s), \\ \partial s / \partial \tau + u_2 \cdot \partial s / \partial \lambda &= r_0 \varphi / x_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} M &= M_1 (u - u_2)^{1/2} a^{-3/2}, \quad M_1 = 3r_0 / 2x_0 \cdot (3\pi\nu_2 / x_0 u_0)^{1/2} (\rho / \rho_2)^{1/3} (\nu / \nu_2)^{1/6}, \\ R &= 3r_0 \rho C_D / 8x_0 \rho_2 \nu^{1/3} \cdot |u - u_2| (u - u_2), \quad a = \nu^{1/2} (1 - 0,5s)^{-1/2}. \end{aligned}$$

Здесь $v = 3V / 4\pi x_0^3$ — объем капли, $a = \bar{a} / x_0$ — большая полуось, $s = \bar{s} / x_0$ — перемещение поверхности капли в направлении газового потока, $\varphi = \dot{\varphi} / u_0$ — скорость перемещения (величины обезразмеренные), ν_1, ν_2 — кинематические вязкости газа и капель, вязкость ν_1 предпола-

гается зависимой от температуры, C_D — коэффициент сопротивления [12].

Считаем, что после достижения критической стадии деформации исходная капля распадается на мелкие капли одинакового размера с радиусами $0,2x_0$, которые остаются сферическими, и убывание их массы происходит за счет срыва поверхностного слоя жидкости [7]. Тогда за поверхностью критической деформации поведение к-фазы описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} + u_2 \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial \lambda} + \alpha \cdot \frac{\partial u_2}{\partial \lambda} + \nu \alpha u_2 / \lambda &= -\lambda M_1 (u - u_2)^{1/2} v^{-1/2}, \\ \frac{\partial u_2}{\partial \tau} + u_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial \lambda} &= R, \\ \frac{\partial v}{\partial \tau} + u_2 \cdot \frac{\partial v}{\partial \lambda} &= -M_1 (u - u_2)^{1/2} v^{1/2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Результаты расчетов. Сформулированная задача была просчитана для случая сферической симметрии ($\nu=2$). Цилиндрический и плоский случаи симметрии рассчитываются аналогично. Подсистема (1) с граничными условиями (2), (3) решалась по неявной разностной схеме, способ разрешения которой содержит идею, предложенную в работе [13]. Были заданы следующие числовые значения характерных величин:

$$\begin{aligned} p_0 &= 1 \text{ атм}, \rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3, u_0 = 280 \text{ м/с}, \rho_z^0 = 800 \text{ кг/м}^3, \\ \nu_1 &= 1,31 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \nu_2 = 0,11 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \alpha_0 = 10^{-4}, \\ \gamma_1 &= \gamma_2 = 1,4, Q = 453, 189, r_0 = (E_0/0,851 p_0)^{1/3}. \end{aligned}$$

Начальные профили плотности, скорости и давления для сильного точечного взрыва взяты из [14] с параметрами на фронте УВ:

$$\rho_\Phi / \rho_0 = 5,84, u_\Phi / u_0 = 13,304, p_\Phi / p_0 = 214,54.$$

Рассмотрим вариант расчета сферической гетерогенной детонации для монодисперсного распыла горючего с радиусами капель $x_0 = 300$ мкм и энергией точечного взрыва $E_0 = 3,35 \cdot 10^5$ Дж. В момент, с которого начиналось численное решение задачи, расстояние от центра взрыва до фронта УВ $r_1 = 0,13456$ м. На рис. 1—2 изображены профили давления и массовой скорости газовой фазы в фиксированные моменты времени, получающиеся в результате распространения УВ по двухфазной горючей среде. В окрестности $0,025 < \tau < 0,0382$ образуется поверхность Чепмена—Жуге ($u+c=d$) и формируется зона реакции. (На графиках положение поверхности Чепмена—Жуге изображено вертикальными штрихами). Из рис. 1, 2 видно, что механизм деформации и распада капель влияет на параметры в зоне реакции монодисперсного распыла; от фронта УВ до поверхности распада капель увеличивается давление, причем на поверхности распада оно принимает наибольшее значение. За поверхностью распада происходит резкий спад давления и массовой скорости, связанный с интенсивным тепловыделением, до момента достижения каплями скорости г-фазы, после чего наблюдается медленное уменьшение давления и массовой скорости вплоть до поверхности Чепмена—Жуге.

На рис. 3 представлены графики изменения объемной концентрации α , скорости u_2 , объема v и относительной деформации s капель в зависимости от расстояния за фронтом УВ при $\tau = 0,192$. К моменту достижения капель радиусом 300 мкм критической стадии деформации ($s=1,8$), которая наблюдается на расстоянии 1,13 см от фронта УВ, объем первоначальной капли уменьшается за счет срыва поверхностного слоя на 5,1%, а объемная концентрация капель горючего увеличивается на 8%. После распада исходных капель скорость массовыделения

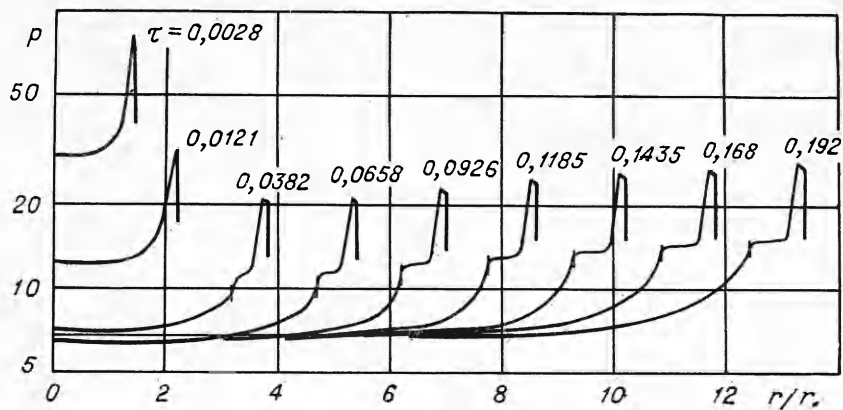


Рис. 1.

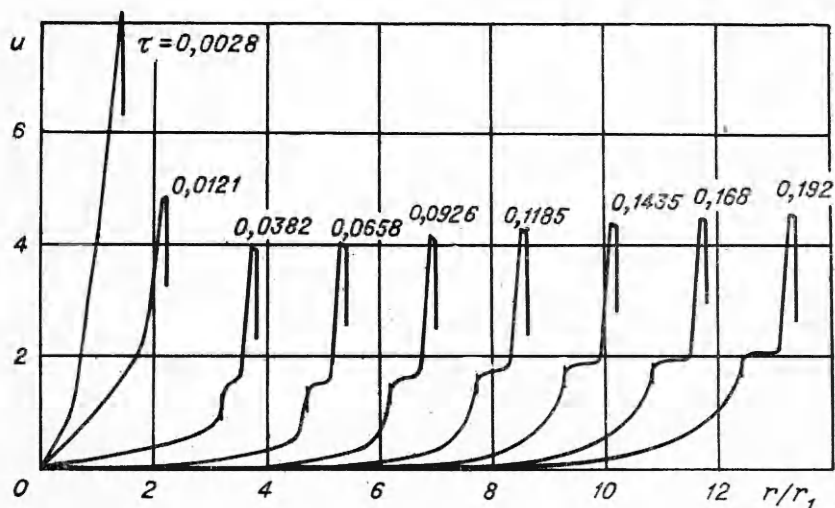


Рис. 2.

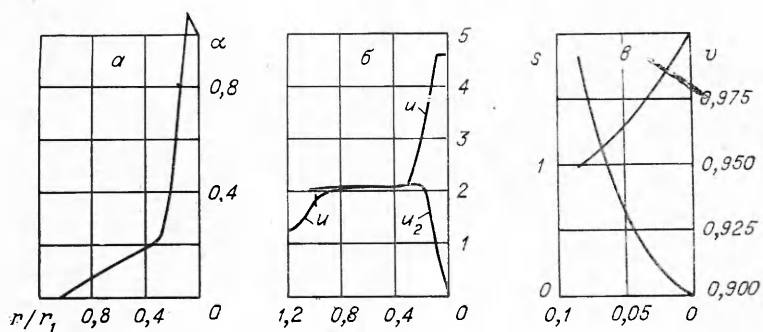


Рис. 3.

к-фазы значительно возрастает, что приводит к уменьшению ее объемной концентрации (рис. 3, а) и к интенсивному тепловыделению в зоне. Из рис. 3, б видно, что длина зоны реакции при $\tau=0,192$ равна 13,32 см. Точность численного решения оценивалась по относительным ошибкам в законах сохранения массы и энергии, причем

$$\max |\Delta m/m| = 0,346 \%, \quad \max |\Delta e/e| = 5,85\%.$$

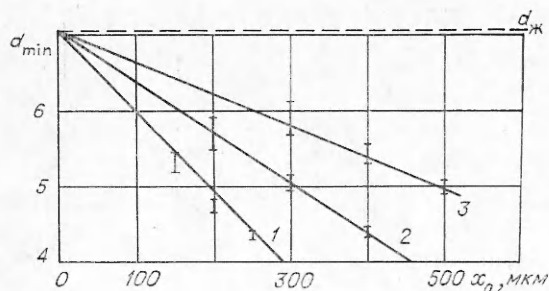


Рис. 4.

При распространении по двухфазной горючей смеси УВ, образующейся в результате сильного взрыва, существует точка пространства, в которой скорость УВ принимает минимальное значение D_{\min} , меньшее, чем $D_{\text{ж}}$ [5], где $D_{\text{ж}}$ — скорость детонации Чепмена — Жуге. Наименьшая скорость УВ является важной характеристикой процесса в целом

так как она может служить критерием выхода или невозможности выхода на режим самоподдерживающейся гетерогенной детонации.

Для выяснения зависимости D_{\min} от энергии взрыва E_0 и размеров капель к-фазы в случае сферической симметрии была проведена серия расчетов. Полученные результаты представлены на рис. 4 ($d_{\min} = D_{\min}/u_0$, $d_{\text{ж}} = D_{\text{ж}}/u_0 = 7,05$). Из анализа расчетов была найдена зависимость, $d_{\min} = d_{\text{ж}} - Ax_0/r_0^{2/3}$, где $r_0 = (E_0/0,851 p_0)^{1/3}$. Для определения постоянной A достаточно задать конкретные значения $x_0 = x_{01}$, $r_0 = r_{01}$, произвести расчет, тогда полученное значение $d_{\min} = d_{\min 1}$ позволяет найти A . (Например, при $x_{01} = 400$ мкм, $r_{01} = 1,571795$ м $d_{\min 1} = 4,4$). Формула для нахождения d_{\min} примет вид

$$d_{\min} = d_{\text{ж}} + (d_{\min 1} - d_{\text{ж}}) (x_0/x_{01}) (r_{01}/r_0)^{2/3}. \quad (6)$$

На рис. 4 изображены кривые, построенные по (6) для трех значений энергии взрыва ($E_0, D_{\text{ж}}$: 1 — $4,1875 \cdot 10^4$, 2 — $3,35 \cdot 10^5$, 3 — $2,68 \cdot 10^6$). Видно, что формула (6) хорошо аппроксимирует результаты расчетов.

В рассматриваемой математической модели предполагается, что задержками воспламенения в зоне реакции можно пренебречь. Это допущение справедливо для скоростей УВ, больших некоторого критического значения D^* , тогда из условия $D_{\min} > D^*$, используя формулу (6), получаем неравенство

$$x_0/x_{01} < (D_{\text{ж}} - D^*) / (D_{\text{ж}} - d_{\min 1}) \cdot (r_0/r_{01})^{2/3}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что при заданной энергии взрыва существует ограничение сверху на размер капель (либо при фиксированном радиусе капели — ограничение снизу на энергию инициирования E_0).

Как показано в работе [15], с уменьшением числа Маха УВ увеличивается задержка воспламенения капли жидкого горючего в окислительной среде и существует минимальная скорость УВ D_* , ниже которой самовоспламенения в следе капли не происходит. Поэтому в области $D_* < D_{\min} < D^*$ вопрос о выходе на режим самоподдерживающейся гетерогенной детонации может быть решен только с использованием математической модели, учитывающей задержку воспламенения в зоне реакции.

Анализ результатов проведенных расчетов показал, что: 1) для распылов горючего с радиусами капель > 100 мкм механизм деформации и дробления капель к-фазы позволяет получать значения ширины зоны реакции и параметров в зоне более близкие к экспериментальным, чем другие существующие механизмы; 2) аналитическая зависимость между d_{\min} , x_0 , r_0 , которая позволяет априори находить минимальную скорость УВ, важна для анализа границ применимости рассматриваемой математической модели при решении нестационарной задачи о гетерогенной детонации в горючей двухфазной смеси.

Автор признателен В. В. Митрофанову за постоянное внимание к работе и ряд критических замечаний.

ИГ СО АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
27/III 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. F. A. Williams. Phys. Fluids, 1961, 4, 2.
2. Ф. Уильямс.— В сб.: Детонация и двухфазное течение. М., «Мир», 1966.
3. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд и др. ФГВ, 1970, 6, 3.
4. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд и др. ПМТФ, 1970, 5.
5. С. А. Ждан. ФГВ, 1976, 12, 4.
6. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, 3.
7. A. A. Ranger, J. A. Nicholls. AIAA J., 1969, 7, 2.
8. Р. И. Нигматулин. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, 3.
9. Р. И. Нигматулин. ПММ, 1970, 34, 6.
10. Э. А. Антонов, А. М. Гладиллин. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, 5.
11. G. D. Gordon. J. Appl. Phys., 1959, 30, 11.
12. С. Ламбарайс, Л. Комбс.— В сб.: Детонация и двухфазное течение. М., «Мир», 1966.
13. Л. Д. Ландау, Н. Н. Мейман, И. М. Халатников.— В сб.: Труды III Всесоюзного математического съезда, т. III. М., Изд-во АН СССР, 1958.
14. Х. С. Кестенбойм, Г. С. Росляков, Л. А. Чудов. Точечный взрыв. Методы расчета. Таблицы. М., «Наука», 1974.
15. S. W. Kauffman, J. A. Nicholls. AIAA J., 1971, 9, 5.

К ВОПРОСУ О ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ В ПЬЕЗОКЕРАМИКЕ СИСТЕМЫ ЦТС ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Е. З. Новицкий, В. А. Огородников, С. Ю. Пинчук

Возможность фазового перехода в пьезокерамике на основе титаната бария и цирконата-титаната свинца (ЦТС или PZT) из сегнето- в параэлектрическое состояние (Кюри-переход) при ударном воздействии уже давно обсуждается в литературе [1—4]. Однако зафиксировать его до сих пор не удавалось.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования ударно-волновых свойств материалов ЦТС-19 и ПКР-1 в области давлений до 170 ГПа. Пьезокерамика ПКР-1, изготовленная по технологии горячего прессования, отличается от известного состава ЦТС-19 [5] модификаторами и имеет при нормальных условиях следующие основные характеристики: плотность — 8000 кг/м³ (у образцов ЦТС-19, исследованных в [4], плотность составляла 7160÷7370 кг/м³), пористость керамики не превышает 1% (у ЦТС-19 до 10%), температура Кюри $T_K=360^\circ\text{C}$ (у ЦТС-19 $T_K=305^\circ\text{C}$), относительная диэлектрическая проницаемость при $T=20^\circ\text{C}$ $\epsilon_0 \approx 700$, удельная электрическая проводимость при комнатной температуре — $(0,2 \div 1,0) \cdot 10^{-10}$ См/м, пьезомодуль $d_{31} \geq 10^{-10}$ Кл/Н, остаточная поляризация $\sim 0,4$ Кл/м². Оба состава лежат практически на границе морфотропных превращений.

Пьезокерамические образцы готовились в виде дисков [4]. В зависимости от условий и целей эксперимента изменялись толщина образцов (от 0,5 до 15 мм), их диаметр (от 10 до 50 мм) и состояние