

20. Bull D. C. e. a. Comb. Flame, 1982, 45, 7.  
 21. Fry R. S., Nicholls I. A. 15-th Symp. (Intern.) on Combustion, 1974.  
 22. Freiwald H., Koch H. W. 9-th Symp. (Intern.) on Combustion, 1963.  
 23. Atkinson R., Bull D. C., Shuff R. I. Comb. Flame, 1980, 39, 287.  
 24. Bull D. C., Elsworth I. E., Hooper G. Astron. Acta, 1978, 5, 997.

Поступила в редакцию 5/VI 1986,  
 после доработки — 19/III 1987

## ДЕТОНАЦИЯ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин,  
 С. И. Сумской, В. А. Шаргагов  
 (Москва)

Параметры воздушных ударных волн (УВ) от детонации топливно-воздушных смесей, расположенных на одинаковой высоте над поверхностью Земли, в значительной мере зависят от радиуса сферических объемов [1]. В [1] изучались смеси, содержащие 16% ацетилена или 8% этилена от общего объема, изменявшегося от 1,4 до 27 м<sup>3</sup>. Центр баллона с горючей смесью и датчики давления располагались на высоте  $H = 3,5$  м, что исключало влияние поверхности Земли на регистрируемые параметры УВ [1]. Однако экспериментальные зависимости избыточного давления за фронтом УВ  $\Delta p$  от безразмерного расстояния  $\lambda = r/r_0$ , приведенные на рис. 1, отличаются для разных значений начального объема ( $V_0 = 4\pi r_0^3/3$ ).

Одномерные расчеты параметров УВ от детонации сферических объемов [2—4] показывают, что для заданного состава смеси избыточное давление на фронте УВ — однозначная функция  $\lambda$ . С целью выяснения причин, вызывающих увеличение интенсивности УВ от детонации больших объемов смеси, проведено численное моделирование течений в продуктах детонации (ПД) и в воздухе применительно к анализу данных [1].

Использовалась методика двумерных расчетов с применением модифицированной разностной схемы [5]. Изменения в схеме сделаны для устранения возможности появления нефизических значений параметров вблизи контактной поверхности (КП), которая выделялась явным образом. В расчете использовалась разностная сетка в цилиндрических координатах  $Z, R$  размером  $100 \times 120$  ячеек. Центр облака помещался в точку  $Z = H, R = 0$ , поверхности Земли соответствовало  $Z = 0$ . Предполагалось, что в процессе расширения ПД находятся в состоянии химического равновесия и их параметры состояния определялись аппроксимацией данных термодинамических расчетов по методике [4]. Считалось, что продукты детонации не перемешиваются с воздухом и не догорают.

Для детонации объема ацетиленовоздушной смеси ( $r_0 = 1,8$  м) на

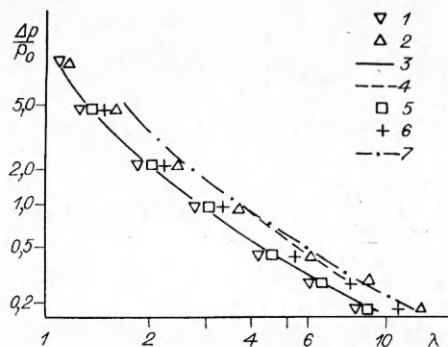


Рис. 1. Зависимость максимального давления за фронтом воздушной УВ от приведенного расстояния.

1, 2 — богатая ацетиленовоздушная смесь ( $V_0 = 1,4$  и  $27$  м<sup>3</sup>) [1]; 3, 4 — расчетные данные для областей I и II; 5, 6 — богатая этиленовоздушная смесь ( $V_0 = 3$  и  $27$  м<sup>3</sup>) [1]; 7 — одномерный расчет для стехиометрической ацетиленовоздушной смеси (приведенное расстояние обезразмерено на начальный радиус богатой смеси с той же массой горючего).

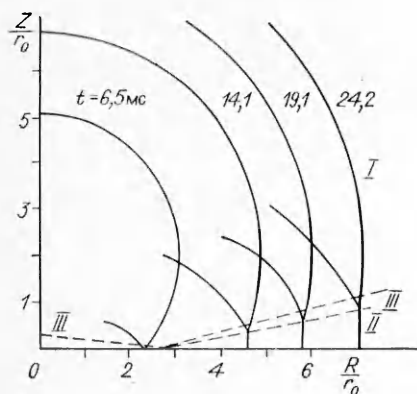


Рис. 2. Последовательность положений ударно-волновых структур и границы областей I—III.

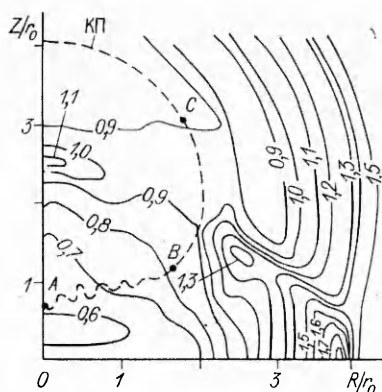


Рис. 3. Поле давления (атм) и положение контактной поверхности для  $t = 11,6$  мс.

рис. 2 показана последовательность положений рассчитанных ударно-волновых структур. Здесь можно выделить три области изменения параметров УВ. В меридиональной плоскости  $(Z, R)$  штриховой линией отмечена граница области I, в каждой точке которой максимальное давление  $p_{\max}$  достигается в падающей УВ и зависит только от расстояния до центра облака  $r = \sqrt{(Z - H)^2 + R^2}$ . В любой точке области II  $p_{\max}$  определяется только координатой  $R$  и реализуется, когда через нее проходит «ножка» Маха; в области III  $p_{\max}$  возникает за отраженной УВ.

В области I максимальное для данной точки давление, полученное одномерным расчетом по методике [4], совпадает с результатом двумерного расчета. Из рис. 2 следует, что линия, на которой находились в опытах датчики давления, попадает в область I. Это означает, что в рамках принятой модели равновесного расширения ПД, даже для самого большого из использованных в опытах [1] объемов горючей смеси, максимальное давление при  $Z = H$  должно достигаться на фронте падающей сферической УВ на любом расстоянии  $R < 10r_0$ . Этот вывод подтверждается данными рис. 3, на котором показаны изобары для  $t = 11,6$  мс после инициирования детонации, а также расчетными зависимостями  $\Delta p(\lambda)$  на рис. 1, 3 для области I и на поверхности Земли для области II (линия 4). Из рис. 1 видно, что результаты расчетов для области I совпадают с экспериментальными данными для  $V_0 = 1,4$  м<sup>3</sup>. Поэтому эффект зависимости  $p_{\max}$  за воздушной УВ от  $V_0$  горючей смеси, обнаруженный в [1], нельзя объяснить увеличением давления в отраженной от поверхности Земли УВ на основе модели детонации, предполагающей равновесное расширение ПД.

Тот факт, что в экспериментах применялись богатые смеси, указывает на возможность догорания продуктов неполного окисления при их смешении с воздухом. Если количество ацетилена, заключенного в горючей смеси, использовавшейся в опытах [1], распределить в объеме воздуха, необходимом для полного окисления, то  $V_0$  увеличится в 2,25 раза. При этом полученные одномерным расчетом значения  $\Delta p(\lambda)$  для объема, занимаемого стехиометрической смесью (см. рис. 1, 7), близки к экспериментальным данным [1] для больших объемов и превышают опытные значения для малых объемов. Так как в ПД смеси ацетилена с воздухом содержание горючих компонентов больше, чем в ПД этиленовоздушной смеси, то при догорании последней выделяется меньше энергии на единицу массы. Для этой смеси эффект от догорания перемешанных с воздухом ПД должен быть меньше, что соответствует данным [1].

Для быстрого догорания продуктов неполного окисления необходимы условия, способствующие их смешению с воздухом. До прихода отраженной от поверхности Земли УВ в область, занятую ПД, условий, приводящих к смешению ПД с воздухом вследствие газодинамической

неустойчивости КП, не возникает, поскольку градиент давления вблизи КП направлен от легких ПД к более плотному воздуху. После прихода отраженной УВ в объем, занятый ПД, граница нижней части области, заполненной ПД, находится в поле давления с градиентом, направленным от легкого газа к тяжелому и способствующим развитию неустойчивости (участок *AB* на рис. 3).

Размер возмущений, полученный в расчете, может не отражать истинного, так как определяется размером начального возмущения КП, равным одной ячейке разностной сетки. Однако факт развития неустойчивости этого участка КП однозначно следует из расчета. Развитие этой неустойчивости приводит к интенсивному турбулентному смешению горючих ПД с воздухом и образованию локальных объемов горючей смеси. Воспламенение и догорание этих объемов ведет к усилению УВ, возбуждаемой в воздухе при детонации, и в свою очередь создает дополнительные условия для развития неустойчивости КП и более интенсивного турбулентного перемешивания. Расчеты показывают, что на участке *BC* контактной поверхности (см. рис. 3) имеется тангенциальный разрыв скорости, который приводит к турбулентному перемешиванию и также способствует образованию смеси ПД и воздуха.

Процесс смешения ПД с воздухом в основном обусловлен взаимодействием течения за отраженной УВ с границей области, занятой ПД. При фиксированном значении *H* с ростом  $r_0$  отношение  $r_0/H$  увеличивается. В этих случаях к КП приходит сильная отраженная УВ, что ведет к интенсивному развитию неустойчивости КП и эффективному турбулентному перемешиванию ПД с воздухом, а следовательно, быстрому выделению энергии при догорании образующейся вследствие смешения горючей смеси.

При  $r_0/H > 6$  отраженная УВ оказывается слишком слабой, чтобы обеспечить сильную неустойчивость КП и быстрое смешение ПД с воздухом. Поэтому ПД не догорают или догорают очень медленно. При детонации богатых смесей в отсутствие взаимодействия УВ с поверхностью Земли можно пренебречь смешением ПД с воздухом и последующим догоранием образующейся горючей смеси. При детонации богатых смесей у поверхности Земли и  $r_0/H < 6$  необходимо учитывать смешение продуктов неполного окисления с воздухом вследствие развития гидродинамической неустойчивости КП под действием отраженной УВ и последующее догорание образующейся горючей смеси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Brossard J., Duco J., Gobert T. e. a. Experimental study of overpressures generated by the detonation of spherical air-hydrocarbon gaseous mixtures. Proc. ENS meeting. V. 1.—Brussel, 1978.
2. Fishburn B. D. Acta Astron., 1976, 3, 4019.
3. Ждан С. А. ФГВ, 1983, 19, 1, 131.
4. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Михалкин В. И. и др. ФГВ, 1985, 21, 3, 92.
5. Mader Ch. L. Numerical Modeling of Detonation.—L.: Berkely, 1977.

Поступила в редакцию 20/VI 1986

#### О ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ ОТКОЛЕ И ПРОБОЕ

Ю. И. Мещеряков, А. К. Диваков, В. Г. Кудряшов  
(Ленинград)

В [1] показано, что микроструктура динамически деформируемых материалов может претерпевать большие изменения уже на временах порядка сотен и даже десятков наносекунд после прохождения волнового фронта. Это значит, что построение реалистических физико-механи-